

# 华南稻区不同施肥模式下土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征

易琼, 唐拴虎\*, 逢玉万, 黄旭, 黄巧义, 李苹, 付弘婷, 杨少海

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640)

**摘要:**通过田间试验研究了不同施肥模式对华南稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响。研究表明:水稻生育期内, CH<sub>4</sub> 排放呈单峰曲线, 不同水稻季 CH<sub>4</sub> 排放峰出现的时间和峰值不同, 晚稻 CH<sub>4</sub> 排放峰出现的时间早于早稻, 且峰值明显高于早稻。由第三季水稻观测数据可知:稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量范围分别为 -0.29~14.83、-6.09~31.54、-0.11~22.87 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, 而不同生长季 N<sub>2</sub>O 排放数据表明稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量非常小且 N<sub>2</sub>O 排放规律不明显;稳定性氮肥结合甲烷抑制剂(SN)处理 CH<sub>4</sub> 季节排放总量最低, 与农民习惯施肥处理(FP)相比, SN 处理均能明显降低 CH<sub>4</sub> 季节排放量, 降幅分别达 34.1%、28.4%和 7.7%。分析单位产量 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 增温潜势可知, 两季水稻 SN 处理较 FP 处理全球增温潜势分别降低了 31.0%和 17.8%。综上认为, 华南稻-稻连作种植体系下, CH<sub>4</sub> 气体是稻田全球增温潜势增加的主要温室气体, SN 施肥模式可作为该区域稻田温室气体减排的一项重要措施。

**关键词:**施肥模式; 华南; 双季稻; 甲烷; 氧化亚氮

**中图分类号:** S511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2014)12-2478-07 **doi:** 10.11654/jaes.2014.12.028

## Emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from Paddy Soil in South China Under Different Fertilization Patterns

YI Qiong, TANG Shuan-hu\*, PANG Yu-wan, HUANG Xu, HUANG Qiao-yi, LI Ping, FU Hong-ting, YANG Shao-hai

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture/ Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to study the effects of different fertilization patterns on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy soil. Methane emissions displayed a single peak curve during rice growing period. The emission peak occurred earlier for late rice than for early rice variety, and the peak value was higher in the former than in the latter. The emitted CH<sub>4</sub> ranged from -0.29~14.83 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, -6.09~31.54 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, -0.11~22.87 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> for early and late rice in 2012 and early rice in 2013, respectively. The N<sub>2</sub>O fluxes in paddy soil were quite low and varied little among different rice seasons. Compared with farmers' practice (FP), the treatment with stabilized nitrogen fertilizer combined with methane inhibitor (SN) showed the lowest seasonal total CH<sub>4</sub> emission, and effectively reduced seasonal CH<sub>4</sub> emission fluxes by 34.1%, 28.4% and 7.7% in early and late rice in 2012 and early rice in 2013, respectively. The partial global warming potential (pGWP) per unit output showed that SN treatment reduced the pGWP by 31.0% and 17.8% for CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O, respectively, in comparison with FP. In conclusion, CH<sub>4</sub> was the most important greenhouse gas in rice cropping system in South China Region, and SN could serve as an effective measure to reduce greenhouse gas emissions.

**Keywords:** fertilization patterns; South China; double rice cropping; methane; nitrous oxide

近年来, 随着人类活动和自然变化的共同影响, 全球气候变暖问题不仅引起了科学界的高度关注,

也成为人们越来越关心的社会问题<sup>[1]</sup>。据相关分析报道, 人类活动可能是导致全球气温升高的主要原因之一<sup>[2-3]</sup>。世界气象组织观测数据表明<sup>[4]</sup>, 大气生态系统中甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)的平均摩尔分数在2012年达到新高, 其浓度值分别为(1819±1)×10<sup>-9</sup>和(325.1±0.1)×10<sup>-9</sup>, 且分别为工业化前水平的260%和120%。CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O作为温室气体的重要组成部分, 对

收稿日期: 2014-07-23

基金项目: 广东省科技计划项目(2011A030600001); 广东省科技计划项目(2012A020100004)

作者简介: 易琼(1985—), 女, 博士研究生, 助理研究员, 从事温室气体减排及养分资源利用相关研究。E-mail: yiq100@126.com

\* 通信作者: 唐拴虎 E-mail: tfstshu@aliyun.com.cn

人为温室效应的贡献分别为15%和5%,且目前这两种气体正分别以每年1.1%和0.3%的速率增长<sup>[5]</sup>。水稻种植是人为活动过程中温室气体(CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)的主要排放源之一<sup>[6]</sup>。我国水稻种植面积为28.6×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,约为世界稻田面积的20%<sup>[7]</sup>。目前有关稻田温室气体排放的相关研究较多,主要集中在我国长江中下游地区,尤其在稻麦轮作制度下不同农艺措施对减少农田土壤温室气体排放相关研究<sup>[8-10]</sup>,而有关华南地区稻田温室气体排放及其增温潜势的研究较少。因此,本文阐述了华南地区稻田土壤温室气体排放特征,通过探寻不同施肥模式下温室气体排放强度,为综合减缓农业领域温室气体减排提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

