

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

张岳芳¹, 陈留根^{1*}, 朱普平¹, 张传胜², 盛 婧¹, 王子臣¹, 郑建初¹

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.农业部农业机械试验鉴定总站, 北京 100122)

摘 要:对长江下游稻麦两熟农田生态系统 2009—2010 年的 CH₄ 和 N₂O 排放以及土壤碳固定进行了分析,初步研究了秸秆还田对稻麦两熟高产农田净增温潜势的影响。结果表明,秸秆还田对稻麦两熟高产农田周年 CH₄ 和 N₂O 排放总量、土壤碳固定量以及净增温潜势均有显著或极显著影响:秸秆还田条件下周年 CH₄、N₂O 排放总量分别为 394 kg CH₄·hm⁻²、2.39 kg N₂O·hm⁻²,土壤碳固定量、净增温潜势分别为 1.14 t C·hm⁻²、6383 kg CO₂-equivalents·hm⁻²;较秸秆不还田增加 CH₄ 排放总量 152%、减少 N₂O 排放总量 14%、增加土壤碳固定量 531%、增加净增温潜势 57%。以上结果表明,秸秆还田使短期内稻麦两熟高产农田的温室效应明显提高,但其长期效果如何还有待观测。

关键词:秸秆还田;CH₄ 和 N₂O 排放;土壤固碳;增温潜势;稻麦两熟

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)08-1647-07

Preliminary Study on Effect of Straw Incorporation on Net Global Warming Potential in High Production Rice-Wheat Double Cropping Systems

ZHANG Yue-fang¹, CHEN Liu-gen^{1*}, ZHU Pu-ping¹, ZHANG Chuan-sheng², SHENG Jing¹, WANG Zi-chen¹, ZHENG Jian-chu¹

(1.Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.China Agricultural Machinery Testing Center, Beijing 100122, China)

Abstract: Atmospheric carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) are most potent long-lived greenhouse gases that contribute to global warming. Although several agricultural practices are available to targeting a specific greenhouse gas (CH₄ or N₂O) mitigation or soil organic carbon sequestration (SOCS), however, the effects of agricultural managements on global warming potential (GWP) are currently poorly understood. This paper investigated the effect of straw incorporation on annual CH₄ and N₂O emissions, SOCS and net GWP of a high production rice-wheat double cropping system in 2009—2010, in the lower reaches of the Yangtze River. The results showed that annual total CH₄ and N₂O emissions, SOCS and net GWP were significantly influenced by straw incorporation. Annual total CH₄ and N₂O emissions, SOCS and net GWP for straw incorporation were 394 kg·hm⁻², 2.39 kg·hm⁻², 1.14 t C·hm⁻², 6383 kg CO₂-equivalents·hm⁻², respectively. Compared with no straw incorporation, straw incorporation increased annual total CH₄ emissions, SOCS and net GWP by 152%, 531% and 57%, respectively, decreased annual total N₂O emissions by 14%. The results of this preliminary study suggested that straw incorporation could significantly increase greenhouse gases emissions in high production rice-wheat double cropping systems, at least in the short term.

Keywords: straw incorporation; CH₄ and N₂O emissions; SOCS; GWP; rice-wheat double cropping

二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是与全球气候变化关系密切的重要温室气体,由于人类活动的影响,2005 年大气中这 3 种气体的浓度分别

比工业革命前增加了大约 35%、153%和 18%。农业活动每年可向大气排放 5100~6100 Mt CO₂-equivalents, 占全球人为温室气体排放总量的 10%~12%^[1];同时,农业技术的减排潜力巨大,Smith 等^[2]估计,到 2030 年全球农业技术的温室气体减排潜力可达 5500~6000 Mt CO₂-equivalents,其主要通过增加土壤碳固定以及减少 CH₄ 或 N₂O 的排放来实现。研究表明,秸秆还田

收稿日期:2011-12-28

基金项目: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—),男,江苏常熟人,博士,副研究员,主要从事农业生态与资源利用研究。

