

水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

张岳芳^{1,2}, 郑建初^{2*}, 陈留根^{1,2}, 朱普平^{1,2}, 盛婧^{1,2}, 王子臣^{1,2}

1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省农业科学院循环农业研究中心, 江苏 南京 210014

摘要: 甲烷 (CH₄) 和氧化亚氮 (N₂O) 是仅次于二氧化碳 (CO₂) 的重要温室气体, 农田是大气 CH₄ 和 N₂O 的重要来源, 但目前农业措施对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响尚不明确。以水旱轮作稻田旱作季休闲为对照, 采用静态箱-气相色谱法研究了种植紫云英、黑麦草、冬小麦以及油菜等 4 种作物对稻田旱作季 CH₄ 和 N₂O 排放及其温室效应的影响。结果表明: 水旱轮作稻田旱作季 CH₄ 排放通量较低, 而 N₂O 排放较为明显。稻田旱作季 CH₄ 平均排放通量表现为油菜 > 黑麦草 > 冬小麦 > 紫云英 > 休闲, 依次为 8.96、7.19、6.94、6.52 和 6.02 μg·m⁻²·h⁻¹, 季节 N₂O 平均排放通量的顺序是油菜 (61.1 μg·m⁻²·h⁻¹) > 冬小麦 (52.5 μg·m⁻²·h⁻¹) > 黑麦草 (34.0 μg·m⁻²·h⁻¹) > 休闲 (15.3 μg·m⁻²·h⁻¹) > 紫云英 (13.6 μg·m⁻²·h⁻¹)。稻田旱作季种植不同作物对 CH₄ 和 N₂O 季节总排放量的影响达到极显著水平 (P < 0.01), CH₄ 和 N₂O 季节总排放量均以种植油菜为最大, 分别达到 43.2 和 294.7 mg·m⁻², 比对照休闲增加 49% 和 299%。种植油菜、冬小麦和黑麦草较对照休闲显著增加稻田旱作季总增温潜势 (P < 0.05), 紫云英和休闲处理间总增温潜势无显著差异 (P > 0.05)。研究表明, 种植油菜、冬小麦和黑麦草等作物由于氮肥的施用增加了水旱轮作稻田旱作季温室效应。

关键词: 水旱轮作; CH₄ 和 N₂O 排放; 增温潜势; 稻田; 旱作季

中图分类号: S181

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 09-1521-06

引用格式: 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 朱普平, 盛婧, 王子臣. 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1521-1526.

ZHANG Yuefang, ZHENG Jianchu, CHEN Liugen, ZHU Puping, SHEN Jing, WANG Zichen. Effects of different upland crops cultivation on CH₄ and N₂O emissions during upland-growing season from paddy rice-upland crop rotation field [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1521-1526.

全球变暖与温室气体的大量排放关系密切。甲烷 (CH₄) 和氧化亚氮 (N₂O) 是仅次于二氧化碳 (CO₂) 的重要温室气体^[1], 其单位质量的全球增温潜势 (GWP) 在 100 a 时间尺度上分别为 CO₂ 的 25 和 298 倍^[2]。大气中 CH₄ 和 N₂O 的体积分数增长迅速, 已分别由工业革命前的 700×10⁻⁹ 和 270×10⁻⁹ 提高到 2005 年的 1 783×10⁻⁹ 和 319×10⁻⁹^[2], 农业活动排放的 CH₄ 和 N₂O 约占全球人为排放量的 52% 和 84%^[3]。稻田是大气 CH₄ 的主要生物排放源之一, 虽然稻田 N₂O 的排放量小于旱地^[2-3], 但在稻季采取搁田措施会明显增加 N₂O 的排放^[4-5], 并且水旱轮作条件下稻田旱作季 N₂O 的排放量远高于水稻生长季^[6-8]。

我国是世界上主要的水稻生产和稻米消费国, 水旱轮作是我国稻田的重要种植模式之一, 主要分布在长江流域。由于种植不同作物因其自身肥水利用效率以及相应配套栽培措施的差异^[9-11], 其对农田土壤-作物系统碳氮循环的影响有所差异, 使得种植不同作物的农田 CH₄ 和 N₂O 产生和排放规律不尽

