

# 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响

谢义琴<sup>1</sup>, 张建峰<sup>2</sup>, 姜慧敏<sup>2</sup>, 杨俊诚<sup>2\*</sup>, 邓仕槐<sup>1\*</sup>, 李先<sup>3</sup>, 郭俊梅<sup>2</sup>, 李玲玲<sup>2</sup>,  
刘 晓<sup>2</sup>, 周贵宇<sup>4</sup>

(1.四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 3.湖南省农业科学院, 长沙 410125; 4.辽宁大学环境学院, 沈阳 110036)

**摘 要:**选取江西红壤性双季水稻土为研究对象, 采用盆栽模拟试验研究了4种不同施肥措施即当地农民习惯施肥(FP)、较FP减施20%化肥氮且有机肥替代20%化肥氮(T1)、在T1基础上加施Si、Zn、S三种微肥(T2)和在T2基础上采用20%缓释氮肥替代普通化肥氮(T3)对稻田主要温室气体CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响, 并对土壤微生物量碳(SMBC)、土壤微生物量氮(SMBN)、水稻产量的影响进行了分析。结果表明:4种处理稻田土壤CO<sub>2</sub>的总排放通量均无显著性差异;稻田土壤N<sub>2</sub>O的总排放量与FP处理相比, T1、T2和T3处理均有显著性减少( $P < 0.05$ ), 分别减少了31.72%、27.17%和43.65%, T3较T2处理显著减少22.83%( $P < 0.05$ );稻田土壤CH<sub>4</sub>的总排放量与FP处理相比, T1、T2、T3处理分别高了13.06%、13.90%、21.97%, 其中T3处理差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。与FP处理相比, T1、T2、T3处理显著提高了SMBC和SMBN的含量( $P < 0.05$ ), 分别提高了18.91%、19.30%、20.07%和28.95%、31.66%、29.96%;T1、T2、T3处理对水稻产量均无显著性影响。稻田土壤CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放与SMBC和SMBN存在显著的相关性( $P < 0.01$ )。总体看, T3处理在降低N<sub>2</sub>O的总排放量的同时对提升土壤SMBC和SMBN含量具有明显作用。

**关键词:**温室气体排放; CH<sub>4</sub>; CO<sub>2</sub>; N<sub>2</sub>O; 土壤微生物量碳、氮

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)03-0578-07 doi:10.11654/jaes.2015.03.022

## Effects of Different Fertilization Practices on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Soil

XIE Yi-qin<sup>1</sup>, ZHANG Jian-feng<sup>2</sup>, JIANG Hui-min<sup>2</sup>, YANG Jun-cheng<sup>2\*</sup>, DENG Shi-huai<sup>1\*</sup>, LI Xian<sup>3</sup>, GUO Jun-mei<sup>2</sup>, LI Ling-ling<sup>2</sup>,  
LIU Xiao<sup>2</sup>, ZHOU Gui-yu<sup>4</sup>

(1.College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 3.Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 4.Environment College, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

**Abstract:** Paddy soil is an important source of greenhouse gases. Different fertilization methods may impact greenhouse gas emissions. In a pot experiment, a paddy soil of red soil under double cropping in Jiangxi Province was used to examine the emissions of greenhouse gases under local farmer fertilization practice (FP), organic nitrogen substitution for 20% of chemical nitrogen in FP (T1), Si, Zn and S additions to T1 (T2), and slow release nitrogen substitution for 40% of chemical nitrogen in T2 (T3). Soil microbial biomass carbon (SMBC), soil microbial biomass nitrogen (SMBN) and rice yield were also investigated. The results showed that total emission fluxes of CO<sub>2</sub> were not significantly different between treatments. However, the total emission fluxes of N<sub>2</sub>O in T1, T2 and T3 treatments were significantly reduced ( $P < 0.05$ ) by 31.72%, 27.17%, and 43.65%, respectively, compare to that in FP. In the T1, T2, and T3 treatments, the total emission fluxes of CH<sub>4</sub> were respectively 13.06%, 13.9% and 21.97% higher than in the FP treatment. Compared with FP, the SMBC and SMBN contents were increased by 18.91%, 19.30%, and 20.07%, and 28.95%, 31.66%, and 29.96%, respectively, for T1, T2 and T3. The rice yields did not show significant difference in T1, T2 and T3 treatments. The emission fluxes of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in paddy soil had a significant correlation with SMBC and SMBN ( $P < 0.01$ ). Totally, T3 could significantly reduce the total emission fluxes of N<sub>2</sub>O and improve the soil SMBC and SMBN contents.

