

长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化

刘晓雨,李志鹏,潘根兴*,李恋卿

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所,南京 210095)

摘要: 利用田间观测和模型预测方法对太湖地区一个长期不同施肥处理的稻田生态系统进行了稻季温室气体排放观测和净温室气体排放强度分析。结果表明,不同施肥管理下,稻田土壤有机碳含量不同程度提高,有机无机肥料配施较单施化肥处理显著提高有机碳库储量,并且秸秆处理略高于猪粪处理。与不施肥处理相比,长期施用肥料显著提高了稻田生态系统 CH_4 和 CO_2 的排放量,有机肥料与化肥配施较单施化学肥料下土壤碳(CO_2 和 CH_4)排放增加,但化肥配施秸秆与化肥配施猪粪下稻田生态系统 CH_4 和 CO_2 的排放没有显著差异。不同施肥处理下,稻田生态系统净温室效应表现为 $\text{CFM} \approx \text{CFS} > \text{CF} > \text{NF}$,但水稻生产的净温室气体排放强度并没有显著性差异。因此,在提高水稻产量的同时,有机无机配合施肥并没有提高净温室气体的排放强度。

关键词: 稻田;长期施肥;温室气体排放强度;全球增温潜势

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)09-1783-08

Greenhouse Gas Emission and C Intensity for a Long-term Fertilization Rice Paddy in Tai Lake Region, China

LIU Xiao-yu, LI Zhi-peng, PAN Gen-xing*, LI Lian-qing

(Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

Abstract Impact of agricultural management on global warming potential(GWP) and greenhouse gas intensity(GHGI) was studied by combining field measurement data and model prediction methods. The experiment was conducted in a long-term fertilization station initiated 1987, located in Tai lake region. The fertilization treatments included no fertilizer application(NF), application of chemical nitrogen fertilizers only(CF), combined application of chemical fertilizers and pig manure(CFM), and straw return(CFS). We found that long-term fertilization significantly enhanced soil carbon stock. Application of fertilizers intensively promoted CH_4 and CO_2 emissions compared with the control treatment. Relative to inorganic-only fertilization, combined fertilization significantly enhanced the carbon transfer from soils to the atmosphere, but no difference was detected between CFM and CFS. Compared with chemical nitrogen fertilizer only plots, combined organic and inorganic fertilizer remarkably increased the net annual GWP. However, there were no differences of GHGIs among three fertilization treatments.

Keywords rice paddy; long-term fertilization; greenhouse gas intensity; global warming potential

CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是重要的农业源温室气体,人类自身发展排放促使其在大气中的浓度逐步上升,而显著加剧全球变暖^[1-3]。据估计,2005 年全球农业温室气体排放量占人为排放总量的 10%~12%,其中甲烷排

放量占全球人类活动导致的甲烷排放的 50%^[4]。在农业生产中稻田被认为是人类活动排放甲烷的主要生物源之一^[5-7],中国稻田甲烷的排放则占世界稻田的 25%左右^[8]。近 20 年来,水稻生产过程中普遍采用“淹水-中期烤田-淹水(湿润灌溉)”的水分管理方式以减少 CH_4 排放^[9-10],但是这种水分管理方式会导致稻田 N_2O 排放强度的急剧增加^[11],因此如何平衡且降低两者的排放是稻田生态系统减排的关键问题。畜禽粪便、秸秆还田是一种传统的土壤培肥方法,其与化学肥料配施可以有效提高土壤碳库储量^[12-14],但同时也

收稿日期 2011-03-19

基金项目:国际合作重大项目(40710019002);国家基金委重点项目(40830528)

作者简介:刘晓雨(1984—),男,河北保定人,博士研究生,主要从事农田碳循环与温室气体研究。

* 通讯作者 潘根兴 E-mail: panggenxing@yahoo.com.cn

会促进土壤呼吸,增加 CO_2 和 CH_4 向大气的释放量。有些学者甚至认为推广秸秆还田,中国稻田增排甲烷的温室效应会大幅抵消土壤固碳的减排效益,是一项重要的温室气体泄漏^[15]。有机物料还田引起稻田土壤碳库储量增加的同时是否会被增排的 CH_4 、 N_2O 温室气体抵消,是目前开发农业减排技术亟待回答的关键问题。

本研究以太湖地区一个稻田长期肥料试验为对象,采用密闭箱采样-气相色谱仪测定法,对水稻生长期土壤-作物生态系统呼吸产生的 CO_2 和 CH_4 排放进行了连续观测,并结合通用模型数据预测水稻季 N_2O 排放强度,分析不同施肥处理(秸秆、猪粪还田)下稻田生态系统呼吸释放温室气体的强度、净温室效应和温室气体排放强度的变化,为科学评价有机无机配合施肥对于水稻生产和生态系统固碳减排的作用提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计及水稻生产管理