* 通讯作者:陈留根 E-mail:chenliugen@sina.com

的推广应用是增加我国农田耕层土壤有机碳含量的主要原因之一,秸秆还田可以通过增加土壤有机碳的直接输入实现农田固碳^[1-3]。

稻田是大气 CH₄ 和 N₂O 的重要生物排放源,已有研究证明,秸秆还田在增加稻田土壤碳固定的同时增加了 CH₄ 的排放^[4-9],对 N₂O 的排放也存在影响^[4,6,8-11]。由于 CO₂、CH₄ 和 N₂O 这 3 种温室气体的增温效应不同,只有计算它们的综合温室效应才能全面评价某一农业管理措施对温室效应的贡献^[12-15]。全球增温潜势(GWP)作为一种相对指标常用来估算不同温室气体对气候系统的潜在效应。在 GWP 的估算中,以 CO₂ 作为参考气体,CH₄ 和 N₂O 的排放量通过 GWP 值转换成 CO₂ 的等效量。净增温潜势表示农田排放 CH₄ 和 N₂O 的综合增温潜势与土壤固碳减缓全球变暖的贡献的差值,其正值或负值表示大气温室气体的源或汇^[13]。

稻麦两熟是我国长江流域主要的粮食生产模式之一,2005 年的面积超过 8×10⁶ hm²,实现稻麦两熟农田的可持续高产稳产对于保证地区乃至全国粮食安全至关重要^[16]。秸秆还田是目前稻麦两熟农田普遍盛行的农业措施之一,但稻麦秸秆的施用对周年农田净增温潜势的影响如何未见报道。为此,本试验以长江下游典型稻麦两熟高产农田为对象,初步探讨稻麦秸秆周年全量直接还田对农田净增温潜势的影响,以期评价秸秆还田对农业温室气体排放的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在江苏省常熟市辛庄镇苏州市现代农业(水稻)示范区(31°33'N,120°37'E)进行,该区位于阳澄湖低洼湖荡平原,属亚热带湿润性季风气候,年平均气温为 15.5℃,降水量为 1042 mm,日照 2130 h,太阳辐射 4.94×10⁵ J·cm⁻²,无霜期 242 d,主要实行水稻-冬小麦两熟种植制度。试验开始于 2007 年 11 月冬小麦生长季,稻田土壤类型属乌栅土,试验前 0~20 cm 耕层土壤有机质含量 3.3%,全氮 1.9 g·kg⁻¹,速效氮 113.2 mg·kg⁻¹,速效磷 7.1 mg·kg⁻¹,速效钾 101.4 mg·kg⁻¹,pH 6.3,土壤容重 1.2 g·cm⁻³。

试验设秸秆还田(稻麦秸秆周年全量还田)和秸秆不还田(自然留茬,茬高约 10 cm)2 个处理,3 次重复,每小区面积为 60(5 m×12 m)m²。小麦播种和水稻移栽前均采用旋耕(旋耕机旋地 1 遍,耕深 10~12

cm)翻地。麦季供试品种扬麦 16 号于 2009 年 11 月 16 日播种、2010 年的 6 月 3 日收获,播种量 150 kg·hm⁻²,各处理的施肥量和施肥方法相同,氮肥(尿素,含 N 46.4%)、磷肥(过磷酸钙,含 P₂O₅ 12%)和钾肥(氯化钾,含 K₂O 60%)用量分别为 N 210 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 90 kg·hm⁻²,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施用,每次 50%。基肥的施用时间为 2009 年 11 月 16 日,拔节肥和孕穗肥分别为 2010 年的 3 月 4 日和 4 月 5 日。供试水稻品种为杂交粳稻常优 1 号,2010 年 5 月 25 日播种,6 月 13 日机械插秧移栽(移栽规格为行距 30 cm、株距 13.3 cm,每穴 3 苗),11 月 16 日收获。氮肥、磷肥和钾肥用量分别为 N 240 kg·hm⁻²、P₂O₅ 120 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻²,氮肥按基肥:分蘖肥:长粗肥:穗肥=3:3:2:2 施用,磷肥一次性基施,钾肥作基肥和长粗肥施用,每次 50%,追肥分别于 6 月 20 日、7 月 16 日、7 月 23 日施用。水稻生长期水分管理采用前期浅水(移栽至 7 月 25 日)、中期烤田(7 月 26 日至 8 月 9 日)、后期干湿交替(8 月 10 日至收获前 15 d)的管理模式,其他田间管理措施同一般高产大田。