**Keyword:** greenhouse gas emission; CH<sub>4</sub>; CO<sub>2</sub>; N<sub>2</sub>O; soil microbial biomass C and N

收稿日期: 2014-11-05

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973项目)课题 2013CB127406; 国家国际科技合作专项(2015DFA20790); 农业部行业专项(201103007); 国家自然科学基金(21107139); 科研院所技术开发研究专项资金(2012EG134235); 中央级公益性科研院所专项资金资助项目(IARRP-2015-21)

**作者简介:** 谢义琴(1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤培肥与环境。E-mail: xieyiqin03@sina.com

\* 通信作者: 杨俊诚 E-mail: yangjuncheng@caas.cn 邓仕槐 E-mail: shdeng8888@163.com

合理的施肥措施是水稻产量的重要保证,但为了追求高产,在我国双季稻生产实际中存在养分利用率低,损失严重,且氮素通过各种损失途径进入水体和大气环境中从而带来一系列的环境问题<sup>[1-2]</sup>。有资料表明,大气中每年有5%~20%的CO<sub>2</sub>、15%~30%的CH<sub>4</sub>、80%~90%的N<sub>2</sub>O来源于土壤<sup>[3]</sup>,而农田土壤是温室气体重要排放源<sup>[4]</sup>。施肥措施是影响土壤温室气体排放的重要因素,稻田土壤温室气体排放的影响主要依赖于肥料类型、施用量以及施用方式等<sup>[5-8]</sup>。有研究表明施肥会使根系周围微生物活性降低,导致土壤CO<sub>2</sub>通量下降<sup>[9]</sup>,但也有研究表明施肥对农田土壤CO<sub>2</sub>排放无明显影响<sup>[10]</sup>;氮肥作为稻田土壤N<sub>2</sub>O排放的重要来源,其用量与N<sub>2</sub>O排放量之间存在线性关系<sup>[11]</sup>,即氮肥用量越多N<sub>2</sub>O的排放量越大,减量施肥能有效减少土壤温室气体的排放量<sup>[12]</sup>。有研究表明肥料种类对温室气体排放也有很大影响,与单施化肥相比,有机无机配施能使稻田氮肥N<sub>2</sub>O-N直接排放系数降低45%~80%<sup>[13]</sup>,能明显减少N<sub>2</sub>O的排放,但有机肥的施用会增加土壤CH<sub>4</sub>的排放<sup>[14]</sup>,缓控释肥的施用也能有效地减少N<sub>2</sub>O的排放<sup>[15]</sup>。

本文以我国江西省红壤性双季稻区土壤为研究对象,重点研究了在当地农民习惯施肥的基础上通过氮肥减施、缓释氮肥替代、有机替代、加施微肥等优化施肥措施对稻田土壤主要温室气体排放的影响,为双季稻集约化农区化肥减施增效和减少温室气体排放提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验地位于江西省农业科学院网室(28°33'53.6"N, 115°56'12.4"E),海拔44 m,属亚热带季风性湿润气候,年平均降水量1680.2 mm,降水量季节分配不均,主要分布在4—6月,累年平均气温17.2℃,试验土壤属红壤性水稻土,种植方式为稻-稻连作,耕层(0~20 cm)土壤:pH5.28,有机质23.62 g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.69

g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮184.31 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾178.33 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷44.54 mg·kg<sup>-1</sup>,有效硅28.05 mg·kg<sup>-1</sup>,有效硫21.14 mg·kg<sup>-1</sup>,有效锌3.65 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 供试材料

供试水稻品种:中嘉早17号,属当地主栽品种。

供试肥料:尿素(N 46%)、缓控释氮肥(N 41.8%),过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)、田娘有机肥(水分含量30.1%,有机质47.8%,N 1.86%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 3.11%,K<sub>2</sub>O 0.85%)、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O(含SiO<sub>2</sub> 24%)、ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O(含Zn 36.3%,含S 17.9%)、硫磺粉(含S 99.9%)、绿肥(紫云英N 0.3%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.11%,K<sub>2</sub>O 0.24%)。

### 1.3 试验设计

盆栽试验设4个处理,每个处理设4次重复。处理分别为农民习惯施肥(FP)、较FP减施20%化肥氮且有机肥替代20%化肥氮(T1)、在T1的基础上增施Si、Zn、S微肥(T2)和在T2基础上采用20%缓释氮肥替代普通化肥氮(T3)。FP处理N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O施用量分别为330 kg·hm<sup>-2</sup>、180 kg·hm<sup>-2</sup>、300 kg·hm<sup>-2</sup>;T1、T2和T3处理氮磷钾养分投入量相同,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O施用量分别为270 kg·hm<sup>-2</sup>、180 kg·hm<sup>-2</sup>、300 kg·hm<sup>-2</sup>,T2和T3加施硅肥、锌肥和硫肥,施用量分别为60 kg·hm<sup>-2</sup>、6.9 kg·hm<sup>-2</sup>、60 kg·hm<sup>-2</sup>,FP处理氮肥基蘖穗肥比例:60-40-0,T1和T2处理氮肥基蘖穗肥比例:40-30-30,T3处理缓释氮肥基施,氮肥基蘖穗肥比例:60-0-40,其余肥料均基施,具体施肥量见表1。盆栽试验每盆装风干土10 kg,过60目筛,每盆移栽水稻3穴。水稻于2014年4月26日施基肥,4月27日移栽,5月5日施分蘖肥,6月9日施穗肥,7月24日收获。