试验设计在刘晓雨等^[16]文献中已有详细描述。此长期试验为稻油轮作。4个处理分别是不施肥(NF)、单施化肥(CF)、化肥与猪粪配施(CFM)和化肥与秸秆配施(CFS)等。各施肥处理化肥氮施用量一致,水稻季总氮素施用量分别为 0、256.5、357.3、281.3 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,其他肥料施用除对照不施肥外均相同,猪粪与秸秆在水稻收割后油菜移栽前一次性施入,混入土壤。整个水稻生育期田间水分管理方式为淹水-烤田-淹水-湿润灌溉。

2007 采样测定的各处理的土壤基本性质如表 1。

1.2 样品采集与测定方法

野外观测与样品采集于 2007 年水稻移栽后的 7 月 21 至 10 月 25 日进行,温室气体采样采用静态密闭箱-气相色谱法^[17],每周 1 次,选择天气晴朗或多云天气的日子,在每日上午 8 30—10 30 间进行^[18]。大田试验气体采样箱为柱型,用不锈钢制成,横截面积为 0.5 m×0.5 m,箱体高度随作物高度而增加。为减小

采样期间由于太阳辐射引起的箱内温度变化,所有采样箱外侧均先包有一层海绵,然后覆盖一层锡箔纸。采样时,首先将采样箱置于采样底座上(底座内包括作物不含杂草),并用水密封,按 0、10、20、30 min 的时间间隔用 60 mL 注射器从采气箱中部的采气孔插入,来回抽动 3 次以便完全混匀气体,抽出 30 mL。连续采集 4 次,每个小区设 3 个重复。所采集的气体样品采用 Agilent 公司 GC-4890D 气相色谱仪测定(分析了气体样品中 CO_2 和 CH_4 浓度),仪器采用 FID 检测器和 Porapak Q 柱。工作条件:柱温 35 $^{\circ}\text{C}$,气体流速分别是载气(N_2)30 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, H_2 45 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,空气 400 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。测得的土壤呼吸为生态系统呼吸,即包括土壤、作物及根系的呼吸。采集气体样品的同时测定土温、气温、大气湿度。土温采用 WMS-19 10 路温度检测仪,气温和大气湿度采用 UMIDITY/TEMPHT-3003 测定。样品采集后 24 h 内带回实验室进行气体样品分析。

1.3 数据及处理

不同施肥处理下土壤有机碳及其年增长率来源于 Pan 等^[19],因观测中没有同时进行 N_2O 气体排放强度的监测,采用 Zou 等模型^[20]估计不同处理的 N_2O 排放强度。算式如下:

$$\text{N}_2\text{O}-\text{N}=0.79(\pm 0.28)+0.0073(\pm 0.001\ 1)\text{N} \quad (1)$$

式中,0.79 和 0.0073 分别是水稻生长季 N_2O -N 背景排放量和排放系数,N 代表氮肥施用量。0.28 和 0.001 1 为标准误。

总温室气体排放量(碳强度)计算,采用 IPCC (2007)的算式:

$$\text{GWP}(\text{kg CE}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})=72\times\text{CH}_4+289\times\text{N}_2\text{O}-44/12\times\text{SOC}_{\text{SR}} \quad (2)$$

式中,72 和 289 分别是 CH_4 和 N_2O 的分子升温强迫系数,44/12 为土壤有机碳换算为 CO_2 当量的系数。 CH_4 、 N_2O 和 SOC 分别是稻季(按每年)的 CH_4 、 N_2O 和有机碳排放通量(有机碳积累速率)。

水稻生产的碳强度是每吨稻谷生产中产生的温室气体排放碳当量,按下式计算:

表 1 供试土壤基本理化性质(0~15 cm)

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil studied(0~15 cm)

处理 Treatment	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH(H_2O)
无肥(NF)	1.10	23.78±1.37	1.68±0.14	0.21±0.002	6.02
化肥(CF)	1.18	26.79±2.34	1.85±0.09	0.28±0.003	5.74
常规(CFM)	1.14	28.62±0.10	2.01±0.21	0.26±0.007	5.29
秸秆(CFS)	1.18	29.06±1.57	1.96±0.22	0.23±0.008	5.50

$\text{GHGI} (\text{kg CE} \cdot \text{kg}^{-1} \text{稻谷} \cdot \text{a}^{-1}) = \text{GWP} / \text{单位面积水稻平均产量} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ (3)

所得数据处理及图表制作采用 Microsoft Excel for Windows 2003, 方差分析及多重比较采用 SPSS 16.0 进行, 显著性检验采用 LSD ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水稻季稻田甲烷排放

整个水稻生育期, 受“淹水-烤田-淹水-湿润灌溉”田间水分管理方式的影响, 甲烷的排放呈现不对称的“双峰”态势(图 1), 分别出现在 7 月 28 日和 8 月 25 日。最高排放量为 $11.93 \text{ mg CH}_4\text{-C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。相