1.2 CH₄ 和 N₂O 采集与分析

于 2009 年 11 月至 2010 年 11 月冬小麦和水稻生长期进行 CH₄ 和 N₂O 排放的观测。CH₄ 和 N₂O 气体采用静态箱法测定,静态箱底横截面积为 0.25 m² (0.5 m×0.5 m),采样箱由 PVC 材质制成,采样箱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,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 保存于气体采样袋后迅速带回实验室分析。冬小麦生长季每周采气 1 次(春节假日除外),水稻自移栽后第 3 d 起每周采气 2 次,烤田期间 2 d 1 次,抽穗后每周 1 次,采样时间在上午 8:00—10:00。CH₄ 和 N₂O 气体浓度由经改装的 Agilent 7890A 气相色谱测定,CH₄ 检测器为 FID,检测温度 300℃,柱温 60℃,载气为 99.999%高纯氮气,流速 30 mL·min⁻¹;N₂O 检测器为 ECD,检测温度 300℃,柱温 60℃,载气为 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:

$$F = \rho \times h \times dc/dt \times 273 / (273 + T) \quad [13, 15]$$

式中: F 为气体排放通量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); ρ 为标准状态下气体的密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); 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($^{\circ}\text{C}$)。

1.3 土壤样品采集与分析

供试土样分别于2009年11月、2010年11月水稻收获后采集,环刀法测定土壤容重。在田间按蛇形采样法每小区随机采集9点,采样深度为0~20 cm,土样充分混匀后拣去植物残根和石砾等,经风干、磨碎过筛,采用重铬酸钾外加加热法测定土壤有机碳含量。耕层土壤有机碳储量(SOC)计算公式如下:

$$\text{SOC}=\text{conc}\times\rho_b\times A\times T^{[17-18]}$$

式中: conc 为土壤有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); ρ_b 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); A 为面积(hm^2); T 为土壤深度,本研究为0.2 m。

相应的,土壤碳固定(SOCS)计算公式为:

$$\text{SOCS}=\text{SOC}_{2010\text{年}11\text{月}}-\text{SOC}_{2009\text{年}11\text{月}}$$

1.4 农田净增温潜势的计算

全球增温潜势(GWP)是用于定量衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响,本研究中,农田净增温潜势以农田排放 CH_4 和 N_2O 的综合增温潜势与土壤固碳减缓全球变暖贡献的差值来表示^[13]。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倍和298倍^[1],农田净增温潜势GWP($\text{kg CO}_2\text{-equivalent}\cdot\text{hm}^{-2}$)计算公式如下:

$$\text{GWP}=25\times\text{CH}_4+298\times\text{N}_2\text{O}-\text{SOCS}\times44/12$$

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 秸秆还田对甲烷排放的影响

两种秸秆还田方式下小麦生长期间 CH_4 排放通量的季节变化见图1。可以看出,麦季的 CH_4 排放通量较低,并且多次出现负值,秸秆不还田处理的 CH_4 排放通量在 $-76.0\sim150\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,秸秆还田处理的 CH_4 排放通量在 $-50.3\sim154\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,负值的出现可能是大气扩散进入土壤的 CH_4 被甲烷氧化菌还原的量大于土壤自身排放量。麦季 CH_4 平均排放通量秸秆不还田处理大于秸秆还田处理,分别为 20.0 、 $16.6\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (表1)。稻季 CH_4 排放通

量较高(图2),水稻移栽后土壤处于淹水状态, CH_4 排放通量不断增加,两个处理的 CH_4 排放通量均呈先升高后降低的单峰排放趋势,排放峰值出现在7月5日,秸秆不还田处理的 CH_4 排放高峰为 $30.3\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,秸秆还田处理为 $131\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,烤田(7月26日—8月9日)后 CH_4 排放通量始终维持较低水平直至水稻收获。秸秆还田处理的稻季 CH_4 平均排放通量为 $10.5\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,明显大于秸秆不还田处理的 $4.13\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (表1)。