### 1.4 土壤样品采集及处理

土壤样品分别于作物收获前采集,样品经去除可见的水稻根,过2 mm筛,放于4℃冰箱中冷藏,用于测定土壤微生物量碳、氮。

### 1.5 气体样品采集

采用密闭式静态箱法收集。采样装置包括箱体和盆体两部分,箱体为不透明的长方体不锈钢箱(30

表1 不同处理施肥量(g·pot<sup>-1</sup>)

Table 1 Amount of fertilizers applied to rice in different treatments(g·pot<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	尿素氮 Urea nitrogen	缓释尿素氮 Slow release nitrogen fertilizer	有机肥 Organic fertilizer	过磷酸钙 Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	氯化钾 KCl	绿肥 Green manure	微肥 Micronutrient fertilizers		
							硅肥 Si	锌肥 Zn	硫肥 S
FP	3.19	0	0	6.67	2.22	100	0	0	0
T1	2.61	0	30.55	1.94	1.94	100	0	0	0
T2	2.61	0	30.55	1.94	1.94	100	0.82	0.13	0.27
T3	1.63	0.979	30.55	1.94	1.94	100	0.82	0.13	0.27

cm×30 cm×100 cm),顶部内部设一小型风扇,中部设一气密性气体取样口及箱体内温度测定口,盆体为长方体不锈钢(30 cm×30 cm×25 cm),盆顶设有2 cm 封闭性水槽,测定前将水槽内注满水并将箱体插入水槽中,形成一个密闭性气体空间。移栽后及施肥后一周每隔1 d 采集一次,平常每周采集一次,遇强降雨天气则推迟1 d 取样。采样时间为上午08:00—11:00,罩箱后,0.5、10、15 min 和20 min 后用注射器取60 mL 气体注入预先抽真空的玻璃瓶中保存,并同时记录用于计算通量的采样时间和气温。

### 1.6 测定项目及方法

土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法<sup>[16]</sup>测定,温室气体的浓度采用气相色谱测定。

### 1.7 气体计算及数据处理方法

(1)土壤温室气体CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O 排放通量计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$F = \rho h \frac{dC}{dT} \frac{273}{273+t} \frac{p}{p_0}$$

式中,F 为CO<sub>2</sub>的排放通量(mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)、CH<sub>4</sub>的排放通量(mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)和N<sub>2</sub>O 的排放通量(μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>);ρ 为三者为标准状态下的密度(CO<sub>2</sub>为1.816 kg·m<sup>-3</sup>、CH<sub>4</sub>为0.714 kg·m<sup>-3</sup>和N<sub>2</sub>O 为1.964 kg·m<sup>-3</sup>);h 为采样箱顶部距水面的实际高度,m; $\frac{dC}{dT}$  为采样过程中采样箱内气体的浓度变化率,mL·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>;t 为采样箱内的平均温度,℃;p 为采样箱内气压,p<sub>0</sub> 为标准大气压。由于该地区海拔为7 m,气压影响很小,实际计算中忽略气压的影响。

(2)土壤温室气体CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O 累积排放量=

$$\sum_{i=1}^n F_i \cdot D_n$$

式中,F<sub>i</sub> 为各采样期内CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O 的平均排放通量,D<sub>n</sub> 为采样期的天数。

数据处理与分析用Excel 2010 程序进行数据的相关计算,SPSS 19.0 软件进行相关统计分析,Origin 8.6 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥措施对稻田土壤温室气体的影响

由图1可知,不同施肥处理稻田土壤CO<sub>2</sub> 排放通量变化规律大致相同,变化范围在89.90~1596.97 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;水稻移植后基肥与分蘖肥施肥后观察期内各处理CO<sub>2</sub> 排放通量均较小,在100~300 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 间变化;分蘖肥观察期后空闲期间各处理CO<sub>2</sub> 排放通量开始增大,于6月3日(移植后第35 d)达到排放通量的最大值,FP、T1、T2 及T3 处理排放通量分别达到1 596.97 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>、1 409.44 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>、1 506.23 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 和1 478.96 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;穗肥施肥后观察期内各处理CO<sub>2</sub> 排放通量基本呈逐步上升趋势,在700~1400 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 间变化;穗肥观察期后空闲期间各处理CO<sub>2</sub> 排放通量在600~1200 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 间变化。由表2可知,基肥施用一周期间CO<sub>2</sub> 的排放总