大田试验于2012年3月至2013年7月在广州市白云区钟落潭镇进行。该地区属于亚热带海洋性季风气候,全年平均气温22.5℃,年温差15~17℃,年平均降水量1517 mm,年平均相对湿度77%。土壤基本理化性质为有机质24.2 g·kg<sup>-1</sup>,pH 5.3,碱解氮116.9 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷44 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾43.8 mg·kg<sup>-1</sup>。当地水稻种植模式为稻-稻连作种植体系,供试水稻品种为粤晶丝苗,试验设置4个处理,分别为:控释BB肥(CBB),其中控释氮与速效氮比例为1:2,控释尿素由加阳公司提供;稳定性氮肥&甲烷抑制剂(SN),其中甲烷抑制剂为腐植酸与Agrotain(美国KOCH公司提供);专用肥&有机肥(SM),化肥氮与有机氮按85%和15%比例施用,其中专用肥为水稻专用肥(广州新农科肥业公司生产);农民习惯施肥(FP),碳铵(35%N)作基肥,尿素(65%N)分3次作返青肥、分蘖肥和孕穗肥施入。小区面积20 m<sup>2</sup>,小区田埂采用覆膜覆盖以避免小区间串水串肥,随机区组排列,3次重复。各处理氮肥用量均为150 kg N·hm<sup>-2</sup>,磷、钾肥分别为过磷酸钙和氯化钾,用量一致,分别为45 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>和127.5 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>,其中CBB和SN处理氮磷钾肥全部基施,SM和FP处理氮肥按0.35:0.15:0.3:0.2基施及3次追施的比例施入,磷肥全部基施,钾肥基追各半施入。

### 1.2 样品采集与测定

气体的收集采用静态箱法,收集装置为有机玻璃制造,其长宽高分别为400 mm×400 mm×1000 mm,装置一面安有三通阀,其对应面装有一个12 V风扇。收集气体时开启风扇,分别于罩箱后0、15、30、45 min

用医用注射器收集60 mL气体于真空气袋中,随即带回实验室进行分析测定。气体样品采集频率通常为氮肥施用后3~4 d采样1次,其余每7~10 d采样1次。采气时间一般为上午8:30—12:00,采气的同时记录每小区箱内温度、大气温度、5 cm土温及每个小区的水层深度。收集的气体采用意大利产Trace GC2000气相色谱仪进行分析测定,柱温为80℃,FID检测器和ECD检测器温度均为300℃,载气为高纯氮气(99.99%)。

### 1.3 数据统计与分析

CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量计算公式如下<sup>[11]</sup>:

$$F = \rho h \times (d_t/d_i) \times [273 / (273 + T) \times (p/p_0)]$$

式中: $F$ 为CH<sub>4</sub>或N<sub>2</sub>O的排放通量; $\rho$ 为标准状态下的密度; $h$ 为水层表面距离箱顶的实际高度; $d_t/d_i$ 为采样过程中箱内CH<sub>4</sub>或N<sub>2</sub>O气体浓度变化率; $T$ 为采样时箱内的平均温度; $p$ 为采样箱内气压; $p_0$ 为标准大气压(该地海拔高度为30 m,气压影响较小,实际计算中忽略气压的影响)。

数据采用SAS 9.0软件和Excel 2007进行方差分析与相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 CH<sub>4</sub>排放特征

水稻生育期内降雨量和日平均气温如图1。不同季节、不同施肥模式下稻田土壤CH<sub>4</sub>排放通量差异较大(图2)。水稻生育期内CH<sub>4</sub>排放特征表现为单峰曲线,同一季水稻不同处理CH<sub>4</sub>排放峰值和排放峰出现的时间基本一致,而不同季节水稻峰值出现的时间及大小略有差异,其中早稻CH<sub>4</sub>排放峰出现的时间大概为水稻移栽30 d之后,而晚稻CH<sub>4</sub>排放峰出现的时间为水稻移栽16~23 d(分蘖期),且晚稻CH<sub>4</sub>排放峰值明显高于早稻。季季水稻各处理土壤CH<sub>4</sub>排放通量范围分别为-0.29~14.83、-6.09~31.54、-0.11~22.87 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。

### 2.2 N<sub>2</sub>O排放特征

相同氮肥用量,不同的施肥模式下稻田土壤N<sub>2</sub>O排放通量差异较大。由于2012年早稻N<sub>2</sub>O检测器故障以致数据不可用,图3主要分析了2012年晚稻和2013年早稻两季水稻N<sub>2</sub>O排放数据。如图所示,各施肥处理在2012年水稻生长周期内并未监测到明显的N<sub>2</sub>O排放峰,且N<sub>2</sub>O排放通量非常微小(痕量),甚至部分时期还出现N<sub>2</sub>O的净吸收,该现象可能受实时的水温状况所影响。在2013年早稻生育期内,CBB