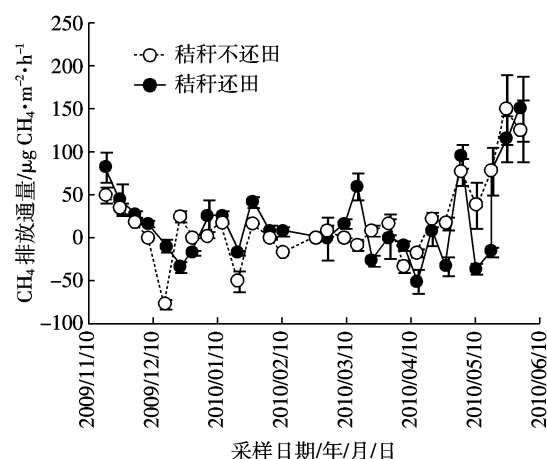


图1 不同秸秆处理麦季 CH_4 排放通量的季节变化

Figure 1 The seasonal variation of CH_4 fluxes during wheat growing season under different straw treatments

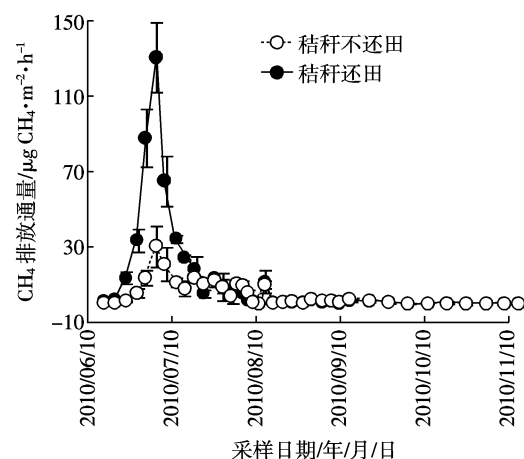


图2 不同秸秆处理稻季 CH_4 排放通量的季节变化

Figure 2 The seasonal variation of CH_4 fluxes during rice growing season under different straw treatments

从 CH_4 累积排放量来看(表1),秸秆还田和不还田处理的 CH_4 排放主要集中在稻季,累积排放量分别占周年排放总量的100%和99%。秸秆还田和不还田处理 CH_4 麦季累积排放量分别为 0.80 、 $0.96\text{ kg CH}_4\cdot\text{hm}^{-2}$,

表 1 秸秆处理对季节 CH₄ 平均排放通量与累积排放量的影响

Table 1 Effects of straw treatments on seasonal mean CH₄ fluxes and CH₄ accumulative emissions

秸秆处理	麦季			稻季			周年排放总量/ kg CH ₄ ·hm ⁻²
	平均排放通量/ μg CH ₄ ·m ⁻² ·h ⁻¹	累积排放量/ kg CH ₄ ·hm ⁻²	累积排放量占 周年百分比/%	平均排放通量/ mg CH ₄ ·m ⁻² ·h ⁻¹	累积排放量/ kg CH ₄ ·hm ⁻²	累积排放量占 周年百分比/%	
秸秆不还田	20.0±3.69a	0.96±0.17a	0.62	4.13±0.63B	155±23.7B	99.4	156±23.9B
秸秆还田	16.6±2.15b	0.80±0.10b	0.20	10.50±2.32A	394±86.9A	99.8	394±87.0A

注:表中各组数据以平均值±标准差来表示;同列数值间不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。下同。

差异达显著水平。两个处理的 CH₄ 稻季累积排放量和周年排放总量存在极显著差异,秸秆还田处理分别为 394、394 kg CH₄·hm⁻²,秸秆不还田处理分别为 155、156 kg CH₄·hm⁻²,秸秆还田比不还田增加 CH₄ 周年排放总量 238 kg CH₄·hm⁻²,增排幅度为 152%。