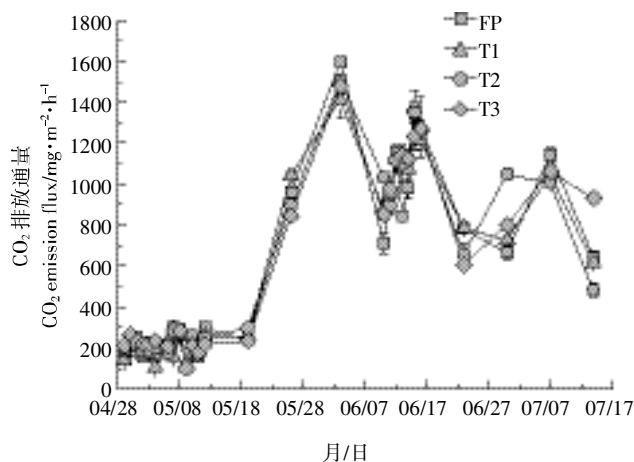


图1 不同施肥措施下土壤CO<sub>2</sub> 的排放通量

Figure 1 CO<sub>2</sub> emission fluxes in rice soil under different treatments

表2 不同施肥措施下CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 的排放量(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Emissions of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> in rice soil under different treatments(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理	基肥期 Basal fertilizer period			分蘖肥期 Tillering fertilizer period			穗肥期 Panicle fertilizer period			总排放量 Total emissions		
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
FP	336.08b	0.12a	5.57a	381.48a	0.33a	13.11b	1 721.11a	0.45a	6.77a	14 634.62±158.66a	4.02±0.08a	70.04±3.25b
T1	274.41c	0.10ab	5.70a	322.62c	0.25b	21.11a	1 869.71a	0.34b	5.00c	14 516.63±275.80a	2.74±0.20bc	79.19±3.23ab
T2	341.56b	0.10ab	5.55a	358.61b	0.25b	20.75a	1 887.60a	0.36b	5.42bc	14 656.55±259.71a	2.93±0.25b	79.78±3.38ab
T3	385.87a	0.09b	5.42a	357.29b	0.23b	20.01a	1 850.66a	0.26c	6.01b	14 962.45±91.49a	2.26±0.07c	85.43±1.69a

注:表中不同英文字母表示差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different letters within a column mean significant difference(P<0.05). The same below.

量T3处理显著高于其他3个处理( $P<0.05$ ),T1处理显著低于其他3个处理( $P<0.05$ ),FP处理与T2处理间差异不显著;分蘖肥施用一周期间CO<sub>2</sub>的排放总量FP处理显著高于其他3个处理( $P<0.05$ ),T1处理显著低于其他3个处理( $P<0.05$ ),T2处理与T3处理间差异不显著;穗肥施用一周期间CO<sub>2</sub>的排放总量四个处理间差异不显著;基追肥期间CO<sub>2</sub>的排放总量以穗肥期间排放最多;整个期间各处理CO<sub>2</sub>的总排放量的变化范围是14 516.63~14 962.45 kg·hm<sup>-2</sup>,各处理间差异均不显著。

由图2可知,不同施肥处理稻田土壤N<sub>2</sub>O排放通量变化规律大致相同,变化范围在26.81~765.51 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;水稻移植后基肥施肥后观察期内各处理N<sub>2</sub>O排放通量逐渐增大但变化范围不大,在26.81~81.35 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>间;分蘖肥施肥后观察期内各处理N<sub>2</sub>O排放通量先减少后增加,变化范围在73.22~329.63 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>之间;分蘖肥观察期后空闲期间各处理N<sub>2</sub>O排放通量逐渐增大,于6月3日(移植后第35 d)达到排放通量中的最大值,FP、T1、T2和T3处理排放通量分别达到765.51 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>、517.20 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>、603.49 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和366.66 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;穗肥施肥后N<sub>2</sub>O排放通量先增加后减少,变化范围在71.18~407.97 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>间;穗肥观察期后空闲期间各处理N<sub>2</sub>O排放通量较低且较稳定,在31.64~79.12 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>间变化。由表2可知,基肥施用一周期间N<sub>2</sub>O的排放总量FP处理显著高于T3处理( $P<0.05$ );分蘖肥施用一周期间N<sub>2</sub>O的排放总量FP处理显著高于其他3个处理( $P<0.05$ ),T1、T2和T3处理间差异不显著;穗肥施用一周期间N<sub>2</sub>O的排放总量FP处理显著高于其他3个处理,T3处理显著低于T1和T2处理,T1与T2处

