

周 炜, 张岳芳, 朱普平, 等. 种植制度对长江下游稻田温室气体排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 340-345.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.02.016

种植制度对长江下游稻田温室气体排放的影响

周 炜, 张岳芳, 朱普平, 盛 婧, 陈留根, 郑建初

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/江苏省农业科学院循环农业研究中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了精确估算稻田温室气体排放量以及为制定合理的减排措施提供数据, 在江苏省苏州市进行了 5 年田间定位试验, 设计水稻-休闲(T_1)、水稻-黑麦草(T_2)、水稻-紫云英(T_3)、水稻-小麦(T_4)和水稻-油菜(T_5)等 5 种植制度, 采用静态箱-气相色谱法研究了不同种植制度下稻田温室气体甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)排放及其温室效应。结果表明: 不同种植制度对稻季、非稻季以及周年的 CH_4 和 N_2O 排放以及总增温潜势均有极显著影响; 周年 CH_4 总排放量表现为 $T_3(294.97 \text{ kg/hm}^2) > T_1(151.04 \text{ kg/hm}^2) > T_5(123.89 \text{ kg/hm}^2) > T_4(119.33 \text{ kg/hm}^2) > T_2(111.92 \text{ kg/hm}^2)$; 周年 N_2O 排放总量表现为 $T_5(3.26 \text{ kg/hm}^2) > T_4(2.56 \text{ kg/hm}^2) > T_2(2.33 \text{ kg/hm}^2) > T_3(2.26 \text{ kg/hm}^2) > T_1(1.42 \text{ kg/hm}^2)$; 不同种植制度处理周年排放的 CH_4 和 N_2O 所产生的总增温潜势以 $T_3(8857 \text{ kg/hm}^2)$ 为最高, 显著高于其他处理。可见, 采用水稻-紫云英种植制度会明显增加长江下游稻田甲烷排放和温室效应。

关键词: 种植制度; 稻田; 温室气体; 排放

中图分类号: S181 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2017)02-0340-06

Effects of different cropping patterns on greenhouse gases emissions from rice fields in the lower reaches of Yangtze River

ZHOU Wei, ZHANG Yue-fang, ZHU Pu-ping, SHEN Jing, CHEN Liu-gen, ZHENG Jian-chu

(Institute of Agricultural Resources and Environment / Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: A five-year field experiment was carried out in Suzhou, Jiangsu province to draw on the benefits of scientific evaluation of emissions of greenhouse gases (GHGs) and provide scientific instructions to develop rational measures for reducing GHGs emission from rice fields in the lower reaches of Yangtze River. By using static chamber/gas chromatographic techniques, this experiment was simultaneously measured for CH_4 and N_2O emissions under five rice-based cropping patterns: rice-fallow (T_1), rice-ryegrass (T_2), rice-Chinese milk vetch (T_3), rice-wheat (T_4), and rice-rape (T_5). The results showed that the total CH_4 and N_2O emissions and global warming potentials (GWPs) in rice growing season, non-rice growing season and whole annual cycle were significantly influenced by cropping patterns. Annual total CH_4 emissions under different cropping patterns were: $T_3(294.97 \text{ kg/hm}^2) > T_1(151.04 \text{ kg/hm}^2) > T_5(123.89 \text{ kg/hm}^2) > T_4(119.33 \text{ kg/hm}^2) > T_2(111.92 \text{ kg/hm}^2)$. Annual total N_2O emissions under different cropping patterns followed the order of $T_5(3.26 \text{ kg/hm}^2) > T_4(2.56 \text{ kg/hm}^2) > T_2(2.33 \text{ kg/hm}^2) > T_3(2.26 \text{ kg/hm}^2) > T_1(1.42 \text{ kg/hm}^2)$. Annual GWPs of CH_4 and N_2O were significantly higher in $T_3(8857 \text{ kg/hm}^2)$ than those in T_1 , T_5 , T_4 and T_2 . These results indicate that rice-ryegrass could increase CH_4 emissions and intensify the greenhouse effects in rice fields in the lower reaches of Yangtze River.