关性分析表明, 稻田甲烷排放速率与土壤、大气温度呈显著相关(表 2), 特别是水稻生长后期, 土壤呈非淹水状态下高度正相关。水稻生长前期, 稻田处于淹水状态, 土壤氧化还原电位低, 厌氧环境促使甲烷产生和大量排放。中期烤田和生长后期, 稻田土壤水分含量降低, 氧气含量增加, 甲烷排放减少。不同施肥处理对甲烷的季节排放趋势没有造成影响, 但显著改变了甲烷的总排放量(表 3)。较不施肥处理(NF), 化学肥料和有机物料的施用下稻田甲烷的排放速率显著提高。CFS、CFM、CF 等施肥处理下甲烷的季节总排放量分别是 NF 处理的 2.8、2.4、1.8 倍。较长期单施化肥处理(CF), 长期有机肥配施化肥(CFM/CFS)的甲烷季

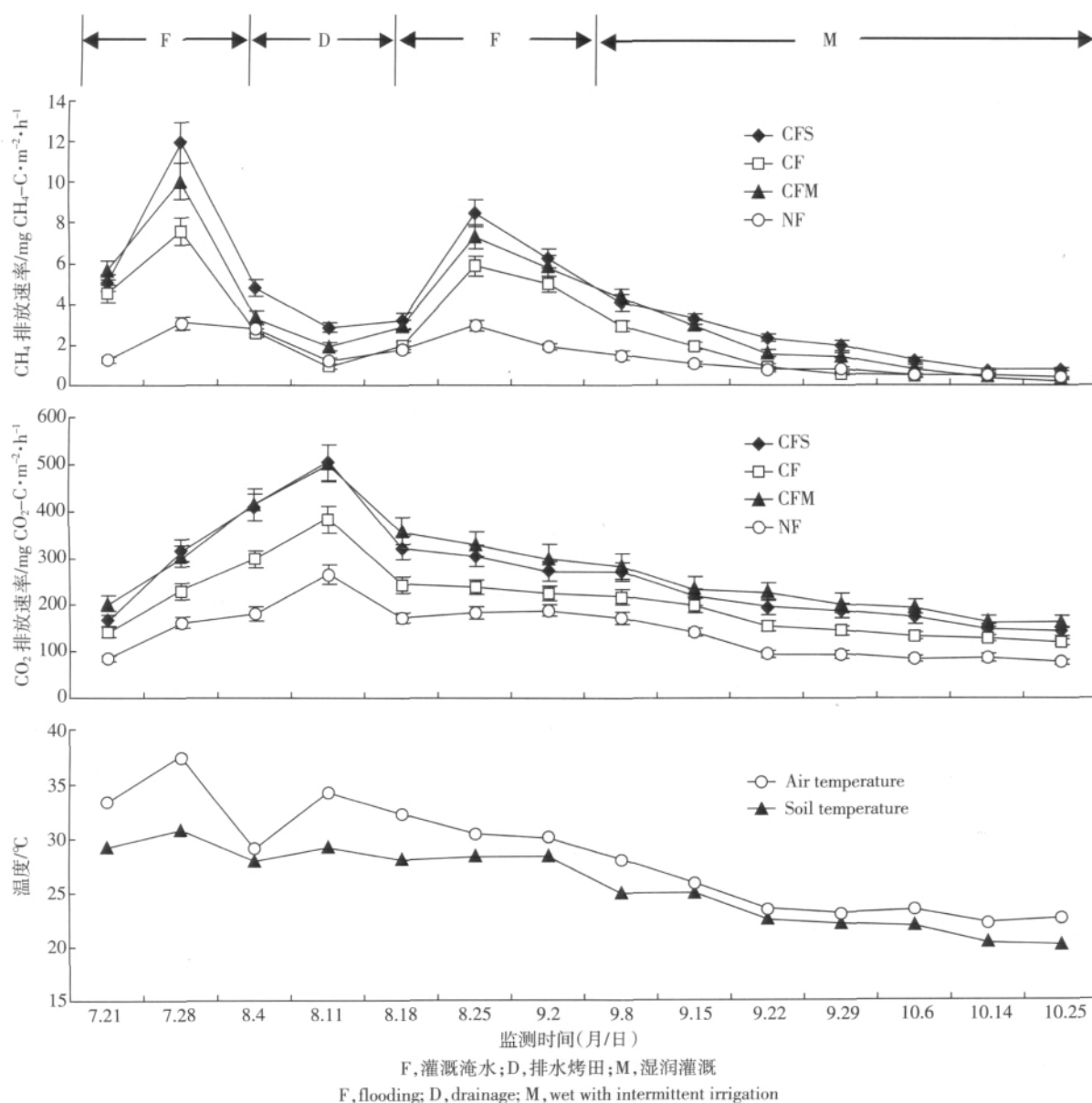


图 1 水稻生长期间 CH_4 和 CO_2 排放及土壤温度(5 cm)和气温的变化动态
Figure 1 Dynamics of CH_4 and CO_2 emissions, air and soil temperature during rice growing