理间差异不显著;基追肥期间N<sub>2</sub>O的排放总量以穗肥期间排放最多;整个期间各处理N<sub>2</sub>O的总排放量的变化范围是2.26~4.02 kg·hm<sup>-2</sup>,FP处理显著高于其他3个处理( $P<0.05$ ),T3处理显著低于T2处理( $P<0.05$ ),T1与T2、T3处理间差异不显著( $P>0.05$ );与FP处理相比,T1、T2和T3处理分别减少了31.72%、27.17%和43.65%;T3比T2低22.83%。

由图3可知,不同施肥处理稻田土壤CH<sub>4</sub>排放通量变化规律大致相同,变化范围在0.17~17.19 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;水稻移植后基肥施肥后观察期内各处理CH<sub>4</sub>排放通量先逐渐增大后有些微下降,总体变化比较平缓,在0.17~5.60 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>间变化;分蘖肥施肥后观察期内各处理CH<sub>4</sub>排放通量先逐渐增大后减少,于5月9日(移植后第11 d)达到排放通量中的最大值,FP、T1、T2及T3处理排放通量分别达到9.37、16.98、17.19 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和15.57 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;分蘖肥观察期后空闲期间各处理CH<sub>4</sub>排放通量的变化范围在3.15~8.18 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>间;穗肥施肥后观察期内各处理CH<sub>4</sub>排放通量变化较小,在2.09~5.48 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>间变化;穗肥观察期后空闲期间各处理CH<sub>4</sub>排放通量变化最小,在0.25~0.71 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>间变化。由表2可知,基肥施用一周期间CH<sub>4</sub>的排放总量4个处理间差异不显著;分蘖肥施用一周期间CH<sub>4</sub>的排放总量FP处理显著低于其他3个处理( $P<0.05$ );穗肥施用一周期间CH<sub>4</sub>的排放总量FP处理显著高于其他3个处理,T3处理显著高于T1处理,T1处理与T2处理和T2与T3处理间差异不显著;基追肥期间CH<sub>4</sub>的排放总量以穗肥期间排放最多;整个期间各处理CH<sub>4</sub>的总排放量的变化范围是70.04~85.43 kg·hm<sup>-2</sup>,FP处理显著低于T3处理( $P<0.05$ ),FP、T1和T2处理间差异不显

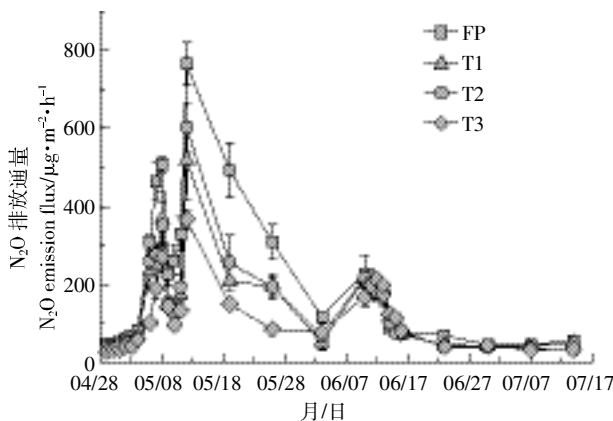


图2 不同施肥措施下土壤N<sub>2</sub>O的排放通量

Figure 2 N<sub>2</sub>O emission fluxes in rice soil under different treatments

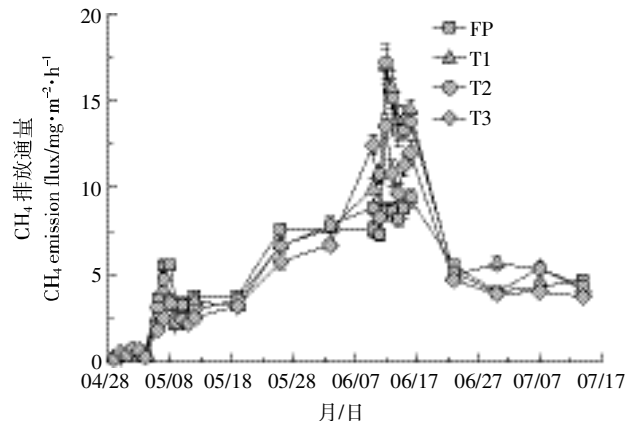


图3 不同施肥措施下土壤CH<sub>4</sub>的排放通量

Figure 3 CH<sub>4</sub> emission fluxes in rice soil under different treatments

著( $P>0.05$ ), T1、T2、T3 处理间差异不显著( $P>0.05$ ); 与 FP 处理相比, T1、T2、T3 处理分别高了 13.06%、13.90%、21.97%。