相同, 影响到农田温室气体的最终排放^[10,12-14]。目前有关稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的研究大多集中于水稻生长季, 相对于水旱轮作稻田旱作季温室气体排放的报道较少^[13], 种植作物是否对稻田旱作季 CH₄ 和 N₂O 排放产生影响尚无明确的结论, 哪种作物最有利于减少农田生态系统温室气体排放还有待深入研究。为此, 本文以水旱轮作稻田旱作季休闲为对照, 初步研究了种植紫云英、黑麦草、冬小麦和油菜等对稻田旱作季 CH₄ 和 N₂O 的排放及其温室效应的影响, 以期对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依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

大田试验于 2009 年 11 月至 2010 年 6 月在江苏省苏州市现代农业 (水稻) 示范区 (31°33'N, 120°37'E) 进行, 该区地处阳澄湖低洼湖荡平原, 属亚热带湿润性季风气候, 常年平均气温为 15.5 °C, 降水量为 1 042 mm, 日照 2 130 h, 太阳辐射 4.94×10⁵ J·cm⁻²,

基金项目: 农业部公益性行业科研专项项目 (201103001); 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(11)2033)

作者简介: 张岳芳 (1978 年生), 男, 副研究员, 博士, 主要从事农业生态环境研究。E-mail: zhangyuefang@china.com.cn

*通信作者: 郑建初 (1956 年生), 男, 研究员, 主要从事农业生态与农作制度研究。E-mail: zjc@jaas.ac.cn

收稿日期: 2012-07-09

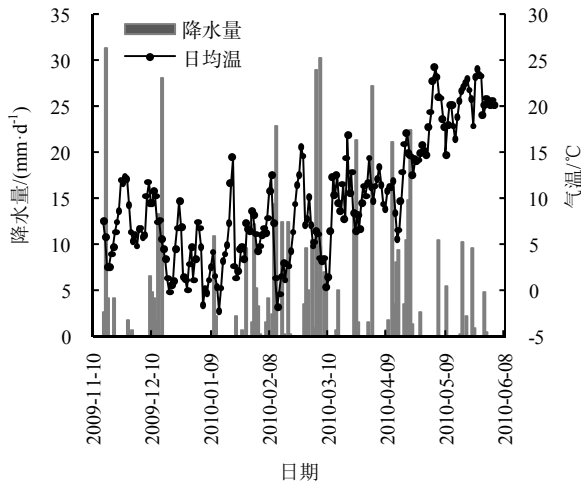


图1 试验期间的降水量和日均温(2009—2010)

Fig. 1 Seasonal patterns in daily precipitation and mean air temperature during upland-growing season from paddy rice-upland crop rotation field

无霜期242 d。试验期间的降水量和日均温见图1。稻田土壤类型属乌栅土,试验前0~20 cm土壤理化性状为:有机质32.8 g·kg⁻¹,全氮1.9 g·kg⁻¹,全磷2.5 g·kg⁻¹,速效氮110.7 mg·kg⁻¹,速效磷6.9 mg·kg⁻¹,速效钾100.3 mg·kg⁻¹,土壤容重1.2 g·cm⁻³,pH值6.4。

水旱轮作稻田旱作季试验设5个处理:休闲(CK)、紫云英(T1)、黑麦草(T2)、冬小麦(T3)和油菜(T4),每处理重复3次,每小区面积为30 m²。供试紫云英、黑麦草、冬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”。整个旱作季休闲和紫云英处理不施肥,黑麦草共施:N 165 kg·hm⁻²、P₂O₅ 60 kg·hm⁻²和K₂O 60 kg·hm⁻²,冬小麦和油菜施肥量相同,均为N 210 kg·hm⁻²、P₂O₅

表1 2009-2010年水旱轮作稻田旱作季试验田间管理
Table 1 Field log during upland-growing season
from paddy rice-upland crop rotation field