节排放量提高了 36.4%和 57.1% ,但两者间没有显著差异。

2.2 二氧化碳排放

整个水稻生育期 ,与甲烷的排放不同 ,二氧化碳的排放呈现单峰态势(图 1)。与 CH_4 排放格局类似 ,稻田生态系统二氧化碳的排放与大气、土壤温度的变化基本吻合 ,相关分析表明二者存在显著的正相关关系(表 2) ,特别是在水稻生长后期(图 1)。不同施肥处理并没有改变二氧化碳的排放格局。烤田时期二氧化碳的排放达到峰值 ,最高通量出现拔节-抽穗期 ,达到 $502.96 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。水稻分蘖盛期 ,营养生长旺盛 ,作物根系活性和土壤微生物呼吸显著增强 ,此时排干后土壤水分含量降低 ,且大气和土壤温度都相对较高 ,易于二氧化碳产生、扩散和释放。长期施用化肥或有机物料下作物生长更快 ,加速了二氧化碳排放速率(图 1)。整个水稻季 ,CFS、CFM 和 CF 等处理二氧化碳释放量分别是 NF 处理的 1.8、2.0 倍和 1.4 倍。不同施肥处理间二氧化碳的排放速率不同 ,长期施用有机物料(CFM/CFS)配施化肥较长期单施化肥(CF)处理显著提高了稻田生态系统二氧化碳的释放通量。施用不同有机物料的处理(CFM/CFS)间二氧化碳的季节排放量并没有显著差异。

2.3 稻田总碳排放与碳排放强度

水稻生产过程中伴随着甲烷、氧化亚氮、二氧化碳等多种温室气体的排放。田间管理的差异会导致稻

田生态系统几种温室气体的产生及相对排放强度发生变化。因此在评价稻田生态系统的环境生态效应时 ,需要统筹考虑多种温室气体的综合影响。结合由(1)式的不同处理下 N_2O 排放量估算结果 ,不同施肥处理下稻田生态系统总碳排放出现了变化(表 3)。尽管长期施肥显著提高了生态系统的总碳排放 ,有机无机配合施肥(CFM/CFS)总碳排放相对于化肥处理提高了 36.4%和 48.3% ,说明施入有机物料增加了稻田生态系统的总温室气体排放。

为了考察粮食生产中温室气体碳排放 ,这里采用单位产量的总碳排放指标 ,即单位产量的(温室气体)碳强度(GWPI)(表 3)。作为稻田生产的主要作物管理技术途径 ,施肥与不施肥相比显著提高碳排放强度。不过 ,不同肥料处理下碳排放强度并没有显著性差异。

3 讨论

3.1 甲烷排放对长期施肥的响应

稻田甲烷排放通量仍然是农业温室气体减排的重要内容。甲烷作为重要的温室气体之一 ,近 20 a 来受到众多科学家的关注。研究尺度和方法也在不断更新 ,由原来小尺度内的单点观测到跨区域的模型研究。稻田作为农田温室气体甲烷的重要排放源 ,与其特殊的农田管理模式有很大关系。水分管理方式是稻田甲烷排放的重要驱动因子 ,田间原位观测试验表

表 2 不同施肥处理 CH_4 和 CO_2 排放通量与大气及土壤温度相关性分析

Table 2 Correlations of CH_4 and CO_2 emissions with air and soil temperature under different fertilization

处理 Treatment	CH_4 排放				CO_2 排放			
	气温		土壤温度		气温		土壤温度	
	相关系数 r	P 值	相关系数 r	P 值	相关系数 r	P 值	相关系数 r	P 值
无肥(NF)	0.724	0.004	0.804	<0.001	0.666	0.009	0.711	0.004
化肥(CF)	0.741	0.002	0.769	0.001	0.655	0.011	0.700	0.005
常规(CFM)	0.774	0.001	0.792	0.001	0.668	0.009	0.714	0.004
秸秆(CFS)	0.766	0.001	0.785	0.001	0.672	0.009	0.703	0.005