2.2 秸秆还田对氧化亚氮排放的影响

由 N₂O 排放通量的季节变化曲线可知(图 3),两种秸秆还田方式下稻田周年出现 4 次较为明显的 N₂O 排放高峰,其余时间 N₂O 排放波动很小。麦季的 2 个排放高峰分别出现在施用基肥后 1 个月内和次年的小麦灌浆成熟期,前一次可能是耕作和施用基肥的作用,后一次可能是小麦施用孕穗肥的结果;稻季

N₂O 排放高峰的出现与稻田水分状况关系密切,2 个排放高峰分别出现在水稻烤田断水期和水稻收获前 15 d 的水分落干期。表 2 显示,麦季、稻季 N₂O 累积排放量以及周年排放总量秸秆还田处理分别为 1.64、0.75、2.39 kg N₂O·hm⁻²,秸秆不还田处理分别为 1.93、0.86、2.79 kg N₂O·hm⁻²。处理间 N₂O 麦季累积排放量和周年排放总量的差异达到了显著水平,两个处理麦季的 N₂O 累积排放量及其占周年排放总量百分比均大于稻季,与秸秆不还田相比,秸秆还田处理分别减少麦季、稻季和周年 N₂O 排放 0.29、0.11、0.40 kg N₂O·hm⁻²,减排幅度分别为 15%、13%和 14%。说明稻麦两熟高产农田在采用秸秆周年还田措施后有利于减少 N₂O

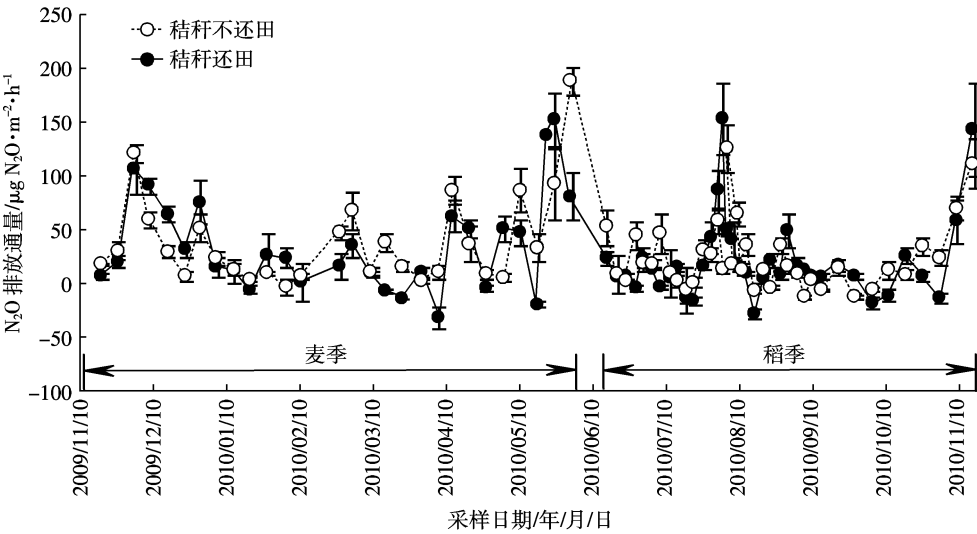


图 3 不同秸秆处理 N₂O 排放通量的季节变化

Figure 3 The seasonal variation of N₂O fluxes under different straw treatments

表 2 秸秆处理对季节 N₂O 平均排放通量与累积排放量的影响

Table 2 Effects of straw treatments on seasonal mean N₂O fluxes and N₂O accumulative emissions

秸秆处理	麦季			稻季			周年排放总量/ kg N ₂ O·hm ⁻²
	平均排放通量/ μg N ₂ O·m ⁻² ·h ⁻¹	累积排放量/ kg N ₂ O·hm ⁻²	累积排放量占 周年百分比/%	平均排放通量/ μg N ₂ O·m ⁻² ·h ⁻¹	累积排放量/ kg N ₂ O·hm ⁻²	累积排放量占 周年百分比/%	
秸秆不还田	40.3±4.16a	1.93±0.20a	69.2	23.0±4.20a	0.86±0.16a	30.8	2.79±0.36a
秸秆还田	34.1±4.35b	1.64±0.21b	68.6	20.1±1.86a	0.75±0.07a	31.4	2.39±0.28b