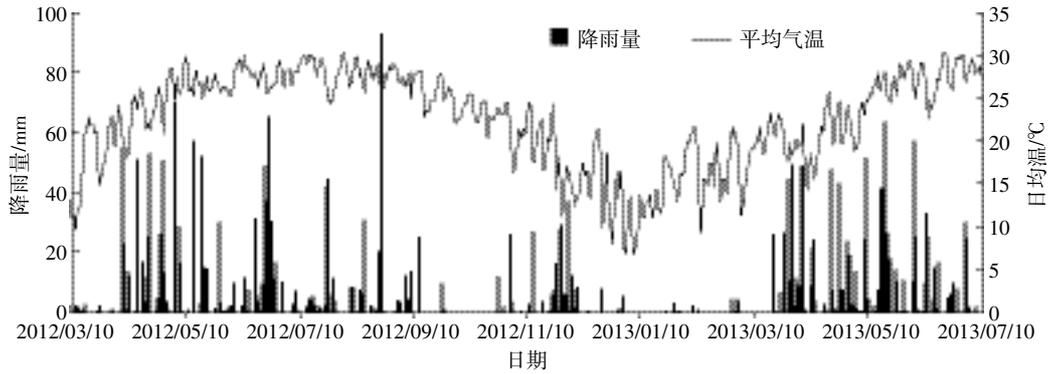
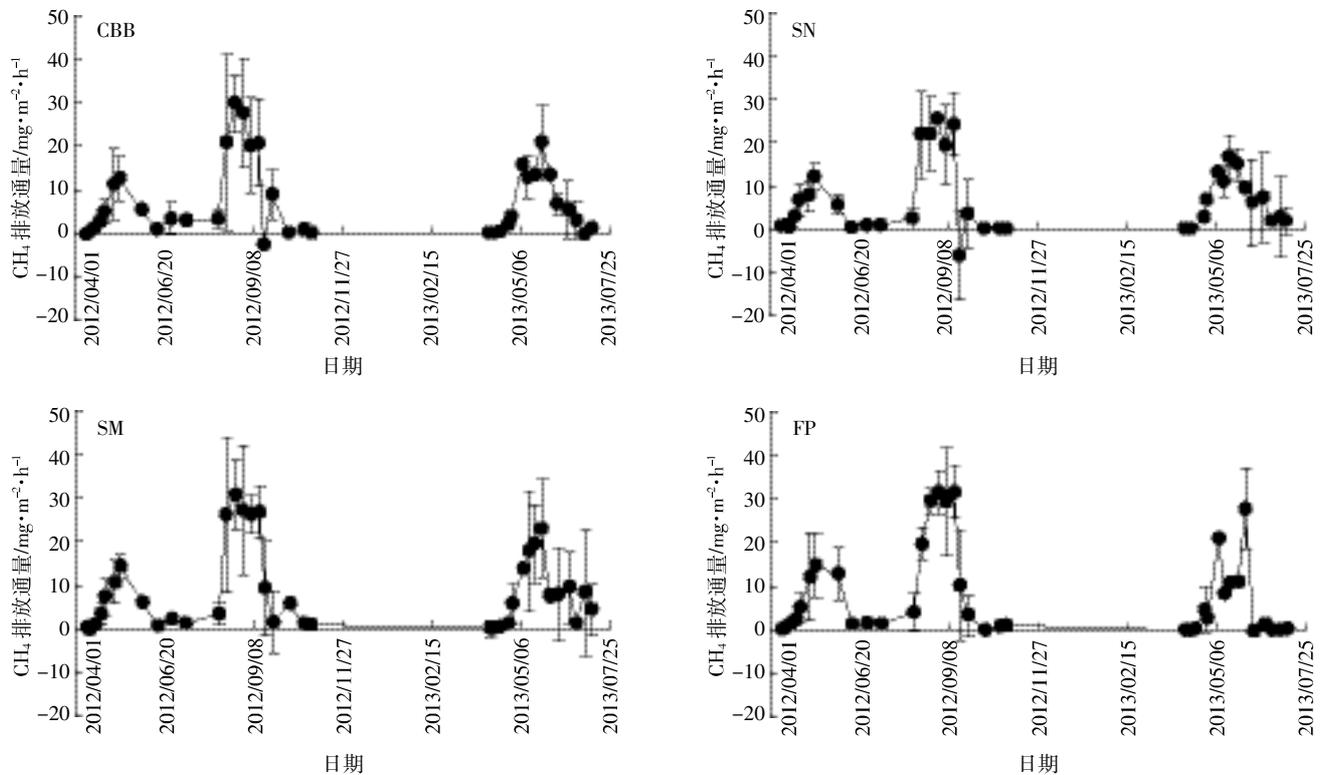