时间	农田管理
2009-10-08	紫云英、黑麦草套播,播种量分别为45.0和30.0 kg·hm ⁻²
2009-11-06	冬小麦套播,播种量为150 kg·hm ⁻²
2009-11-16	各处理收获水稻并移走秸秆。免耕移栽油菜,移栽密度为8.0×10 ⁴ 株·hm ⁻² 黑麦草、冬小麦和油菜施用基肥。黑麦草施 N:105 kg·hm ⁻² , P ₂ O ₅ : 60 kg·hm ⁻² 和 K ₂ O: 60 kg·hm ⁻² ;冬小麦施 N: 84 kg·hm ⁻² , P ₂ O ₅ : 90 kg·hm ⁻² 和 K ₂ O: 45 kg·hm ⁻² ;油菜施 N:105 kg·hm ⁻² , P ₂ O ₅ :90 kg·hm ⁻² 和 K ₂ O:45 kg·hm ⁻²
2009-11-17	
2010-02-20	油菜施薹花肥(N:105 kg·hm ⁻² ; K ₂ O: 45 kg·hm ⁻²)
2010-03-03	冬小麦施拔节肥(N: 63 kg·hm ⁻² ; K ₂ O: 45 kg·hm ⁻²)
2010-03-28	黑麦草第一次刈割并追施氮肥(N: 60 kg·hm ⁻²)
2010-04-04	冬小麦施孕穗肥(N: 63 kg·hm ⁻²)
2010-05-15	黑麦草第二次刈割
2010-05-25	油菜收割
2010-06-01	冬小麦收获

90 kg·hm⁻²和K₂O 90 kg·hm⁻²,主要农田管理措施见表1,氮、磷、钾肥分别为含N 46.4%的尿素,含P₂O₅ 12%的过磷酸钙和含K₂O 60%的氯化钾。各处理旱作季无灌水,前茬水稻季水分管理采用前期浅水、中期搁田、后期干湿交替的模式,其他田间管理措施参照当地一般高产大田。

1.2 气样采集与分析

CH₄和N₂O气体采用静态箱-气相色谱法测定,采样箱由PVC材质制成,外部包有薄海绵和铝箔胶带,用于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,气体采集时加水密封,采样箱内顶部装有12V小风扇以充分混匀箱内气体,并留有一孔插温度计,便于观测箱内温度变化,箱体中部安装抽气孔,采样时按0、10、20 min的时间间隔用50 mL注射器抽取箱内气体,来回抽动3次以完全混匀气体,抽出50 mL保存于气体采样袋(购自大连德霖气体包装有限公司)后迅速带回实验室分析。采样频率为每周1次(每年春节假日除外),采样时间在上午8:00-10:00点,连续采集3次,每个小区设3个重复,每次采集气样时测定10 cm的土壤温度和耕层土壤含水量,并计算土壤充水孔隙率(WFPS)^[15]。CH₄和N₂O气体体积分数由经改装的Agilent 7890A气相色谱测定,CH₄检测器为FID,检测温度300 °C,柱温60 °C,载气为φ=99.999%高纯氮气,流速30 mL·min⁻¹;N₂O检测器为ECD,检测温度300 °C,柱温60 °C,载气为φ=99.999%高纯氩甲烷气(95%氩气+5%甲烷),流速40 mL·min⁻¹。气体排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \times h \times d_c/d_t \times 273/(273+T) \quad (1)$$

式中F为气体排放通量(μg·m⁻²·h⁻¹);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);d_c/d_t为单位时间内采样箱内气体的体积分数变化率;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)。

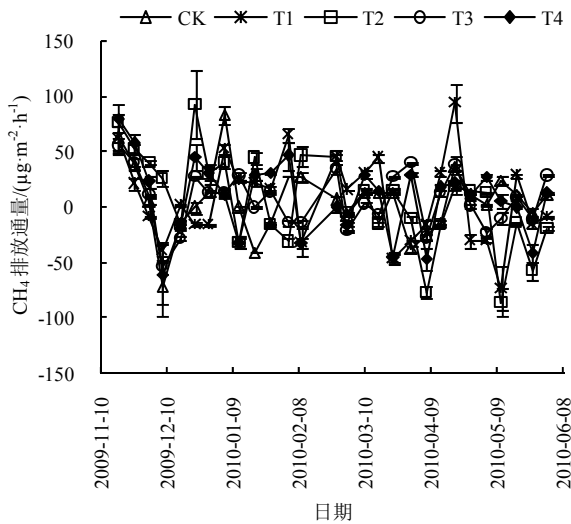
1.3 试验数据处理

采用Microsoft Excel 2007对数据进行处理和绘图,CH₄和N₂O排放通量用每次观测3个重复的平均值及标准偏差来表示,季节平均排放通量是将3个重复的观测值按时间间隔加权平均后再平均。试验数据采用SPSS11.5统计软件进行方差分析和显著性比较(Duncan法)。