排放。

2.3 秸秆还田对土壤碳固定和净增温潜势的影响

表 3 表明,秸秆还田明显增加稻麦两熟高产农田土壤碳固定。本试验测定期间(2009 年 11 月至 2010 年 11 月)秸秆还田处理的土壤碳固定为 $1.14 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$,明显高于秸秆不还田处理的 $0.18 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$,秸秆还田的土壤碳固定量比秸秆不还田提高 531%,处理间的差异达到极显著水平。但从农田周年净增温潜势来看,秸秆还田和秸秆不还田处理的净增温潜势分别为 6383 、 $4058 \text{ kg CO}_2\text{-equivalents} \cdot \text{hm}^{-2}$,秸秆还田较秸秆不还田提高 $2325 \text{ kg CO}_2\text{-equivalents} \cdot \text{hm}^{-2}$,增加温室效应 57%,差异达到极显著水平。与秸秆不还田相比,秸秆还田提高稻麦周年产量 $0.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,增产 5%,处理间的产量差异达到显著水平。采用单位产量的净增温潜势这一指标来评价秸秆还田对温室效应的综合影响^[13],结果表明,秸秆还田和秸秆不还田处理单位产量的净增温潜势分别为 $0.37 \text{ kg CO}_2\text{-equivalents} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.25 \text{ kg CO}_2\text{-equivalents} \cdot \text{hm}^{-2}$,前者比后者高约 48%,差异达到极显著水平。这表明,稻麦两熟高产农田在采用秸秆周年还田措施后极大地提高了周年土壤碳固定,但由于 CH_4 排放激增使农田净增温潜势以及单位产量的净增温潜势明显高于秸秆不还田处理,最终导致了温室效应的提高。

3 讨论

秸秆还田具有培肥地力、改善土壤理化性质和提高作物产量等优点^[19-20]。本试验结果也显示,稻麦秸秆周年还田有一定的增产作用(表 3),这有利于该项技术的大面积推广应用,但我们发现秸秆还田后稻季温室气体 CH_4 排放显著增加(表 1),原因是秸秆还田给土壤微生物活动提供了丰富的碳源,使产甲烷菌有了充足的基质,在稻田淹水条件下,大量碳源在促进土壤微生物生长的同时使土壤中的氧被迅速消耗,加速了土壤 Eh 的下降,为产甲烷菌活动创造了适宜的环境条件,最终导致 CH_4 的大量产生和排放^[15]。这与蒋静艳等^[4]、Zou 等^[5]、Ma 等^[6,9]、刘金剑等^[7]、Shang 等^[13]、

蔡祖聪等^[15]以及刘晓雨等^[21]的结果一致,他们均证实秸秆还田会大大促进稻季 CH_4 排放,但是明显不同于李成芳等^[11]的结果,即秸秆还田显著减少稻季 CH_4 排放, CH_4 累积排放量随秸秆施用量的增加而降低。虽然本研究还发现稻麦秸秆周年还田减少了麦季 CH_4 排放,但其减少的量与稻季增排的量相比微乎其微,基本可以忽略不计。

综上所述,如何减少秸秆还田后稻季 CH_4 排放是稻麦两熟高产农田亟待解决的问题。目前,有关秸秆还田对稻田 N_2O 排放影响的报道结果不尽一致。Aulakh 等^[10]、李成芳等^[11]认为秸秆还田会增加稻季 N_2O 排放,而多数研究则表明,秸秆还田减少了稻季 N_2O 排放^[4-6,8-9],这是因为农田 N_2O 主要来自土壤微生物的硝化和反硝化过程,秸秆还田会导致土壤矿质氮的微生物固定,使硝化和反硝化作用的底物减少,从而减少 N_2O 的排放。本研究初步结果表明,与秸秆不还田相比,秸秆还田使稻季 N_2O 排放略减,但未达显著水平,而秸秆还田显著减少了麦季 N_2O 排放,使稻麦两熟高产农田周年 N_2O 排放总量显著减少(表 2)。