Key words: cropping pattern; paddy field; greenhouse gas; emission

收稿日期: 2015-06-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B12); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503122)

作者简介: 周 炜(1982-), 男, 江苏无锡人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业生态与农作制度研究。(Tel)025-84390192

通讯作者: 张岳芳, (E-mail) yfzhang@jaas.ac.cn

全球气候变暖与大气中温室气体浓度的不断上升有着密切的关系。甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是仅次于二氧化碳(CO_2)的重要痕量温室气体^[1],对温室效应的贡献率分别约为 15.0%和 6.0%^[2],并以每年 0.6%和 0.2%~0.3%的速率增长^[3]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报道,2005 年全球农业生产排放到大气中的 CH_4 和 N_2O 分别约占全球人为排放总量的 50.0%和 60.0%,稻田是大气 CH_4 和 N_2O 的主要生物排放源之一^[4]。在中国,23%的耕地用于种植水稻,水稻种植面积约占世界水稻总种植面积的 20.0%^[5]。因此,正确估算 CH_4 和 N_2O 的排放量,深入研究中国稻田 CH_4 和 N_2O 的排放规律以及减排措施,对缓解全球增温效应有着非常重要的意义^[6]。

已有研究结果表明,农业管理措施例如种植制度等是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的重要因素^[7]。卢维盛等^[8]、胡立峰等^[9]、唐海明等^[10]对广东和湖南地区的双季稻田不同种植制度下的 CH_4 和 N_2O 排放进行了比较研究;江长胜等^[11]研究了种植制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响;黄太庆等^[12]研究了不同种植制度下稻田旱作季节 CH_4 和 N_2O 排放;熊正琴等^[13]、陈书涛等^[14]比较了旱地、稻田的 N_2O 排放。但目前有关长江下游水旱轮作区不同种植制度下稻田 CH_4 和 N_2O 排放的研究相对较少,尤其缺乏周年温室气体排放的报道。为此,我们拟通过定位试验比较研究水稻-休闲、水稻-黑麦草、水稻-紫云英、水稻-小麦和水稻-油菜等 5 种植制度下稻田 CH_4 和 N_2O 的排放及其温室效应,以期为中国稻田温室气体排放的精确估算及合理减排措施的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在江苏省苏州市现代农业(水稻)示范区($31^\circ33'\text{N}$, $120^\circ37'\text{E}$)进行,区域内年均降雨 1 042 mm,日照 2 130 h,太阳辐射 $4.94 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$,无霜期 242 d。定位试验始于 2007 年 11 月,试验土壤类型属乌栅土,试验前 0~20 cm 耕层土壤有机质含量 32.8 g/kg,全氮 1.9 g/kg,速效氮 110.7 mg/kg,速效磷 6.9 mg/kg,速效钾 100.3 mg/kg, pH 6.4,土壤容质

量 1.2 g/cm^3 。

试验稻田设水稻-休闲(T_1)、水稻-黑麦草(T_2)、水稻-紫云英(T_3)、水稻-小麦(T_4)和水稻-油菜(T_5)共 5 个处理,3 次重复,小区面积 30 m^2 。稻季供试品种为常优 1 号,在土壤耕作前,将水稻-小麦和水稻-油菜处理的小麦和油菜秸秆移走(自然留茬约 10 cm),水稻-紫云英处理的紫云英全量还田,水稻-休闲处理的杂草直接旋耕入田。水稻 2013 年 5 月 25 日播种,6 月 13 日移栽(移栽规格为行距 30.0 cm、株距 13.3 cm,每穴 2 苗),11 月 6 日收获。氮肥(尿素,以 N 计)、磷肥(过磷酸钙,以 P_2O_5 计)和钾肥(氯化钾,以 K_2O 计)用量分别为 240 kg/hm^2 、 120 kg/hm^2 、 120 kg/hm^2 ,氮肥按基肥:分蘖肥:长粗肥:穗肥=4:3:2:1 施用,磷肥一次性基施,钾肥作基肥和长粗肥等量施用。供试紫云英、黑麦草、小麦和油菜品种分别为余江大叶、特高、扬麦 14 号和苏油 1 号。在整个非水稻季,休闲和紫云英处理不施肥,黑麦草共施氮肥(以 N 计)、磷肥(以 P_2O_5 计)和钾肥(以 K_2O 计)分别为 165 kg/hm^2 、 60 kg/hm^2 、 60 kg/hm^2 ,氮肥 105 kg/hm^2 作基肥,磷钾肥全部基施,黑麦草刈割后追施氮肥 60 kg/hm^2 。小麦和油菜施肥量相同,均为 N 210 kg/hm^2 、 P_2O_5 90 kg/hm^2 和 K_2O 90 kg/hm^2 ,小麦氮肥按基肥:拔节肥:孕穗肥=4:3:3 施用,磷肥一次性基施,钾肥作基肥和拔节肥等量施用;油菜氮肥按基肥:越冬肥:薹肥=5:2:3 施用,磷肥一次性基施,钾肥作基肥和薹肥等量施用。各处理稻季水分管理采用前期浅水、中期烤田、后期干湿交替的灌水模式,非稻季无灌水,其他田间管理措施参照当地一般高产大田。