2 结果与分析

2.1 种植不同作物对稻田旱作季CH₄排放的影响

水旱轮作稻田旱作季不同处理CH₄排放通量的季节变化见图2。从图2可以看出,稻田旱作季CH₄排放通量很低,并且多次出现负值,排放通量在-85.5~94.7 μg·m⁻²·h⁻¹之间,各处理旱作季CH₄排放

图2 旱作季种植不同作物CH₄排放通量的季节变化Fig. 2 The seasonal variation of CH₄ fluxes under different upland crops cultivation

CK 表示休闲, T1 表示紫云英, T2 表示黑麦草, T3 表示冬小麦, T4 表示油菜。下同

无明显规律,但在11月中旬至12月上旬采样观测初期CH₄排放均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。水旱轮作稻田旱作季CH₄平均排放通量顺序是油菜(T4) > 黑麦草(T2) > 冬小麦(T3) > 紫云英(T1) > 休闲(CK),平均排放通量依次为8.96、7.19、6.94、6.52和6.02 μg·m⁻²·h⁻¹(表2)。

从整个旱作季CH₄的总排放量(表2)来看,2009-2010年种植不同作物对CH₄季节总排放量存在极显著影响($P < 0.01$),以T4处理为最大,CH₄季节总排放量达到43.2 mg·m⁻²,显著高于其他处理,其次为T2处理,总排放量为34.7 mg·m⁻²,与T3和T1处理差异不大,但显著高于CK处理,各处理以CK的CH₄季节总排放量最小,总排放量为29.0 mg·m⁻²,T4、T2、T3、T1处理分别较CK增加CH₄排放14.2、5.7、4.5和2.5 mg·m⁻²,增幅分别为49%、20%、6%和9%,施用氮肥的T2、T3、T4处理平均比不施用氮肥的CK和T1增加CH₄排

表2 水旱轮作稻田旱作季CH₄和N₂O排放量Table 2 CH₄ and N₂O emission fluxes under different upland crops cultivation during upland-growing season

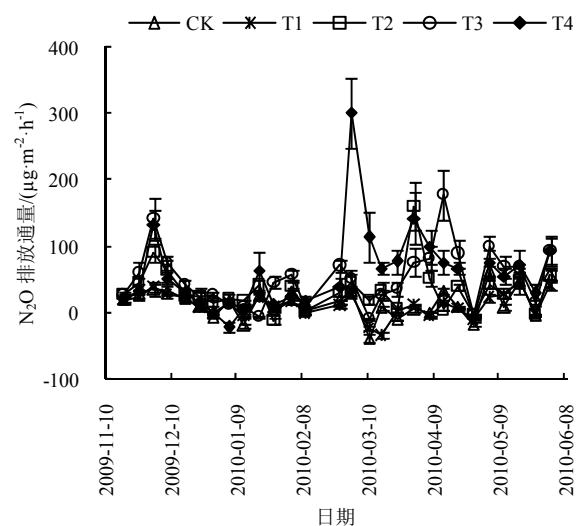
处理	CH ₄ 平均 排放通量/ (μg·m ⁻² ·h ⁻¹)	CH ₄ 季节 总排放量/ (mg·m ⁻²)	N ₂ O平均 排放通量/ (μg·m ⁻² ·h ⁻¹)	N ₂ O季节 总排放量/ (mg·m ⁻²)
CK	6.02 c	29.0 c	15.3 d	73.9 d
T1	6.52 bc	31.5 bc	13.6 d	65.7 d
T2	7.19 b	34.7 b	34.0 c	164.0 c
T3	6.94 bc	33.5 bc	52.5 b	253.3 b
T4	8.96 a	43.2 a	61.1 a	294.7 a

同列英文小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

放23%。这表明,与旱作季休闲相比,水旱轮作稻田旱作季种植不同作物(紫云英、黑麦草、冬小麦和油菜)均不同程度的增加了CH₄季节总排放量,氮肥的施用增加了旱作季CH₄排放。