图1 水稻生长期气象数据

Figure 1 Meteorological data of experimental site during rice growing seasons

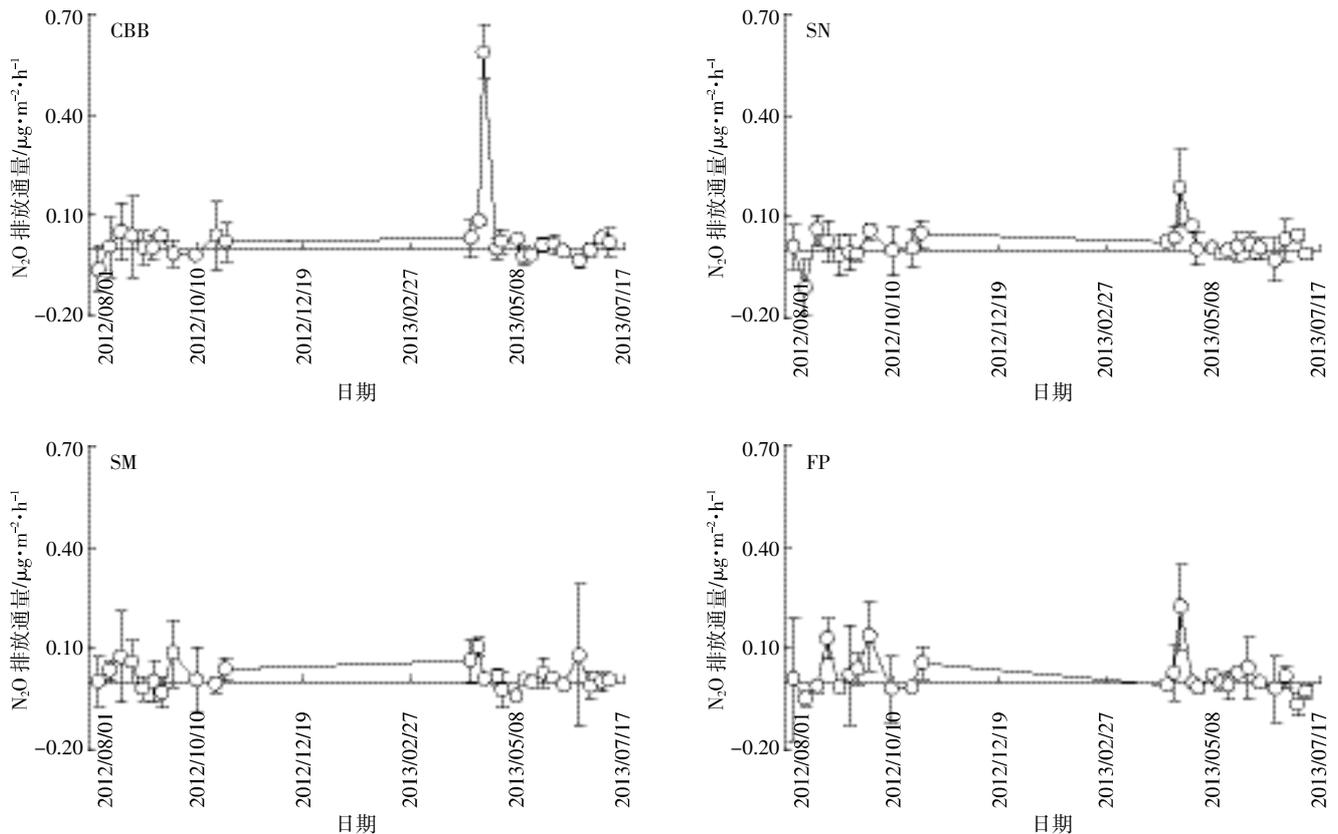
图2 不同施肥模式下稻田 CH<sub>4</sub> 季节排放动态Figure 2 Dynamics of seasonal CH<sub>4</sub> emissions from paddy field under different fertilization patterns

处理于水稻移栽后 14 d 出现一个非常明显的排放峰,其峰值为  $0.585 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,而 SN 和 FP 处理同样在水稻移栽后 14 d 时出现一个小排放峰,峰值分别为  $0.188 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $0.221 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,之后 N<sub>2</sub>O 排放急剧降低,排放几乎为零。此外,SM 处理在 2013 年早稻整个生育期内同样未观测到 N<sub>2</sub>O 排放峰。总的来说,稻田 N<sub>2</sub>O 季节排放规律不明显。

### 2.3 CH<sub>4</sub> 累积排放特征

早晚稻 CH<sub>4</sub> 累积排放规律存在一定的差异。由图 4 可知,2012 年和 2013 年早稻 CH<sub>4</sub> 累积排放趋势非

常相似,均呈“S 型”曲线。2012 年晚稻 CH<sub>4</sub> 累积排放却表现为自水稻移栽后开始直线迅速上升趋势累积增加,直至水稻分蘖盛期(水稻移栽后 37~42 d)累积排放放缓,其累积排放趋势呈“直线+平台”曲线,由此可推断晚稻 CH<sub>4</sub> 集中排放时间较早稻早,且排放速率较早稻快。分析比较四季水稻 CH<sub>4</sub> 排放数据可知,虽然处理间 CH<sub>4</sub> 累积排放规律并不完全一致,但其共同点主要体现在,与 FP 相比,四季水稻 SN 处理均能够有效降低稻田土壤 CH<sub>4</sub> 的累积排放量,且该降幅在晚稻体现更明显。