1.2 CH_4 和 N_2O 采集与分析

于 2013 年 6 月至 2014 年 6 月进行稻田温室气体 CH_4 和 N_2O 排放的观测。采用静态箱法测定,采样箱(购自中国科学院南京土壤研究所)由 PVC 材质制成,底横截面积为 0.25 m^2 ($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$),箱体高度随作物高度而增加(拔节前 0.5 m、拔节后 1.2 m),外部包有海绵和铝箔纸,防止太阳照射导致箱内温度变化过大。每小区固定采样底座 3 个,底座上部有 5 cm 深的凹槽,测定时加水密封,采样箱内顶部装有 12 V 小风扇以充分混匀箱内气体,每隔 10 min 采一次样,共 4 次,抽出混匀的 50 ml 气体

保存于气体采集袋后迅速带回实验室分析。水稻季自移栽后第 3 d 起每周采气 2 次,烤田期间 2 d 1 次,抽穗后每周 1 次,非水稻季每周采气 1 次(春节假日除外),采样时间在上午 8:00–10:00。 CH_4 和 N_2O 气体浓度由经改装的 Agilent 7890A 气相色谱测定, CH_4 检测器为 FID,检测温度 300 °C,柱温 60 °C,载气为 99.999% 高纯氮气,流速 30 ml/min; N_2O 检测器为 ECD,检测温度 300 °C,柱温 60 °C,载气为 99.999% 高纯氩甲烷气(95% 氩气+5% 甲烷),流速 40 ml/min。气体排放通量计算公式为: $F = \rho \cdot h \cdot (dc/dt) \cdot 273 / (273 + T)^{[15]}$,式中 F 为气体排放通量 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 或 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], ρ 为标准状态下气体的密度 (kg/m^3), h 是采样箱的净高度 (m), dc/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率,273 为气态方程常数, T 为采样过程中采样箱内的平均温度 (°C)。

根据 CH_4 和 N_2O 在 100 年尺度上的全球增温潜势 (Global warming potential, GWP) 分别为 CO_2 的 28 和 265 倍^[1],计算不同处理排放 CH_4 和 N_2O 产生的综合温室效应 (GWPs, kg/hm^2 , 以 CO_2 当量计): $\text{GWP} = \text{CH}_4 \text{排放量} \times 28 + \text{N}_2\text{O} \text{排放量} \times 265$ 。