2.2 种植不同作物对旱作季N₂O排放的影响

水旱轮作稻田旱作季种植不同作物的N₂O排放通量季节变化有一定差异(图3)。施肥和降水对N₂O排放高峰的出现影响较大,不施氮肥的CK和T1处理N₂O排放均维持较低水平,排放通量在-37.1至63.3 μg·m⁻²·h⁻¹之间,无N₂O排放高峰出现,负值的出现可能是大气扩散进入土壤的N₂O被氧化亚氮还原酶还原为N₂的量大于土壤自身排放量;2009-2010年稻田旱作季,T2、T3、T4处理在种植黑麦草、冬小麦和油菜作物后30 d内均出现一个明显的N₂O排放高峰,这可能是施用基肥后降雨所致;T2处理在2010年4月2日出现一个N₂O排放高峰,可能与3月下旬黑麦草第一次刈割完追施尿素后降雨有关;T3处理在2010年4月中旬出现一个N₂O排放高峰,可能是4月4日冬小麦施用孕穗肥后降雨的结果;T4处理则在2010年的3月上旬和4月上旬出现两个明显的N₂O排放高峰,可能与油菜施用薹花肥关系密切。从表2可以看出,水旱轮作稻田旱作季种植不同作物的N₂O平均排放通量大小顺序表现为:T4(61.1 μg·m⁻²·h⁻¹) > T3(52.5

图3 旱作季种植不同作物N₂O排放通量的季节变化Fig. 3 The seasonal variation of N₂O fluxes under different upland crops cultivation

μg·m⁻²·h⁻¹) > T2(34.0 μg·m⁻²·h⁻¹) > CK(15.3 μg·m⁻²·h⁻¹) > T1(13.6 μg·m⁻²·h⁻¹)。

水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对N₂O季节总排放量有极显著影响($P < 0.01$,表2),不同处理旱作季N₂O总排放量依次为T4、T3、T2、CK和T1,排放量分别为294.7、253.3、164.0、73.9

和 $65.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, N_2O 总排放量随施氮量增加而增加, 施用氮肥的 T4、T3 和 T2 处理的 N_2O 总排放量均显著高于不施氮肥的 CK 和 T1 处理, 氮肥用量较高的 T4 和 T3 处理明显高于施氮量较低的 T2 处理; 旱作季 T4、T3 和 T2 处理分别比 CK 增加 N_2O 排放 299%、243% 和 122%, 处理间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$), T1 处理比 CK 减少 N_2O 排放 11%, 差异未达显著水平 ($P > 0.05$)。由上说明, 增加氮肥用量会提高水旱轮作稻田旱作季 N_2O 季节总排放量, 旱作季种植油菜的 N_2O 季节总排放量最大。

2.3 水旱轮作稻田旱作季 CH_4 和 N_2O 排放的影响因素

对不同水旱轮作方式下稻田旱作季 CH_4 排放通量与农田土壤充水孔隙率 (WFPS) 和 10 cm 地温的相关分析显示 (表 3), 各处理的 CH_4 排放通量与 WFPS 呈显著或极显著正相关 ($r = 0.391^* \sim 0.629^{**}$), 与农田 10 cm 地温呈负相关, 但未达显著水平, 表明土壤水分含量是影响稻田旱作季 CH_4 排放通量的重要因素, 而土壤温度不是影响旱作季 CH_4 排放的主要原因, 这与前人的研究结果一致^[16]。不同水旱轮作方式下稻田旱作季 N_2O 排放通量与 WFPS 呈负相关, 与 10 cm 地温呈正相关, 除 T4 处理的相关系数接近显著水平外, 其他处理的相关系数均达显著或极显著水平 ($r = 0.369^* \sim 0.494^{**}$), 说明种植油菜条件下, 稻田旱作季 N_2O 排放通量还受其它环境因子的影响, 而种植紫云英、黑麦草和冬小麦作物以及休闲的稻田旱作季 N_2O 排放通量随土壤水分含量的上升而减少, 随土壤温度的上升而增加, 这与 Smith 等^[17]、雒新萍等^[18]对旱地土壤的研究结果相同。

表3 CH_4 、 N_2O 排放通量与土壤充水孔隙率和 10 cm 地温的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between CH_4 , N_2O fluxes and WFPS or soil temperature of 10 cm depth (T)