图3 不同施肥模式下稻田N<sub>2</sub>O季节排放动态Figure 3 Dynamics of seasonal N<sub>2</sub>O emissions from paddy field under different fertilization patterns

#### 2.4 N<sub>2</sub>O 累积排放特征

不同季节稻田N<sub>2</sub>O累积排放规律并不一致(图5)。早稻N<sub>2</sub>O排放主要集中在水稻生长前期(水稻移栽22 d),随后各处理N<sub>2</sub>O排放几乎为零,而晚稻N<sub>2</sub>O累积排放则随着生育进程的推进,逐渐缓慢增加。这一现象与稻田CH<sub>4</sub>累积排放规律恰相反。尽管稻田N<sub>2</sub>O排放量非常微小,但不同施肥处理间N<sub>2</sub>O累积排放仍存在着一定的差异性,且早、晚稻规律不一致。

#### 2.5 不同施肥模式下产量、CH<sub>4</sub>与N<sub>2</sub>O总排放特征

相同氮肥用量条件下,各处理水稻籽粒产量较FP处理差异不显著(表1)。由三季水稻季节温室气体排放总量和全球增温潜势可知,各处理CH<sub>4</sub>季节排放总量范围为91~277 kg·hm<sup>-2</sup>,且均以SN处理CH<sub>4</sub>季节排放总量最低,与FP处理相比,SN处理均能大幅降低CH<sub>4</sub>季节排放总量,降幅分别为34.1%、28.4%和7.7%,而两季水稻各处理N<sub>2</sub>O季节排放总量范围为0.200~0.978 kg·hm<sup>-2</sup>。由此可知,稻田以N<sub>2</sub>O-N形式损失的氮为0.13%~0.65%,且各处理之间N<sub>2</sub>O排放量规律不明显。分析计算单位籽粒产量CH<sub>4</sub>与N<sub>2</sub>O的增温潜势表明,两季水稻各处理仍以SN处理增温

潜势值较低。较FP处理相比,单位产量pGWP分别降低了31.0%和17.8%。此外,由该表数据可知,在华南稻-稻连作条件下,CH<sub>4</sub>气体是全球增温潜势占主导的贡献气体,其贡献率达97.3%。在本试验条件下,N<sub>2</sub>O对全球增温潜势的贡献是相当有限的。

#### 2.6 温度、水深与稻田CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放的相关性分析

稻田土壤CH<sub>4</sub>与N<sub>2</sub>O气体的排放受诸多因素的影响,主要可以概括为气候因素、土壤因素和人为因素。本试验条件下,三季水稻两种温室气体数据表明,箱内温度与稻田水深的变化对土壤CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放存在一定的影响(表2)。在水稻生长的适宜环境条件下,箱内温度和稻田水深与稻田CH<sub>4</sub>的排放均呈极显著线性正相关关系。温度和水层深度对N<sub>2</sub>O排放的影响则与CH<sub>4</sub>不一致,温度与N<sub>2</sub>O排放之间呈极显著负相关关系,而水层深度对N<sub>2</sub>O气体的排放影响差异未达显著水平。

### 3 讨论

水稻生产是我国乃至世界上最重要的粮食生产之一,稻田是CH<sub>4</sub>与N<sub>2</sub>O的一个重要来源。影响稻田

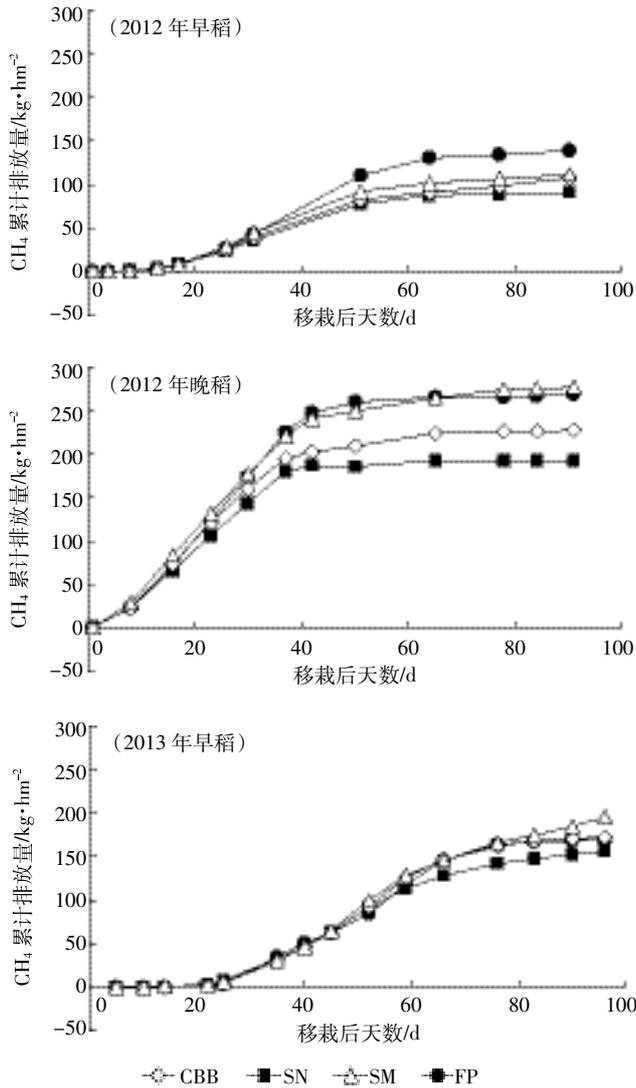


图4 不同施肥模式下水稻CH<sub>4</sub>累积排放情况

Figure 4 Cumulative CH<sub>4</sub> emissions from paddy field under different fertilization patterns

CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的因素有很多,其中包括土壤质地、pH、土壤水热状况、土壤及大气温度、降雨等关键自然因素和肥料施用、水管理、耕作措施、秸秆还田等一系列农田管理措施。氮肥品种是影响稻田土壤CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的一个重要因子<sup>[12]</sup>。不同肥料品种氮素的释放规律不同,控释肥具有一定的控制氮素释放的作用,同时还能显著降低反硝化作用氮素损失量<sup>[13]</sup>。有机无机肥结合施用对稻田温室气体排放及全球升温

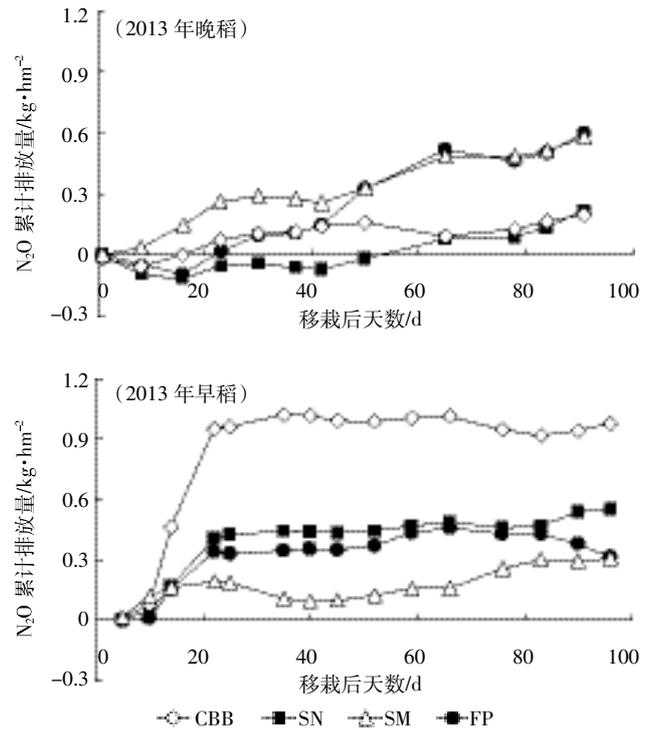


图5 不同施肥模式下N<sub>2</sub>O累积排放情况

Figure 5 Cumulative N<sub>2</sub>O emissions from paddy field under different fertilization patterns

表1 不同施肥模式下籽粒产量、CH<sub>4</sub>与N<sub>2</sub>O季节排放总量及其温室效应

Table 1 Grain yield, seasonal emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O, and greenhouse effects under different fertilization patterns

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/ t·hm <sup>-2</sup>			CH <sub>4</sub> 季节排放总量 Total seasonal CH <sub>4</sub> emission/kg·hm <sup>-2</sup>			N <sub>2</sub> O 季节排放总量 Total seasonal N <sub>2</sub> O emission/kg·hm <sup>-2</sup>			单位产量全球增温潜势 Yield-scaled pGWP/kg CO <sub>2</sub> eq·t <sup>-1</sup> grain yield		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CBB	4.3a	5.8bc	5.4ab	108	227	172	—	0.200	0.978	—	0.981	0.850
SN	4.3a	6.3ab	6.3a	91	192	155	—	0.221	0.556	—	0.772	0.641
SM	4.1a	7.1a	5.5ab	112	277	194	—	0.578	0.305	—	0.997	0.896
FP	4.3a	6.2ab	5.5ab	138	268	168	—	0.597	0.317	—	1.114	0.780
Average	4.3	6.4	5.7	112	241	171	—	0.399	0.539	—	0.966	0.780

注:图中A,B,C分别代表2012年早稻、2012年晚稻和2013年早稻。不同小写字母表示各处理差异显著(P<0.05)。1 t N<sub>2</sub>O = 298 t CO<sub>2</sub>eq, 1 t CH<sub>4</sub> = 25 t CO<sub>2</sub>eq, pGWP = (CH<sub>4</sub>×25)+(N<sub>2</sub>O×298), 其中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O是指气体季节排放量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

Note: A, B, and C in figure represent early rice season in 2012, late rice season in 2012 and early rice season in 2013, respectively. The same below. Different letters indicate significant differences (P<0.05) between different treatments. 1 t N<sub>2</sub>O = 298 t CO<sub>2</sub>eq, 1 t CH<sub>4</sub> = 25 t CO<sub>2</sub>eq, pGWP = (CH<sub>4</sub>×25)+(N<sub>2</sub>O×298), where CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O mean the seasonal emissions of these two gases(kg·hm<sup>-2</sup>).