1.3 统计分析方法

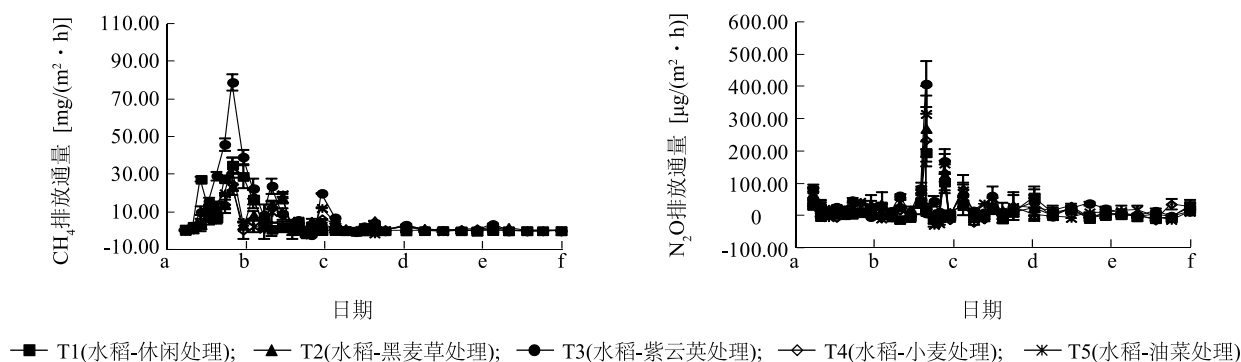
试验数据处理和作图采用 Microsoft Excel for

Windows 2007 完成,试验结果均以每次测得的 3 次重复的平均值和标准差来表示,用 SPSS 11.5 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 种植制度对稻季温室气体排放的影响

由图 1 可见,不同种植制度处理水稻生长期间 CH_4 排放通量呈现先升高后降低的变化趋势。水稻移栽后采用浅水灌溉,稻田土壤处于淹水状态, CH_4 排放通量不断增加,各处理在水稻移栽后 20 d (7 月 4 日) 出现排放峰值,排放通量为 23.58~78.87 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;在水稻生长中期采用烤田措施后,所有处理的 CH_4 排放非常微弱,烤田结束复水之后各处理 CH_4 排放通量始终维持较低水平直至水稻收获。种植制度对稻季 CH_4 总排放量有极显著影响,稻季 CH_4 总排放量大小顺序为水稻-紫云英处理>水稻-休闲处理>水稻-油菜处理>水稻-小麦处理>水稻-黑麦草处理,排放量依次为 294.76 kg/hm^2 、150.93 kg/hm^2 、122.90 kg/hm^2 、118.47 kg/hm^2 和 111.28 kg/hm^2 (表 1)。水稻-紫云英处理的 CH_4 总排放量显著高于水稻-休闲处理,但均显著高于其他处理,水稻-油菜、水稻-小麦、水稻-黑麦草处理间稻季 CH_4 总排放量无显著差异。



a: 2013-06-10; b: 2013-07-10; c: 2013-08-09; d: 2013-09-08; e: 2013-10-08; f: 2013-11-07。

图 1 不同种植制度处理稻季 CH_4 和 N_2O 排放通量的季节变化

Fig.1 The seasonal variation of CH_4 and N_2O fluxes during rice growing season under different cropping patterns

不同种植制度下水稻生长期间 N_2O 排放通量呈现明显的季节变化 (图 1)。水稻移栽至烤田前,田间处于淹水状态,各处理 N_2O 排放微弱,而稻季中期的烤田措施导致 N_2O 大量排放,各处理在 7 月

29 日达到排放通量的最大值,排放通量为 194.68~408.16 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,8 月 6 日田间复水后直至水稻收获 N_2O 排放均维持较低水平。种植制度对水稻生长季 N_2O 总排放量有极显著影响,以水稻-紫云

英处理的 N_2O 总排放量为最高,达 1.65 kg/hm^2 ,显著高于其他处理(表 1),其次为水稻-油菜(1.18 kg/hm^2)、水稻-小麦(1.07 kg/hm^2)、水稻-黑麦草

(1.01 kg/hm^2),均显著高于水稻-休闲处理(0.79 kg/hm^2)。

表 1 不同种植制度下稻田 CH_4 和 N_2O 总排放量及其全球增温潜势

Table 1 CH_4 and N_2O total emissions and their global warming potential (GWPs) affected by different cropping patterns