处理	$r(\text{CH}_4, \text{WFPS})$	$r(\text{CH}_4, T)$	$r(\text{N}_2\text{O}, \text{WFPS})$	$r(\text{N}_2\text{O}, T)$
CK	0.405*	-0.362	-0.372*	0.485**
T1	0.487**	-0.293	-0.439*	0.369*
T2	0.629**	-0.326	-0.420*	0.423*
T3	0.438*	-0.232	-0.390*	0.494**
T4	0.391*	-0.207	-0.352	0.366

$n=28$, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

2.4 水旱轮作稻田旱作季排放 CH_4 和 N_2O 的综合温室效应

全球增温潜势 (GWP) 一般作为相对指标来估算不同温室气体对气候系统的潜在效应, 以 CO_2 作为参考气体, 在 100 a 时间尺度上, 单位质量 CH_4 和 N_2O 的 GWP 分别为 CO_2 的 25 和 298 倍^[2], 据此计算水旱轮作稻田旱作季种植不同作物排放 CH_4 和

N_2O 所产生的温室效应 (CO_2 当量)。由表 4 可知, 各处理以 T4 的总增温潜势为最大, 达到 CO_2 $889 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), T3 处理的总增温潜势为 CO_2 $763 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于 T1、T2 和 CK 处理 ($P < 0.05$), T2 处理的总增温潜势显著高于 T1 和 CK 处理 ($P < 0.05$), 不施肥的 T1 和 CK 处理总增温潜势较小, 处理间无显著差异 ($P > 0.05$)。从表 4 还可以看出, 水旱轮作稻田旱作季排放的 N_2O 对总增温潜势的贡献远远超过 CH_4 , 应成为主要的减排对象。

表4 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物排放 CH_4 和 N_2O 的增温潜势
Table 4 Global warming potentials of CH_4 and N_2O under different upland crops cultivation

处理	总增温潜势/($\text{kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$)		
	CH_4	N_2O	合计
CK	7.3 c	220 d	227 d
T1	7.9 bc	196 d	204 d
T2	8.7 b	489 c	498 c
T3	8.4 bc	755 b	763 b
T4	10.8 a	878 a	889 a

3 讨论

农田 CH_4 排放是土壤中 CH_4 产生、氧化和传输的净效应^[16]。已有研究表明, 稻田旱作季的 CH_4 排放量较低^[13-14, 19-20], 甚至表现为大气 CH_4 的弱汇^[13, 20]。本试验对水旱轮作稻田旱作季种植不同作物 CH_4 排放的测定结果也显示稻田旱作季 CH_4 排放量较低, 排放通量在 -85.5 至 $94.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间, 但其季节总排放量在 29.0 至 $43.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间 (表 2), 是大气 CH_4 的弱源, 这与前人^[13-14, 19-20]的研究结论不完全相同。与旱作季休闲相比, 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物 (紫云英、黑麦草、冬小麦和油菜) 均不同程度的增加了 CH_4 季节总排放量, 这与黄太庆等^[13]的研究结果不尽相同, 与唐海明等^[14]对双季稻田旱作季的研究结论一致。本研究还表明, 氮肥的施用增加了旱作季 CH_4 排放, 其原因可能是: 在低体积分数 CH_4 条件下, 铵态氮肥或产铵态氮肥 (如尿素) 施用对土壤氧化 CH_4 有着强烈的抑制作用^[21-22]; 尿素可用作基肥和追肥, 是长江下游水旱轮作区旱作季主要施用的氮肥品种, 本研究尿素氮肥的施用可能减少了稻田旱作季土壤氧化 CH_4 的量, 间接增加了 CH_4 排放。

土壤微生物的硝化和反硝化过程是农田 N_2O 的主要来源, 其排放因气候条件、土壤特性和农业管理措施的不同而异^[3-4, 7-8, 16, 23-26], 稻田旱作季 N_2O 排放高峰的形成主要是施肥与降水 (或灌水) 综合作用的结果^[6, 16, 22]。从本研究结果看, 水旱轮作稻田旱作季种植黑麦草、冬小麦和油菜等作物在施用