表2 温度和水深与稻田CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放的相关分析Table 2 Correlationship of temperature and depth of water with CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission in paddy field

气体 Gas emission	温度 Temperature			水深 Depth of water		
	R <sup>2</sup>	P	n	R <sup>2</sup>	P	n
CH <sub>4</sub> 排放通量	0.476 3**	<0.000 1	334	0.199 6**	0.000 2	336
N <sub>2</sub> O 排放通量	-0.219 1**	0.000 8	230	-0.010 4	0.874 8	230

注:\*表示P&lt;0.05,\*\*表示P&lt;0.001。

Note:\* P&lt;0.05,\*\* P&lt;0.001.

潜势效果的报道不一致<sup>[14-15]</sup>。本试验研究表明,不同氮肥类型对稻田温室气体排放的影响存在一定的差异性,主要表现为稳定性氮肥结合甲烷抑制剂处理能有效降低稻田CH<sub>4</sub>季节排放总量,而有机肥与水稻专用肥组合处理较FP处理在一定程度上提高了CH<sub>4</sub>季节排放总量,CBB处理对稻田季节CH<sub>4</sub>排放的影响规律不明显。由于稻田N<sub>2</sub>O排放的痕量性,各处理对稻田N<sub>2</sub>O季节排放总量的影响具有一定的不确定性,这可能主要与华南地区降雨较频繁,稻田对人为灌溉的需求相对较少,土壤大多处于淹水湿润状态有关,或是由于本试验监测的不连续性而导致N<sub>2</sub>O排放高峰被错失。为准确估算土壤温室气体排放量还有待进一步的研究和完善,通过增加观测点和延长观测时间来消除温室气体排放的时间和空间变异性<sup>[16]</sup>。

目前,气候变暖已成为一个典型的全球尺度的环境问题,该问题直接涉及全球经济发展、能源利用甚至政治利益,正成为21世纪全球发展的一个重大国际问题,因此科学家对农业生态系统中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O气体产生机制、排放特征、影响因子,尤其对其减排调控措施的相关研究越来越多。Khalil等<sup>[17]</sup>研究指出,大颗粒尿素深施,结合使用尿酶抑制剂和硝化抑制剂能够有效减缓由尿素引发的温室气体氮的排放。适宜的氮肥管理(包括正确的氮源、氮肥施用量、施用时间及施用位点)倍受研究者的提倡,同时通过结合适宜的种植和耕作制度实现农业生态与环境发展目标<sup>[18]</sup>。近年来大量研究还表明,生物炭能够在某种程度上改变微生物群体的成分和活性,改善作物生产力和改良土壤,减少N<sub>2</sub>O的排放,是缓解全球变暖的一个重要策略<sup>[19-20]</sup>。本文稳定性氮肥结合甲烷抑制剂处理能够有效降低双季稻田CH<sub>4</sub>的排放,但对N<sub>2</sub>O的影响不是很明显,可能主要受甲烷抑制剂的调控。值得一提的是,由本试验研究结果可知,CH<sub>4</sub>气体是稻田土壤生产的最重要的温室气体,它对稻田全球增温潜势的贡献远大于N<sub>2</sub>O气体,其对稻田全球增温潜势的贡献率

约为97.3%,该研究结论与前人报道一致<sup>[21]</sup>。

此外,前人相关研究表明温度和水深是影响温室气体排放的重要因素<sup>[22-23]</sup>,但温度和水层深度对不同温室气体排放的影响存在一些不确定性<sup>[24-25]</sup>。Song等<sup>[26]</sup>研究表明,N<sub>2</sub>O排放水平与水深呈正相关关系,水层深度极大地影响了N<sub>2</sub>O排放的年际变化。又有研究报道<sup>[27]</sup>,温度的升高能够促使CH<sub>4</sub>排放显著增加,但N<sub>2</sub>O排放并未增加,该结果与本试验研究结果一致,而N<sub>2</sub>O排放则随水位波动而显著增加。本试验研究结果表明箱内温度和稻田水层深度与稻田CH<sub>4</sub>的排放呈极显著正相关关系,而温度与N<sub>2</sub>O排放的关系则表现为二者呈极显著负相关关系,稻田水层深度与N<sub>2</sub>O气体排放无显著相关关系。然而,又有研究认为CH<sub>4</sub>与温度的相关性比较差,N<sub>2</sub>O与土壤温度相关性较好<sup>[28]</sup>。为此,笔者认为,撇开土壤利用类型仅考虑温室气体与温度、土壤水深或湿度的关系是没有最终定论的,也没有实质性的意义。

#### 4 结论

综上所述可知,华南双季稻田土壤温室气体以CH<sub>4</sub>排放为主并呈现很好的季节排放规律,N<sub>2</sub>O的排放非常痕量,且排放规律不明显。与农民习惯性施肥处理相比,在产量不降低的前提下,稳定性氮肥结合甲烷抑制剂的施用能有效降低稻田温室气体的排放,降低稻田全球增温潜势,从而在一定程度上提高了环境效益和社会效益。因此,结合当地水热条件与温室气体的关系,该施肥模式可作为该区域稻田温室气体减排的一项重要措施。