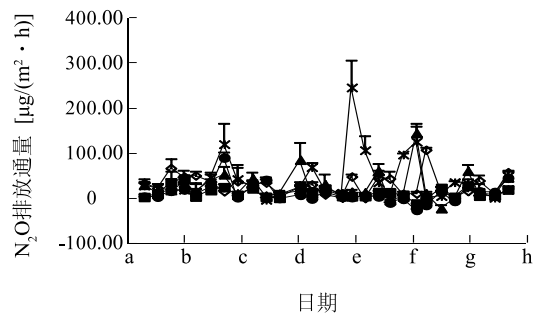
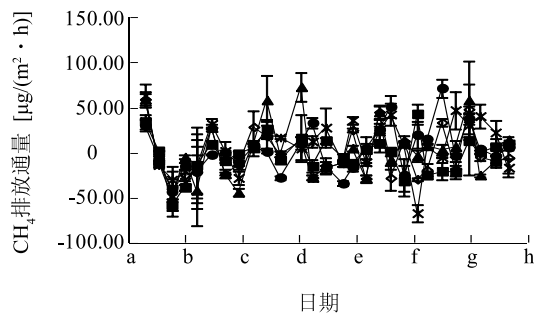
处理	CH_4 总排放量 (kg/hm^2)			N_2O 总排放量 (kg/hm^2)			全球增温潜势 (kg/hm^2)		
	稻季	非稻季	周年	稻季	非稻季	周年	稻季	非稻季	周年
T ₁	150.93b	0.12d	151.05b	0.79c	0.63c	1.42c	4 435b	171c	4 606b
T ₂	111.28c	0.64b	111.92c	1.01b	1.32b	2.33b	3 384c	367b	3 751c
T ₃	294.76a	0.20c	294.96a	1.65a	0.61c	2.26b	8 690a	166c	8 856a
T ₄	118.47c	0.86a	119.33c	1.07b	1.49b	2.56b	3 601c	418b	4 019bc
T ₅	122.90c	0.98a	123.88c	1.18b	2.08a	3.26a	3 755c	578a	4 333b

各处理见图 1 注。同一列不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

2.2 种植制度对非稻季温室气体排放的影响

图 2 显示,不同种植制度下非稻季 CH_4 排放无明显规律,仅在 11 月中下旬采样观测初期 CH_4 排放有一个逐渐减少的过程,这可能与水稻收获后土壤含水量降低有关。稻田非稻季 CH_4 排放通量很低,并且多次出现负值,排放通量在 $-66.14 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 至 $73.46 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 之间。不同种植

制度对非稻季 CH_4 季节总排放量存在极显著影响,以水稻-油菜(0.98 kg/hm^2)、水稻-小麦(0.86 kg/hm^2)处理非稻季 CH_4 总排放量较大,显著高于其他处理,水稻-黑麦草(0.64 kg/hm^2)、水稻-紫云英(0.20 kg/hm^2)、水稻-休闲(0.12 kg/hm^2)处理间存在显著差异(表 1)。



—■— T1(水稻-休闲处理); —▲— T2(水稻-黑麦草处理); —●— T3(水稻-紫云英处理); —◇— T4(水稻-小麦处理); —*— T5(水稻-油菜处理)

a; 2013-11-10; b; 2013-12-10; c; 2014-01-09; d; 2014-02-08; e; 2014-03-10; f; 2014-04-09; g; 2014-05-09; h; 2014-06-08。

图 2 不同种植制度处理非稻季 CH_4 和 N_2O 排放通量的季节变化

Fig.2 The seasonal variation of CH_4 and N_2O fluxes during non-rice growing season under different cropping patterns

不同种植制度下非稻季 N_2O 排放通量季节变化存在差异(图 2)。施肥和降水对 N_2O 排放高峰的出现影响较大,不施氮肥的水稻-休闲和水稻-紫云英处理 N_2O 排放均维持较低水平,排放通量在 $-25.00 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 至 $90.65 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 之间,无 N_2O 排放高峰出现;水稻-黑麦草处理在 2014 年 4

月 10 日出现一个 N_2O 排放高峰,可能是 3 月下旬黑麦草第一次刈割完追施尿素后降雨的结果;水稻-小麦处理在 2014 年 4 月 15 日出现一个 N_2O 排放高峰,可能与 4 月上旬小麦施用孕穗肥后降雨有关系;水稻-油菜处理在 2014 年 3 月 7 日出现一个明显的 N_2O 排放高峰,可能与油菜施用薹花肥有关。从表