从以往的研究来看,无论是短期还是长期试验,秸秆还田是我国农田有机碳增加的主导因素之一^[22-24],土壤固碳速率与秸秆还田量存在显著正相关关系^[25]。逯非等^[12]估算,在全国尺度上,秸秆还田通过稻田土壤固碳对大气 CO_2 的减少效果为 $38.4 \text{ Mt CO}_2\text{-equivalents}$,年秸秆还田量在 $1.27 \sim 7.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,水旱轮作农田的年固碳速率为 $532.6 \sim 873.9 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$;潘根兴等^[24]认为,20 世纪 80 年代以来全国秸秆还田的耕地土壤年固碳速率达到 $0.5 \sim 1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;Pan 等^[26]对太湖地区稻油轮作农田的长期定位试验表明,每年水稻秸秆还田量为 $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤年固碳速率为 $0.51 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$;王振忠等^[27]在对江苏苏南地区稻麦两熟农田研究后指出,秸秆还田量在 $5 \sim 6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,估计当年就可提高土壤有机碳含量 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。本研究初步结果表明,稻麦秸秆周年还田的土壤年固碳速率为 $1.14 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$,极显著高于秸秆不还田的 $0.18 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 3),这与前人^[11-12,14,22-27]关于秸秆还田能提高土壤固碳速

表 3 秸秆处理对周年产量、土壤碳固定和净增温潜势的影响(2009 年 11 月至 2010 年 11 月)

Table 3 Effects of straw treatments on grain yield, soil carbon sequestration and net global warming potential per year

秸秆处理	产量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	土壤碳固定量/ $\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2}$	净增温潜势/ $\text{kg CO}_2\text{-equivalent} \cdot \text{hm}^{-2}$	单位产量的净增温潜势/ $\text{kg CO}_2\text{-equivalent} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ grain yield}$
秸秆不还田	$16.3 \pm 0.67\text{b}$	$0.18 \pm 0.02\text{B}$	4058B	0.25B
秸秆还田	$17.1 \pm 0.72\text{a}$	$1.14 \pm 0.15\text{A}$	6383A	0.37A
差值(秸秆还田-秸秆不还田)	0.81	0.96	2325	0.12

率的结论一致;本文的土壤年固碳速率要高于以往的研究^[12,24,26-27],可能与本试验稻麦产量水平较高导致秸秆还田量较高(约 $17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)有关,还可能与实验地气候条件、土壤条件及农业管理措施等的不同有关^[25]。

由于秸秆还田增排稻田 CH_4 的温室效应对土壤固碳减缓全球变暖效益的抵消作用也非常明显,在评价农田固碳措施的潜力时,应全面考虑温室气体收支^[12]。Shang 等^[13]通过长期定位试验研究了湖南双季稻区早稻秸秆还田(还田量约 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)对农田年净增温潜势的影响,结果显示秸秆还田增加周年净增温潜势 56%;刘晓雨等^[21]的研究表明,太湖地区稻油轮作农田秸秆还田量在 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,水稻生长季农田净增温潜势提高了 48%;李成芳等^[11]则认为,湖北稻油轮作农田水稻生长季净增温潜势有随油菜秸秆还田量增加而减少的趋势。但迄今为止,秸秆还田对稻麦两熟农田净增温潜势的影响尚不清楚。从本研究的初步结果来看,稻麦秸秆周年全量还田的净增温潜势为 $6383 \text{ kg CO}_2\text{-equivalents} \cdot \text{hm}^{-2}$, 极显著高于秸秆不还田的 $2325 \text{ kg CO}_2\text{-equivalents} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增加温室效应 57%, 秸秆还田使单位产量的净增温潜势提高 48% (表 3), 表明稻麦两熟高产农田秸秆还田的土壤固碳减排效益在短期内完全被增排的温室效应所抵消。但这个初步结果是在未计算秸秆其他利用方式(如焚烧等)对温室效应影响的前提下获得的,如何更加全面地评价秸秆还田的温室效应,其方法尚待深入研究。本文只初步研究了秸秆还田对稻麦两熟高产农田净增温潜势影响的短期效应,由此推断秸秆还田肯定会大大增加农田净增温潜势还有一定的不确定性,这有待通过长期定位试验来进一步验证。