表 3 不同施肥处理增温潜势及温室气体排放强度比较

Table 3 Comparison of GWP and GHGI under different fertilization

处理 Treatment	平均产量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	$\text{CH}_4\text{-C}/$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$\text{N}_2\text{O-N}/$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	有机碳固定 ^[19] (SOC_{st})/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	GWP ($\text{kg CO}_2\text{-equivalent})\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	GHGI ($\text{kg CO}_2\text{-equivalent})\cdot\text{kg}^{-1}$ grain yield
无肥(NF)	6.65±0.10	38.85±4.27	0.79±0.28	0.15±0.07	3 539±281c	0.53±0.04b
化肥(CF)	6.95±0.10	68.39±6.47	2.66±0.56	0.33±0.03	6 565±767b	0.94±0.11a
常规(CFM)	8.17±0.12	93.27±8.24	3.40±0.67	0.42±0.02	8 957±1 023a	1.10±0.13a
秸秆(CFS)	8.48±0.13	107.43±9.24	2.84±0.59	0.51±0.03	9 734±1 044a	1.15±0.12a

注:同列数值间不同字母表明差异显著($P<0.05$)。

明,淹水-烤田-淹水的管理方法比稻田持续淹水降低甲烷排放30%~40%^[21-22]。彭世彰等依据根层土壤水分作为控制指标,确定灌水时间和灌水定额,采用此控制灌溉技术后水稻田甲烷排放比持续淹水的管理方式降低39%^[23]。进一步研究表明,目前水稻生产过程中所普遍采用的淹水-烤田-淹水-湿润灌溉水分管理方式,甲烷的排放主要集中在烤田前的淹水阶段,这一时期水稻处于旺盛分蘖期^[24-26]。稻田持续淹水,土壤Eh低,促使甲烷大量产生并且释放^[22, 27-28]。本研究中,淹水-烤田-淹水的管理方式使得各处理的甲烷排放均呈现双峰排放格局。

有机物料的施用也是影响稻田甲烷排放的一个重要因素,长期施用有机肥会促进甲烷排放量^[29-31]。本研究中长期施用秸秆/猪粪较单施化肥处理显著提高了甲烷排放。施用秸秆和猪粪,一方面为甲烷的形成提供了源物质,另一方面为水稻生长提供了充足的养分,作物生物量增加且根系活动增强,有利于甲烷的形成和排放。对同一试验田的研究表明,与长期单施化肥相比,长期化肥配施有机肥不仅显著提高了土壤微生物碳氮量,而且提高了土壤微生物的分子多样性^[32]。长期施肥下甲烷氧化菌的基因多样性发生显著变化,表现为有机无机肥料配施较单施化肥处理提高了稻田土壤甲烷氧化菌的多样性和丰富度,具有显著降低稻田甲烷释放潜能^[33-34]。短期(1~3 a)作物秸秆还田试验表明,秸秆还田处理CH₄释放量是不还田处理的2.4~4.3倍^[35-36],而本研究只有1.6倍,刘金剑和Shang等研究也证实有机无机肥配施下CH₄释放量是单施化肥处理的1.4~1.7倍^[29, 37]。充分说明长期有机无机肥配施在保证水稻高产、稳产的同时能够减缓稻田甲烷的释放速率,减少有机肥施用导致大量CH₄释放带来的风险。温度是影响土壤呼吸的重要因素,在本试验中,生态系统甲烷的排放通量与温度在统计上有显著的相关性,但二者的相关性可能受到田间水分管理的影响,即温度的季节变化与土壤水分有逐渐减少相一致。

3.2 二氧化碳排放对长期施肥的响应

二氧化碳也是一种重要的温室气体,其在稻田的排放量远高于甲烷、氧化亚氮等温室气体。土壤呼吸释放CO₂的速率影响土壤碳库的收支平衡。在同样的气候条件下,土壤碳库水平是决定土壤呼吸速率的重要因素。有机肥的施用增加了CO₂产生的源物质从而促进土壤作物系统呼吸释放CO₂速率^[38-41]。较高的土壤有机质含量促进了土壤微生物的生长,提高土壤碳

库的生物有效性从而提高了土壤呼吸作用^[42]。有机肥料的施用于农田土壤是一种有效的增加土壤碳库、减缓温室效应的方法^[43],但同时也会增加土壤呼吸释放CO₂的速率^[44-46]。Chen等25 a长期肥料试验研究表明,稻田连续多年施用畜禽粪便能够增加土壤有机碳含量,但也促使CO₂释放增加10.0~21.5 t·hm⁻²·a⁻¹^[46]。在本研究中,秸秆还田(CFS)、猪粪(CFM)施用均显著增加了稻田生态系统CO₂的释放量,且施用肥料较不施肥料也会提高生态系统呼吸速率。

土壤呼吸不仅是生物化学过程同时也是一个物理学过程,施用有机肥尤其是施用作物秸秆能够显著降低土壤容重增加土壤孔隙度(表1),加速土壤内部产生的CO₂气体向大气环境中释放。