## 2.2 不同施肥措施对土壤微生物量碳、氮及产量的影响

由表 3 可知, 不同施肥处理土壤微生物量碳(SMBC)含量的变化范围是 880.17~1 056.86  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与 FP 处理相比, T1、T2 和 T3 处理分别增加了 18.91%、19.30%和 20.07%, 3 个处理 SMBC 含量均显著高于 FP 处理( $P<0.05$ ), 处理间差异均不显著; 不同施肥处理土壤微生物量氮(SMBN)含量的变化范围是 62.13~81.82  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与 FP 处理相比, T1、T2 和 T3 处理 SMBN 含量分别增加了 28.95%、31.66%和 29.96%, 3 个处理 SMBN 含量均显著高于 FP 处理( $P<0.05$ ), 处理间差异均不显著; 4 个处理间水稻产量均无显著性差异。

## 2.3 稻田土壤 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 的总排放量及土壤微生物量碳、氮的关系

由表 4 可知, 稻田土壤  $\text{CO}_2$  的总排放量与  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  的总排放量和土壤微生物量碳、氮无明显的相关性,  $\text{N}_2\text{O}$  的总排放量与  $\text{CH}_4$  的总排放量和土壤微生物

量碳、氮呈显著的负相关关系( $P<0.01$ ),  $\text{CH}_4$  的总排放量与土壤微生物量碳、氮呈显著的正相关关系( $P<0.01$ ), 土壤微生物量碳、氮间呈显著的正相关关系( $P<0.01$ )。

## 3 讨论

### 3.1 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响

从稻田土壤  $\text{CO}_2$  排放通量的变化规律及总排放量可以看出, 本文不同施肥处理的  $\text{CO}_2$  排放通量的变化规律相似且总排放量差异不显著, 主要是由于  $\text{CO}_2$  通量与作物生长有关<sup>[18]</sup>, 且受植物根系呼吸的影响, 而本文的四种施肥处理水稻的生长正常, 由此也可以说明本文的减量施肥措施均能满足水稻的正常生长。

从稻田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的变化规律可以看出, 本文不同施肥处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的变化规律相似, 在水稻晒田期出现  $\text{N}_2\text{O}$  的排放峰值。从稻田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  总排放量可以看出, 不同施肥措施总排放量之间存在差异, 氮肥不同减量措施均能显著减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 其原因是  $\text{N}_2\text{O}$  的排放主要受外源 C、N 素供应水平的制约<sup>[19]</sup>, 氮肥的减量施用减少了外源氮素的供应, 而有机肥的施入增加了外源碳素, 增加了土壤有机碳含量, 有机碳能够固定土壤速效氮并促进  $\text{N}_2\text{O}$  转化为  $\text{N}_2$  的反硝化过程<sup>[20]</sup>, 从而减少了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放; 微肥的施用对稻田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响甚微; 缓释肥部分替代普通氮肥能显著减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 这与李香兰<sup>[21]</sup>、王斌<sup>[15]</sup>等的研究结果相同, 其原因可能是只有在肥料的氮素释放速率符合作物对氮素的吸收速率时,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放才会减少, 而缓释肥正是根据作物的需肥特性减缓或促进养分的释放, 使养分释放规律与作物养分需求特性相匹配的肥料<sup>[22]</sup>, 因此能够显著减少稻田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。

从稻田土壤  $\text{CH}_4$  排放通量的变化规律可以看出, 本文不同施肥处理的  $\text{CH}_4$  排放通量的变化规律相似, 在水稻分蘖期出现  $\text{CH}_4$  的排放峰值。从稻田土壤  $\text{CH}_4$  总排放量可以看出, 不同施肥措施总排放量之间存在差异, 有机氮部分替代无机氮措施与农民习惯施肥措施间差异虽未达显著水平, 但仍比农民习惯措施高 13.06%, 说明有机无机配施会增加  $\text{CH}_4$  的排放, 其主要原因是有机肥的施用向土壤中输入了大量的有机碳, 且淹水条件下有机肥的分解降低了土壤的氧化还原电位<sup>[23]</sup>, 促进了稻田土壤  $\text{CH}_4$  的排放, 而本文结果并未有显著增加, 可能与有机肥的施用量、种类及试验地的外环境等因素有关; 微肥的施用对稻田土壤

表 3 不同施肥措施下土壤微生物量碳、氮及产量

Table 3 Soil microbial biomass C and N and rice yield under different fertilization treatments

处理 Treatment	SMBC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	SMBN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
FP	880.17±6.23b	62.14±0.64b	8 845.39±168.27a
T1	1 046.57±7.59a	80.13±1.67a	8 494.00±63.78a
T2	1 050.00±4.30a	81.82±0.93a	8 485.12±79.57a
T3	1 056.86±9.40a	80.76±1.42a	8 770.16±117.57a