1 可以看出,非稻季 N_2O 总排放量大小顺序为:水稻-油菜(2.08 kg/hm^2)>水稻-小麦(1.49 kg/hm^2)>水稻-黑麦草(1.32 kg/hm^2)>水稻-休闲(0.63 kg/hm^2)>水稻-紫云英(0.61 kg/hm^2),非稻季 N_2O 总排放量水稻-油菜处理显著大于其他处理,水稻-小麦和水稻-黑麦草处理间差异不大,但均显著大于水稻-休闲、水稻-紫云英处理。

2.3 稻田周年温室气体总排放量及温室效应

种植制度对稻田周年温室气体总排放量有极显著影响,表现为水稻-紫云英处理>水稻-休闲处理>水稻-油菜处理>水稻-小麦处理>水稻-黑麦草处理,排放量分别为 294.97 kg/hm^2 、 151.04 kg/hm^2 、 123.89 kg/hm^2 、 119.33 kg/hm^2 和 111.92 kg/hm^2 ,水稻-紫云英、水稻-休闲处理的周年 CH_4 总排放量显著大于其他处理(表 1),说明采用水稻-紫云英、水稻-休闲种植制度的稻田 CH_4 排放量较高。从表 1 还可以看出, CH_4 排放主要出现在稻季,占稻田周年 CH_4 总排放量的 99% 以上。不同种植制度下稻田周年 N_2O 总排放量表现为水稻-油菜(3.26 kg/hm^2)>水稻-小麦(2.56 kg/hm^2)>水稻-黑麦草(2.33 kg/hm^2)>水稻-紫云英(2.26 kg/hm^2)>水稻-休闲(1.42 kg/hm^2),水稻-油菜处理的周年 N_2O 总排放量显著大于其他处理,水稻-休闲处理显著低于其他处理。

由表 1 可见,不同种植制度处理周年排放的 CH_4 和 N_2O 所产生的全球增温潜势以水稻-紫云英处理最高,为 $8\ 857 \text{ kg/hm}^2$,显著高于其他处理,其次是水稻-休闲($4\ 607 \text{ kg/hm}^2$) 和水稻-油菜($4\ 333 \text{ kg/hm}^2$) 处理,与水稻-小麦处理($4\ 019 \text{ kg/hm}^2$) 差异不大,但显著高于水稻-黑麦草处理($3\ 751 \text{ kg/hm}^2$)。不同种植制度稻季排放温室气体所产生的总增温潜势明显高于非稻季,约占周年温室效应的 87%~98%,因此稻季是温室气体减排的重点;再从稻季温室气体组成来看,各处理稻季排放的 CH_4 对总增温潜势的贡献率明显高于 N_2O ,所占比例在 91%至 96%之间,是减排的主要对象。所以,要减少稻田周年排放温室气体所产生的温室效应,关键是减少稻季 CH_4 的排放。

3 讨 论

本试验结果表明,不同种植制度对稻田 CH_4 总

排放量具有极显著影响,这与前人^[8-12]关于种植制度影响稻田 CH_4 排放的研究结论相吻合。本试验结果同时显示长江下游水旱轮作区稻田 CH_4 排放主要是在稻季,非稻季 CH_4 排放微乎其微,基本可以忽略不计,这与之前的研究^[15-17] 结论相一致,说明减排 CH_4 主要应在稻季。本研究中水稻-紫云英处理、水稻-休闲处理的稻季 CH_4 总排放量显著高于其他种植制度处理,原因是水稻-紫云英处理中在水稻移栽前紫云英作为有机肥还田,水稻-休闲处理中在水稻移栽前杂草原位还田,均为产甲烷菌提供了大量新鲜前体基质,从而显著促进稻田 CH_4 的排放^[9,18]。因此,减少植稻前稻田有机碳源的输入是控制该地区稻季 CH_4 排放的重要手段。