生态系统呼吸释放CO₂速率的季节变化受大气及土壤温度的影响,本研究CO₂排放速率与温度的变化格局相一致(图1),进一步统计分析不同施肥处理下CO₂排放速率均与土壤温度呈显著相关(表3)。温度通过改变土壤内部微生物、酶的活性,地球表层大气扩散、对流速度影响生态系统呼吸^[47-48]。许多研究表明土壤呼吸速率随土壤温度呈指数增加^[49-52]。也有研究发现温度与土壤呼吸释放CO₂的季节和年变化的关系受到土壤水分、土壤培肥、作物生长等的影响。当土壤含水量高于萎蔫系数时,土壤呼吸与土壤温度有很好的相关性^[53]。不同施肥处理下裸土土壤呼吸与温度有极显著的相关性,而有作物根系(玉米)参与时土壤呼吸与温度没有相关性^[54]。我们对同一试验田油菜季土壤呼吸的试验结果表明在一定的温度范围内,土壤呼吸对温度的影响可能会有先升高后降低的趋势^[16]。Piao等也报道当土壤温度高于18℃时玉米生长季土壤呼吸与土壤温度没有相关性^[55]。

3.3 长期施肥对温室气体排放强度(GHGI)的影响

在本研究中,不同施肥处理改变了稻田生态系统的净温室效应。有机物料与化肥配合施用,在增加土壤碳库储量的同时也提高了稻田生态系统的总碳排放通量。但与单施化肥处理未见显著差异,尽管都显著高于不施肥的对照。已经证明有机无机配合施肥下水稻产量显著高于化肥处理,同时氮素的农学效率大为提高^[19]。说明施肥提高了产量,但并没有增加单位产量的碳排放,特别是有机无机配合施肥显著提高了产量,降低了单位产量的氮肥需要量,因而尚存在额外的抵消排放效应。根据李洁静等的估算,有机无机配合施肥下稻田生态系统净碳汇高于单施化肥下约3 t C·hm⁻²·a⁻¹^[56]。联系到郑聚锋等报道的非水稻季土

壤呼吸监测结果,单施化肥处理微生物代谢商显著提高和 Zheng 等报道的实验室培养下有机无机配合施肥降低土壤有机碳矿化和 CO_2 和 CH_4 排放强度^[18,45],我们可以认为有机无机配合施肥比单施化肥总体上可能更有利于稻田生态系统固碳减排。不过,最近 Shang 等对湖南一双季稻田长期不同施肥处理模式净温室气体排放强度的观测提出了 NPK 化肥处理下生态系统净温室气体排放强度显著低于化肥与有机肥配施处理,认为化肥复合施用是农业温室气体减排及保持农业生产能力的推荐农田肥料管理模式^[37]。对于中国集约化农业来说,提高单位面积产量和降低化肥施用量仍然是农业生产和固碳减排必须考虑的首要问题。因此,有机无机配合施肥对于不同地区和不同利用模式的农业生产及固碳减排的影响仍是没有充分认识的问题。

4 结论

长期有机无机肥配施,在提高稻田土壤有机碳储量的同时,显著提高土壤作物系统呼吸速率。整个水稻生育期温室气体排放与土壤、大气温度显著正相关。不同施肥处理甲烷的排放均呈现不对称的“双峰”态势,峰值出现在烤田前后的淹水时期,而 CO_2 排放则表现为单峰分布,峰值出现在烤田期。长期不同肥料施用处理改变甲烷、二氧化碳的排放速率,化肥配施作物秸秆和猪粪比单施化肥处理增加稻田生态系统甲烷和二氧化碳的排放量,但净温室气体排放强度并没有提高。作为高产和提高生态系统功能的主要措施,有机无机施肥仍是值得推荐的农业生产施肥技术途径。当然全面定量这种施肥模式下的温室气体碳排放效应,还需要考虑系统外额外的抵消排放、边际经济效益以及整体的碳汇效应。

参考文献:

- [1] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange of soil carbon and atmospheric CO_2 driven by temperature change[J]. *Science*, 1996, 272 :393–396.
- [2] Ouyang Y, Zheng C. Surficial processes and CO_2 flux in soil ecosystem [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 234 :54–70.
- [3] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[R]// Climate Change 2007 :The physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate, change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [4] IPCC. Agriculture[R]//Metz, B, Davidson, O R, Bosch, P R (Eds.), Climate Change 2007 mitigation, contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA, 2007.
- [5] CAI Zu-cong, XING Guang-xi, YAN Xiao-yuan, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant Soil*, 1997, 196 :7–14.
- [6] HUANG Yao, ZHANG Wen, ZHENG Xun-hua, et al. Modeling methane emission from rice paddies with various agricultural practices[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, D08113.
- [7] ZOU Jian-wen, HUANG Yao, JIANG Jing-yan, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China :effects of water regime, crop residue, and fertilizer application [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19, GB2021.
- [8] 许黎,丁一汇,罗勇,等.中国稻田甲烷排在减少[J].气候变化研究进展, 2005, 1(3) :126–128.
XU Li, DING Yi-hui, LUO Yong, et al. Decreasing emission of methane from rice fields in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(3) :126–128.
- [9] GENG Shu, ZHOU Yi-xing, ZHANG Ming-hua, et al. A sustainable agro-ecological solution to water shortage in the North China Plain (Huanbei Plain)[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2001, 44(3) :345–355.
- [10] YAN Xiao-yuan, YAGI Kazuyuki, AKIYAMA Hiroko, et al. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11 :1131–1141.
- [11] AKIYAMA H, YAGI K, YAN Xiao-yuan. Direct N_2O emissions from rice paddy fields :summary of available data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19, GB105, doi :10. 1029/2004GB002378.
- [12] 王成己,潘根兴,田有国.保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析——基于中国农业生态系统长期试验资料[J].农业环境科学学报, 2009, 28(12) :2464–2475.
WANG Cheng-ji, PAN Gen-xing, TIAN You-guo. Characteristics of cropland topsoil organic carbon dynamics under different conservation tillage treatments based on long-term agro-ecosystem experiments across mainland China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12) :2464–2475.
- [13] 吴乐知,蔡祖聪.基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算[J].生态环境, 2007, 16(6) :1768–1774.
WU Le-zhi, CAI Zu-cong. Estimation of the change of topsoil organic carbon of croplands in China based on long-term experimental data[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6) :1768–1774.
- [14] 黄耀,孙文娟.近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J].科学通报, 2006, 51(7) :750–763.
HUANG Yao, SUN Wen-juan. The trends of changes in organic carbon content of crop land soils of China over the last 2 decades[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7) :750–763.
- [15] 逯非,王效科,韩冰,等.稻田秸秆还田:土壤固碳与甲烷增排[J].应用生态学报, 2010, 21(1) :99–108.
LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Straw return to rice paddy : Soil carbon sequestration and increased methane emission [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1) :99–108.

- [16] 刘晓雨, 潘根兴, 李恋卿, 等. 太湖地区水稻土长期不同施肥条件下油菜季土壤呼吸 CO_2 排放[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2506–2511.
LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, LI Lian-qing, et al. Emission of CO_2 under long-term different fertilization regime during rape growth season in paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2506–2511.
- [17] Raich J W, Bowden R D, Steudler P A. Comparison of two static chamber techniques for determining carbon dioxide efflux from forest soils[J]. *Soil Sci of Soc of Am J*, 1990, 54: 1754–1757.
- [18] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO_2 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 485–494.
ZHENG Ju-feng, ZHANG Xu-hui, PAN Gen-xing, et al. Diurnal variation of soil basal respiration and CO_2 emission from a typical paddy soil after rice harvest under long-term different fertilizations[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 485–494.
- [19] PAN Geng-xing, ZHOU ping, LI Zhi-peng, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131: 274–280.
- [20] ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Quantifying direct N_2O emissions in paddy fields during rice growing season in Mainland China: dependence on water regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 8032–8042.
- [21] Larisha Tyagi, Babita Kumari, S. N. Singh. Water management—A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 1083–1090.
- [22] Kazunori Minamikawa, Naoki Sakai. The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emission from a paddy field in Japan[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 116: 181–188.
- [23] 彭世彰, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田 CH_4 排放规律的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 9–13.
PENG Shi-zhang, LI Dao-xi, XU Jun-zeng, et al. Effect of water saving irrigation on the law of CH_4 emission from paddy field[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 9–13.
- [24] 傅志强, 黄璜, 谢伟, 等. 高产水稻品种及种植方式对稻田甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 3003–3008.
FU Zhi-qiang, HUANG Huang, XIE Wei, et al. Effects of high yielding rice cultivar and cultivation pattern on methane emission from paddy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 3003–3008.
- [25] 上官行健, 王明星, 沈王兴, 等. 我国华中地区稻田甲烷排放特征[J]. 大气科学, 1994, 18(3): 358–365.
SHANGGUAN Xing-jian, WANG Ming-xing, SHEN Ren-xing, et al. The feature of methane emission from a paddy field in the central China Region[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1994, 18(3): 358–365.
- [26] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 600–612.
WANG Ming-xing, LI Jing, ZHENG Xun-hua. Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transportation in the rice fields[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(4): 600–612.
- [27] 蔡祖聪, 沈光裕, 颜晓元, 等. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 145–154.
CAI Zu-cong, SHEN Guang-yu, YAN Xiao-yuan, et al. Effects of soil texture, soil temperature and Eh on methane emissions from rice paddy fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2): 145–154.
- [28] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 冬作季节土地管理对水稻土 CH_4 排放季节变化的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 215–218.
XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of land management in winter crop season on seasonal variations of CH_4 emissions from rice paddy soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 215–218.
- [29] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH_4 的排放[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2879–2886.
LIU Jin-jian, WU Ping-ping, XIE Xiao-li, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2879–2886.
- [30] 李琳, 胡立峰, 陈阜, 等. 长期不同施肥类型对稻田甲烷和氧化亚氮排放速率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 707–710.
LI Lin, HU Li-feng, CHEN Fu, et al. Effects of different long-term fertilization on emission of CH_4 and N_2O from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 707–710.
- [31] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 长期施肥对湖南稻田甲烷排放的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(1): 19–22.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. The effect of long-term fertilization treatment on methane emission from rice fields in Hunan[J]. *Chinese Journal of Agro-meteorology*, 2006, 27(1): 19–22.
- [32] ZHANG Ping-jiu, ZHENG Ju-feng, PAN Gen-xing, et al. Changes in microbial community structure and function within particle size fractions of a paddy soil under different long-term fertilization treatments from the Tai Lake region, China[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 58: 264–270.
- [33] 郑聚锋, 张平究, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4864–4872.
ZHENG Ju-feng, ZHANG Ping-jiu, PAN Gen-xing, et al. Effect of long-term different fertilization on methane oxidation potential and diversity of methanotrophs of paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4864–4872.
- [34] 吕琴, 闵航, 陈中云. 长期定位试验对水稻田土壤甲烷氧化活性和甲烷排放通量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 608–612.
LV Qin, MIN Hang, CHEN Zhong-yun. Effect of long term fertilization on the methane oxidization and the methane emission in paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 608–612.
- [35] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 麦秸还田与土壤耕作对稻季 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2334–2338.
ZHANG Yue-fang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of wheat straw returning and soil tillage on CH_4 and N_2O emissions in paddy