表 4 稻田土壤  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  总排放量及土壤微生物量碳、氮的相关性

Table 4 Correlation between  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emissions, SMBC and SMBN in rice soil

	$\text{CO}_2$ / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$\text{N}_2\text{O}$ / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$\text{CH}_4$ / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	SMBC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	SMBN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\text{CO}_2/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	1				
$\text{N}_2\text{O}/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	-0.009	1			
$\text{CH}_4/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	-0.035	-0.832**	1		
SMBC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.102	-0.825**	0.639**	1	
SMBN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.200	-0.818**	0.640**	0.963**	1

注:\*\*表示在 0.01 显著性水平下显著相关。

Note:\*\*Means extremely significant difference at the 0.01 level (2-tailed).

CH<sub>4</sub> 排放的影响甚微;缓释氮肥部分替代普通氮肥措施与普通氮肥措施间差异虽不显著,但仍比普通氮肥措施高 13.06%,说明缓释肥的施用会增加CH<sub>4</sub> 的排放,这与易琼<sup>[24]</sup>等的研究结果相似,其原因可能是稻田土壤 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 的排放存在一定的互为消长的关系<sup>[15]</sup>,根据 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 的排放情况及总排放量的相关性分析也可看出二者之间具有一定的互为消长关系。

### 3.2 不同施肥措施对土壤微生物量碳、氮的影响

土壤微生物是土壤结构形成的重要生物因素,土壤微生物量是反映土壤微生物活性的重要指标。从土壤微生物碳、氮含量可以看出,与农民习惯施肥相比,氮肥不同减量施用措施能显著提高土壤微生物量碳、氮的含量,其原因主要是与全量化肥氮相比,有机无机氮的配合施用,既向土壤补充输入了外源有机碳源,提高了土壤养分的有效性和保水能力,又改善了土壤物理性状,这将大大刺激土壤微生物群落和活性<sup>[25-26]</sup>,促进土壤中微生物的新陈代谢<sup>[27]</sup>,因此有利于微生物的繁衍,提高土壤微生物量碳、氮的含量。研究结果表明 N<sub>2</sub>O 的总排放量与土壤微生物量碳、氮呈显著的负相关关系,这可能是土壤 N<sub>2</sub>O 的排放受硝化与反硝化作用的影响,其作用过程又受土壤微生物活性的影响,因此具有相关性。

氮肥不同减量措施与农民习惯施肥措施间水稻产量差异不显著,说明减量施氮肥措施能满足水稻生产的需求。本文微肥的施用并未表现出增产的效果,这与很多研究结果不一致<sup>[28-31]</sup>,根据供试土壤硅锌硫的背景值可以看出,试验地 Zn、Si 和 S 并不缺乏,因此施用微肥并没有体现其增产性,而本试验保留微肥的施用措施,其意义在于研究微肥施用对土壤质量和水稻产量的持续性影响。

## 4 结论

(1)有机肥的施用会增加稻田土壤 CH<sub>4</sub> 的排放,缓释氮肥的施入也会导致稻田土壤 CH<sub>4</sub> 的增加;氮肥的减量施用能显著减少稻田土壤 N<sub>2</sub>O 的总排放量,缓释氮肥的施用也能显著减少稻田土壤 N<sub>2</sub>O 的总排放量,本试验暂未发现微肥的施用对稻田土壤温室气体排放的影响。

(2)与农民习惯施肥相比,20%减氮施肥对水稻产量无显著影响,且有机肥部分替代化肥能显著提高土壤微生物量碳、氮的含量。

(3)稻田土壤 N<sub>2</sub>O 的总排放量和 CH<sub>4</sub> 的总排放量与土壤微生物量碳、氮呈显著的负相关关系,CH<sub>4</sub>