#### 参考文献:

- [1] IPCC 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al(Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [2] IPCC. Climate Change 2007 (AR4)[EB/OL].[2014-7-23]. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml#1](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#1)
- [3] 蔡祖聪,徐华,马静. 稻田生态系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009:1-8.  
CAI Zu-cong, XU Hua, MA Jing. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission in paddy field ecosystem[M]. Hefei: Press of University of Science & Technology of China, 2009:1-8.
- [4] The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2012. WMO Greenhouse Gas Bulletin [EB/OL]. [2014-7-23]. <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/GHGBul->

- letin. html.
- [5] Guo J P, Zhou C D. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2-4):270-277.
- [6] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, et al. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, and lakes in China; Synthesis and new estimate[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1):19-32.
- [7] Wang Y Y, Zhu B, Wang Y Q, et al. N<sub>2</sub>O emission from paddy field under different rice planting modes[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, 11(4):989-996.
- [8] Yao Z S, Zheng X H, Dong H B, et al. A 3-year record of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a sandy loam paddy during rice seasons as affected by different nitrogen application rates[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 152:1-9.
- [9] Wang J Y, Jia J X, Xiong Z Q, et al. Water regime-nitrogen fertilizer-straw incorporation interaction; Field study on nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Nanjing, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141(3-4):437-446.
- [10] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4):469-475.
- [11] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: A case study on the rice-based agro-ecosystem in southeast China[J]. *Chemosphere Global Change Science*, 2000, 2(2):207-224.
- [12] Burger M, Venterea T R. Effects of nitrogen fertilizer types on nitrous oxide emissions[M]. *Understanding Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Management*, 2011, Chapter 11:179-202.
- [13] 丁洪, 王跃思, 秦胜金, 等. 控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5):1015-1019.  
DING Hong, WANG Yue-si, QIN Sheng-jin, et al. Effects of controlled release fertilizers on nitrogen loss by denitrification and N<sub>2</sub>O emission [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):1015-1019.
- [14] 周鹏, 李玉娥, 刘利民, 等. 施肥处理和环境因素对华北平原春玉米田 N<sub>2</sub>O 排放的影响: 以山西晋中为例[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(2):179-184.  
ZHOU Peng, LI Yu-e, LIU Li-min, et al. Effects of fertilization and environment factors on N<sub>2</sub>O emission in spring corn field in North China plain: A case study of Jinzhong in Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(2):179-184.
- [15] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6):2196-2210.
- [16] 高志岭, 陈新平, 张福锁, 等. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的连续自动测定方法[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1):64-70.  
GAO Zhi-ling, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo, et al. Continuous-automatic method for measuring N<sub>2</sub>O emission from agricultural soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1):64-70.
- [17] Khalil M I. Physical and chemical manipulation of urea fertiliser for reducing the emission of gaseous nitrogen species[R]. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, 2010:195-198.
- [18] Mikkelsen R L. Fertilizer nitrogen management to reduce nitrous oxide emissions in the U. S[M]. *Understanding Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Management*, chapter 8:135-147.
- [19] Castaldi S, Riondino M, Baronti S, et al. Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(9):1464-1471.
- [20] Harter J, Krause H M, Schuetzler S, et al. Linking N<sub>2</sub>O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community[J]. *International Society for Microbial Ecology*, 2014, 8(3):660-674.
- [21] Cimélio B, Falberni de S C, Gabriel M P, et al. Yield-scaled greenhouse gas emissions from flood irrigated rice under long-term conventional tillage and no-till systems in a Humid subtropical climate[J]. *Field Crops Research*, 2014, 162:60-69.
- [22] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. *土壤*, 2012, 44(6):881-887.  
CAI Yan-jiang, DING Wei-xin, XIANG Jian. Factors controlling N<sub>2</sub>O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: A review[J]. *Soil*, 2012, 44(6):881-887.
- [23] 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(3):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(3):7-12.
- [24] 李道西. 农田水管理下的稻田甲烷排放研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1):133-135.  
LI Dao-xi. Variations of methane emission of paddy fields under farmland water management[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1):133-135
- [25] Lindau C W, Alford D P, Bollich P K, et al. Inhibition of methane evolution by calcium sulfate addition to flooded rice[J]. *Plant and Soil*, 1994, 158(2):299-301.
- [26] Song C C, Zhang J B, Wang Y Y, et al. Emission of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from freshwater marsh in Northeast of China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(3):428-436.
- [27] Jansen E. The effects of land use, temperature and water level fluctuations on the emission of nitrous oxide(N<sub>2</sub>O), carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) and methane(CH<sub>4</sub>) from organic soil cores in Iceland[D]. Reykjavik: University of Iceland, School of Engineering and Natural Science, 2008.
- [28] Yan Y P, Sha L Q, Cao M, et al. Fluxes of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from soil under a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(2):207-215.