- dy season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2334–2338.
- [36] Ma Jing, Ma Er-deng, XU Hua, et al. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 1022–1028.
- [37] SHANG Qing-yin, YANG Xiu-xia, GAO Cui-min, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02374.x.
- [38] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1028–1035.
- QIAO Yun-fa, MIAO Shu-jie, WANG Shu-qi, et al. Soil respiration affected by fertilization in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1028–1035.
- [39] Singh K P, Ghoshal Nandita, Singh Sonu. Soil carbon dioxide flux, carbon sequestration and crop productivity in a tropical dryland agro-ecosystem: Influence of organic inputs of varying resource quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42: 243–253.
- [40] Enwall Karin, Nyberg Karin, Bertilsson Stefan, et al. Long-term impact of fertilization on activity and composition of bacterial communities and metabolic guilds in agricultural soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 106–115.
- [41] Iqbal Javed, HU Rong-gui, LIN Shan, et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil(Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131: 292–302.
- [42] Galantini J, Rosell R. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean Soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(1): 72–79.
- [43] Ding Wei-xin, Meng Lei, Yin Yun-feng. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 669–679.
- [44] XIAO Yu, XIE Gao-di, LU Chun-xia, et al. The value of gas exchange as a service by rice paddies in suburban Shanghai, PR China[J]. *Agricultural, Ecosystems & Environment*, 2005, 109: 273–283.
- [45] ZHENG Ju-feng, ZHANG Xu-hui, LI Lian-qing, et al. Effect of long-term fertilization on C mineralization and production of CH₄ and CO₂ under anaerobic incubation from bulk samples and particle size fractions of a typical paddy soil[J]. *Agricultural, Ecosystems & Environment*, 2007, 120: 129–138.
- [46] CHEN Yi, WU Chun-yan, SHUI Jian-guo, et al. Emission and fixation of CO₂ from soil system as influenced by long-term application of organic manure in paddy soils[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5(6): 456–461.
- [47] Hill D. Environmental soil physics [M]. San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press, 1998: 291–305.
- [48] Scanlon B R. Soil gas movement in unsaturated systems[M]//Sumner M E. Handbook of soil science, Boca Raton, London, New York, Washington DC: CRC Press, 2000: 277–319.
- [49] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in Picea abies stands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1625–1635.
- [50] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2883–2887.
- ZHANG Qing-zhong, WU Wen-liang, WANG Ming-xin, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883–2887.
- [51] Hsia Y J, Wang C P, et al. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 788–798.
- [52] Fang Chang-ming, Smith P, Moncrieff J B, et al. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature[J]. *Nature*, 2005, 433: 57–59.
- [53] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ flux components in southeastern mixed pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 204: 85–95.
- [54] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 9–15.
- YANG Lan-fang, CAI Zu-cong. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 9–15.
- [55] Piao H C, Wu Y Y, Tong Y T, et al. Soil-released carbon dioxide from microbial biomass carbon in the cultivated soils of karst areas of southwest China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31: 422–426.
- [56] 李洁静, 潘根兴, 张旭辉, 等. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1664–1670.
- LI Jie-jing, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui, et al. An evaluation of net carbon sink effect and cost/benefits of a rice-rape rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1664–1670.