的总排放量与土壤微生物量碳、氮间互呈显著的正相关关系。

### 参考文献:

- [1] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *PNAS*, 2009, 106:3041-3046.
- [2] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320(5878):889-892.
- [3] Hansen J E, Laci A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, 346(6286): 713-719.
- [4] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [5] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 施氮量及抑制剂配比对双季稻生长期温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 919-927.  
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG hua, et al. Effects of nitrogen amount and inhibitor ratio on greenhouse gas emission during double-rice growing season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 919-927.
- [6] Riya S, Muroi Y, Kamimura M, et al. Mitigation of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a forage rice field fertilized with aerated liquid fraction of cattle slurry by optimizing water management and topdressing[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 75(2):24-32.
- [7] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2):153-163.  
MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong. Effect of fertilization on methane emissions from rice fields[J]. *Soils*, 2010, 42(2):153-163.
- [8] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effects of urea and controlled release urea fertilizers on methane emission from paddy fields: A multi-year field study [J]. *Pedosphere*, 2014, 24(5):662-673.
- [9] Phillips R P, Fahey T J. Fertilization effects on fine root biomass, rhizosphere microbes and respiratory fluxes in hard wood forest soils[J]. *New Phytologist*, 2007, 176:655-664.
- [10] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 不同施肥方式对农田土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007(4):34-39.  
DONG Yu-hong, OUYang-zhu, LI Yun-sheng, et al. Influence of different fertilization on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from agricultural soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(4):34-39.
- [11] Zou J W, Huang Y, Lu Y Y, et al. Direct emission factor for N<sub>2</sub>O from rice-winter wheat rotation systems in Southeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39:4755-4765.
- [12] 杨书运, 严 平, 马友华, 等. 施肥对冬小麦土壤温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报. 2010, 19(7):1642-1645.  
YANG Shu-yun, YAN Ping, MA You-hua, et al. Effects on emissions of soil greenhouse gas by fertilizing to winter wheat[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7):1642-1645.
- [13] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>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 CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2011, 35(4):707-720.
- [14] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(5):663-669.
- JIANG Chang-sheng, WANG Yue-si, ZHENG Xun-hua, et al. Advances in the research on methane emission from paddy fields and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5):663-669.
- [15] 王 斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2):314-323.
- WANG Bin, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2):314-323.
- [16] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 气象出版社, 2006.
- WU Jin-shui, LIN Qi-mei, HUANG Qiao-yun, et al. Method and its application in determination of soil microbial biomass[M]. China Meteorological Press, 2006.
- [17] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Impacts of soil moisture on nitrous emission from croplands: A case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2:207-224.
- [18] 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 CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes of farmland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7):1303-1307.
- [19] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4):7-12.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4):7-12.
- [20] Azam F, Muller C, Weiske A, Benckiser G, et al. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide—role of oxidizable carbon and applied nitrogen[J]. *Biology Fertility of Soils*, 2002, 35:54-61.
- [21] 李香兰, 徐 华, 蔡祖聪. 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放消长关系及其减排措施[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2123-2130.
- LI Xiang-lan, XU Hua, CAI Zu-cong. Trade-off relationship and mitigation of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2123-2130.
- [22] 武志杰, 陈利军. 缓释/控释肥料:原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 2003:9-25.
- WU Zhi-jie, CHEN Li-jun. Slow / Controlled release fertilizers: Principle and Application[M]. Beijing: Science Press, 2003:9-25.
- [23] 李 波, 荣湘民, 谢桂先, 等. 不同有机无机肥配施对双季稻田 CH<sub>4</sub> 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 276-282.
- LI Bo, RONG Xiang-min, XIE Gui-xian, et al. Effect of combined application with organic and inorganic fertilizers on methane emission in double-cropping paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(2): 276-282.
- [24] 易 琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1432-1437.
- YI Qiong, PANG Yu-wan, YANG Shao-hai, et al. Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8):1432-1437.
- [25] Deboz K, Rasmussen P H, Pedersen A R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: effect of organic matter input[J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13(3):209-218.
- [26] Jackson L E, Calderon F J, Steenwerth K L, et al. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality[J]. *Geoderma*, 2003, 114(3-4):305-317.
- [27] 芦思佳, 韩晓增. 长期施肥对微生物量碳的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(6):1354-1358.
- SUN Si-jia, HAN Xiao-zeng. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(6):1354-1358.
- [28] 黄秋婵, 韦友欢, 韦良兴. 硅对水稻生长的影响及其增产机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3):919-920.
- HUANG Qiu-chan, WEI You-huan, WEI Liang-xing, et al. Review of the effect of the silicon on growth and mechanism of rice yield-increasing[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(3):919-920.
- [29] 丁能飞, 郭 彬, 李建强, 等. 氮硅互作对水稻营养和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(12):127-130.
- DING Neng-fei, GUO Bin, LI Jian-qiang, et al. Effects of nitrogen and silicon interaction on the nutrition and yield of rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(12): 127-130.
- [30] 徐金仁, 周文红, 徐芬芬, 等. 水稻硫肥施用技术研究[J]. 广东农业科学, 2010(2):75-76, 83.
- XU Jin-ren, ZHOU Wen-hong, XU Fen-fen, et al. Study on sulfur fertilization in rice[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010(2):75-76, 83.
- [31] 郭 彬, 娄运生, 梁永超, 等. 氮硅肥配施对水稻生长、产量及土壤肥力的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6):33-36.
- GUO Bin, LOU Yun-sheng, LIANG Yong-chao, et al. Effects of nitrogen and silicon applications on the growth and yield of rice and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(6):33-36.