基肥或追肥后遇到降雨(雪)产生 N₂O 排放高峰的几率较大,而不施氮肥的旱作季休闲和种植紫云英处理旱作季 N₂O 排放均维持较低水平且无排放高峰出现,这与前人的研究结果一致^[16,25]。本研究进一步证实了农田 N₂O 排放量有随施氮量增加而增加的趋势^[7-8],在施氮量较高时种植油菜的 N₂O 季节总排放量明显高于种植冬小麦处理,这可能是油菜生产过程中每次施氮较多使得局部土壤氮含量过高,土壤硝化或反硝化作用的促进导致 N₂O 大量排放,还有可能与油菜作物自身的生长发育特点有关。由于叶层的交替以及前期的主要光合器官(即叶片)在开花后逐渐被果荚替代,油菜在终花前形成大量的落叶,到成熟时植株上基本无叶片^[27],油菜落叶较低的碳氮比加上开花后较高的气温,其在土表分解的速率很快^[28],这为土壤微生物硝化和反硝化过程提供了条件,最终增加了 N₂O 排放,但其机制需深入研究。

本研究对水旱轮作稻田旱作季排放 CH₄ 和 N₂O 产生的温室效应——全球增温潜势(GWP)的分析结果表明,旱作季的总增温潜势表现为油菜>冬小麦>黑麦草>休闲>紫云英(表4),结合不同处理的氮肥用量水平,显示在较高施氮量条件下种植冬小麦、不施氮条件下种植紫云英有利于减少长江下游水旱轮作稻田旱作季的温室效应。本文不同作物种植条件下 N₂O 排放对稻田旱作季温室效应中起着决定性作用与以往^[13,16]的研究结论相符,这意味着迫切需要开展水旱轮作稻田旱作季 N₂O 减排技术的相关研究。从本试验测定结果来看,适当减少稻田旱作季氮肥的投入能起到减少 N₂O 和 CH₄ 排放的双重效果。但本文未考虑产量等指标,也未涉及稻季排放 CH₄ 和 N₂O 产生的温室效应。因此,在综合系统生产能力、经济效益以及土壤固碳潜力的基础上,全面评价水旱轮作稻田周年的综合温室效应尚待进一步探讨。

4 结论

水旱轮作稻田旱作季 CH₄ 排放通量较低,而 N₂O 排放较为明显。种植不同作物对稻田旱作季 CH₄ 和 N₂O 总排放量的影响达到极显著水平($P < 0.01$),种植油菜、黑麦草、冬小麦和紫云英的 CH₄ 季节总排放量分别比对照休闲增加 CH₄ 排放 49%、20%、6% 和 9%,N₂O 排放量随氮肥用量的增加而增加,种植油菜、冬小麦和黑麦草的 N₂O 季节总排放量分别比休闲增加 N₂O 排放 299%、243% 和 122%。种植不同作物对稻田旱作季排放 CH₄ 和 N₂O 形成的增温潜势有极显著影响($P < 0.01$),种植油菜、冬小麦和黑麦草等作物由于氮肥的施用较对照休闲明显增加水旱轮作稻田旱作季温室效应,不施氮的

紫云英和休闲处理间总增温潜势无显著差异($P > 0.05$)。在较高施氮量条件下种植冬小麦、不施氮条件下种植紫云英有利于减少长江下游水旱轮作稻田旱作季的温室效应。

致谢: 本研究野外试验采样过程中得到苏州农业职业技术学院俞永、李趁心等同学的帮助,在此表示谢意。

参考文献:

- [1] LASHOF D A, AHUJA D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming [J]. *Nature*, 1990, 344: 529-531.
- [2] IPCC. Climate change 2007 – The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [3] SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363: 789-813.
- [4] CAI Z C, XING G X, YAN X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management [J]. *Plant and Soil*, 1997, 196: 7-14.
- [5] XU H, XING G X, CAI Z C, et al. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 23–28.
- [6] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统的 N₂O 排放研究[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(5): 495–499.
- [7] 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.
- [8] LIU S W, QIN Y M, ZOU J W, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4): 906-913.
- [9] MONSON R K, SACKSCHEWSKY M R, WILLIAMS G J. Field measurements of photosynthesis, water-use efficiency, and growth in *Agropyron smithii* (C3) and *Bouteloua gracilis* (C4) in the Colorado shortgrass steppe [J]. *Oecologia*, 1986, 68(3): 400-409.
- [10] 陈涛涛, 黄耀, 郑循华, 等. 种植不同作物对农田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响及其驱动因子[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(2): 147–155.
- [11] 范明生, 江荣风, 张福锁, 等. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 424–432.
- [12] 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.
- [13] 黄太庆, 马煜春, 熊正琴, 等. 不同种植制度对稻田旱作季节 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(6): 519–523.
- [14] 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.
- [15] FRANZLUEBBERS A J. Microbial activity in response to water-filled pore space of variably eroded southern Piedmont soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11(1): 91-101.
- [16] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [17] SMITH K A, THOMSON P E, CLAYTON H, et al. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(19), 3301-3309.
- [18] 雒新萍, 白红英, 路莉, 等. 黄绵土 N₂O 排放的温度效应及其动力学特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1226-1233.