研究结果显示,种植制度对稻田 N_2O 总排放量有极显著影响,这与之前对于其他种植制度的研究^[10-14] 结果一致。本研究进一步证实了稻季 N_2O 排放主要集中在烤田期间^[19-20],且 N_2O 总排放量与施氮量密切相关^[21-22]。非稻季施用氮肥的水稻-油菜、水稻-小麦和水稻-黑麦草处理的 N_2O 总排放量显著高于不施肥的水稻-紫云英和水稻-休闲处理;另外,定位试验 5 年后,非稻季作物收获后残留于土壤中的肥料氮可能会增加后茬水稻季的 N_2O 排放,造成水稻-油菜、水稻-小麦和水稻-黑麦草种植制度处理的稻季 N_2O 总排放量显著高于水稻-休闲处理,而水稻-紫云英处理稻季 N_2O 总排放量较高的原因是因为紫云英还田,豆科绿肥与化学氮肥配施增加了稻季 N_2O 排放^[23]。由此看来,减少稻田氮肥投入是 N_2O 减排的重要途径。

长江下游稻田不同种植制度下周年排放 CH_4 和 N_2O 产生的温室效应(全球增温潜势)以水稻-紫云英处理最高,显著高于其他处理,表明采用水稻-紫云英种植制度大大增加稻田周年温室效应。但无论采用哪一种种植制度,稻季排放温室气体所产生的总增温潜势均显著高于非稻季,而 CH_4 排在稻季温室效应中起着决定性作用,因而稻季 CH_4 减排是长江下游稻田生产过程中减少温室效应的关键。但本研究未考虑土壤固碳潜力和作物产量,因此,全面评价不同种植制度下长江下游稻田周年综合温室效应尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013 - The physical science basis contri-

- bution of working group I to the fifth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] LASHOF D A, AHUJA D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to the global warming [J]. *Nature*, 1990, 344 (6266): 529-531.
- [3] SIMPSON L J, EDWARDS G C, THURTELL G W. Variations in methane and nitrous oxide mixing ratios at the southern boundary of a Canadian boreal forest [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33 (7): 1141-1150.
- [4] IPCC. Climate change 2007 - Climate change 2007: Mitigation, contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] FROLKING S, LI C, BRASWELL R, et al. Short- and long-term greenhouse gas and radiative forcing impacts of changing water management in Asia rice paddies [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1180-1196.
- [6] 黄 耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26 (5): 722-732.
- [7] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363: 789-813.
- [8] 卢维盛, 张建国, 廖宗文, 等. 不同水分管理及耕作制度对广州地区稻田 CH_4 排放的影响 [J]. *华南农业大学学报*, 1997, 18 (3): 57-61.
- [9] 胡立峰, 李 琳, 陈 阜, 等. 不同耕作制度对南方稻田甲烷排放的影响 [J]. *生态环境*, 2006, 15(6): 1216-1219.
- [10] 唐海明, 肖小平, 帅细强, 等. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32 (5): 1481-1489.
- [11] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2006, 27 (2): 207-213.
- [12] 黄太庆, 马煜春, 熊正琴, 等. 不同种植制度对稻田旱作季节 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26 (6): 519-523.
- [13] 熊正琴, 邢光熹, 施书莲, 等. 轮作制度对水稻生长季节稻田氧化亚氮排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1761-1764.
- [14] 陈书涛, 黄 耀, 郑循华, 等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2053-2060.
- [15] 蔡祖聪, 徐 华, 马 静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [16] 张岳芳, 陈留根, 朱普平, 等. 秸秆还田对稻麦两熟高产农田净增温潜势影响的初步研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (8): 1647-1653.
- [17] SHANG Q, YANG X, GAO C, 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.
- [18] 张广斌, 马二登, 张晓艳, 等. 冬季秸秆还田和土地管理对水稻生长期 CH_4 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (12): 2501-2505.
- [19] 徐 华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N_2O 排放的影响 [J]. *土壤学报*, 2000, 37(4): 499-505.
- [20] 黄树辉, 吕 军, 曾光辉. 水稻烤田期间 N_2O 排放及其影响因素 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24(6): 1084-1090.
- [21] XING G X, ZHAO X, XIONG Z Q, et al. Nitrous oxide emission from paddy fields in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (1): 45-50.
- [22] LIU S W, QIN Y M, ZOU J W, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N_2O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4): 906-913.
- [23] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 豆科绿肥和化肥氮对双季稻田氧化亚氮排放贡献的研究 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(5): 704-710.

(责任编辑: 张震林)