- [19] GROOT T T, VAN BODEGOM P M, HARREN F J M, et al. Quantification of methane oxidation in the rice rhizosphere using ^{13}C -labelled methane [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 64: 355-372.
- [20] SHANG Q Y, YANG X Y, 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.
- [21] STEUDLER P A, BOWDEN R D, MILILLO J M, et al. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils [J]. *Nature*, 1989, 341: 314-316.
- [22] MOSIER A, SCHIMEL D, VALENTINE D, et al. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands [J]. *Nature*, 1991, 350: 330-332.
- [23] 邹晓霞, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农业领域温室气体主要减排措施研究分析[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(8-9): 1348-1358.
- [24] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2001, 22(6): 20-23.
- [25] YAO Z, ZHENG X, XIE B, et al. Tillage and crop residue management significantly affects N-trace gas emissions during the non-rice season of a subtropical rice-wheat rotation [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, (41): 2131-2140.
- [26] 张岳芳, 陈留根, 王子臣, 等. 耕作方式对太湖地区冬小麦生长季 N_2O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(8-9): 1326-1331.
- [27] 傅寿仲, 朱耕如. *江苏油作科学*[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995.
- [28] 睦丹. 油菜落叶对土壤养分含量及微生物生长的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.

Effects of different upland crops cultivation on CH_4 and N_2O emissions during upland-growing season from paddy rice-upland crop rotation field

ZHANG Yuefang^{1,2}, ZHENG Jianchu^{2*}, CHEN Liugen^{1,2}, ZHU Puping^{1,2}, SHEN Jing^{1,2}, WANG Zichen^{1,2}

1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China

2. Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China

Abstract: Although carbon dioxide (CO_2) is by far the most abundant greenhouse gas, methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) are also important because of their unique radiative properties and long residence time in the atmosphere resulting in global warming potentials (GWPs) of 298 and 25 times that of CO_2 , respectively. Though much research has focused on CH_4 and N_2O emissions under various agricultural managements (such as soil tillage, crop straw management, water regime, fertilizers, et al), the impact of crop cultivation on CH_4 and N_2O emission is currently not well documented. By using static chamber/gas chromatographic techniques, this paper studied the different upland crops cultivation on CH_4 and N_2O emissions during upland-growing season from paddy rice-upland crop rotation field, including Chinese milk vetch (T1), ryegrass (T2), winter wheat (T3) and rape (T4), with fallow as control (CK). The results showed that paddy field was a weak source of atmospheric CH_4 and an obvious source of atmospheric N_2O as well during upland-growing season. The order of seasonal CH_4 fluxes was $\text{T4} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T1} > \text{CK}$ (mean 8.96, 7.19, 6.94, 6.52 and 6.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively), while seasonal mean N_2O fluxes were: T4 (61.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) $>$ T3 (52.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) $>$ T2 (34.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) $>$ CK (15.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) $>$ T1 (13.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$). Total CH_4 and N_2O emissions were significantly influenced by upland crops cultivation during upland-growing season ($P < 0.01$). T4 had the highest total CH_4 and N_2O emissions during upland-growing season, with 43.2 and 294.7 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively. Compared with CK, T4 increased total CH_4 and N_2O emissions by 49% and 299%, respectively. T4, T3 and T2 significantly increased GWPs of CH_4 and N_2O during upland-growing season in contrast with CK ($P < 0.05$). The results of this preliminary study suggest that GWPs of CH_4 and N_2O were significantly promoted by planting rape, winter wheat and ryegrass due to nitrogen fertilizer application during upland-growing season from paddy rice-upland crop rotation field.

Key words: paddy rice-upland crop rotation; CH_4 and N_2O emissions; global warming potential; paddy field; upland-growing season