4 结论

秸秆还田影响稻麦两熟高产农田的 CH_4 和 N_2O 排放、土壤碳固定以及净增温潜势。稻麦秸秆周年全量还田条件下稻麦两熟高产农田的周年 CH_4 和 N_2O 排放总量、土壤碳固定量以及净增温潜势分别为 $394 \text{ kg CH}_4 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.39 \text{ kg N}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $1.14 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6383 \text{ kg CO}_2\text{-equivalents} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较秸秆不还田增加 CH_4 排放总量 152%、减少 N_2O 排放总量 14%、增加土壤碳固定量 531%、增加净增温潜势 57%。稻麦两熟高产农田采用秸秆还田措施能起到一定的增产作用,但使短期内的温室效应明显提高,其长期效果如何还有待观测。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007—The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC[R]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 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.
- [3] 韩冰,王效科,逯非,等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 612–618.
HAN Bing, WANG Xiao-ke, LU Fei, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 612–619.
- [4] 蒋静艳,黄耀,宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 552–556.
JIANG Jing-yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang. Influence of water controlling and straw application on CH_4 and N_2O emissions from rice field[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 552–556.
- [5] Zou J, Huang Y, Jiang J. 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 Cycle*, 2005, 19, GB2021, doi: 10. 1029/2004GB002401.
- [6] Ma J, Li X, Xu H, et al. Effects of nitrogen fertilizer and wheat straw application on CH_4 and N_2O emissions from a paddy rice field[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(5): 359–367.
- [7] 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): 2878–2886.
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): 2878–2886.
- [8] 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 season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2334–2338.
- [9] Ma J, Ma E, Xu H, et al. Wheat straw management affects CH_4 and N_2O emissions from rice fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 1022–1028.
- [10] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, et al. Denitrification, N_2O and CO_2 fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure[J]. *Biol Fertil Soil*, 2001, 34: 375–389.
- [11] 李成芳,寇志奎,张枝盛,等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2362–2367.
LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, ZHANG Zhi-sheng, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,

- 2011, 30(11):2362-2367.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 韩士杰, 董云社, 蔡祖聪. 中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- HAN Shi-jie, DONG Yun-she, CAI Zu-cong. The biogeochemical process of terrestrial ecosystems carbon cycle in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [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.
- CAI Zu-cong, XU Hua, MA Jing. Methane and nitrous oxide emissions from rice-based ecosystems[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [16] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6):1611-1621.
- YANG Jian-chang, DU Yong, LIU Hui. Cultivation approaches and techniques for annual super-high-yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6):1611-1621.
- [17] Pan G, Li L, Wu L. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003(10):79-92.
- [18] 周萍, 潘根兴, 李恋卿, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制 V. 碳输入与土壤碳固定[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12):4260-4268.
- ZHOU Ping, PAN Gen-xing, LI Lian-qing, et al. SOC enhancement in major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in South China: V. Relationship between carbon input and soil carbon sequestration[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(12):4260-4268.
- [19] 刘巽浩, 高旺盛, 朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- LIU Xun-hao, GAO Wang-sheng, ZHU Wen-shan. Mechanism and techniques in straw application[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001.
- [20] 陈留根, 张宝生, 庄恒扬, 等. 太湖地区稻田保护性耕作条件下水稻生育期土壤肥力的变化[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(6):826-832.
- CHEN Liu-gen, ZHANG Bao-sheng, ZHUANG Heng-yang, et al. Effects of protective tillage of paddy fields on soil fertility under different rice growing stage in Taihu region[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2008, 24(6):826-832.
- [21] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1783-1790.
- LIU Xiao-yu, LI Zhi-peng, PAN Gen-xing, et al. Green gas emission and C intensity for a long-term fertilization rice paddy in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9):1783-1790.
- [22] 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. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7):750-763.
- [23] 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, 等. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题[J]. 科学通报, 2011, 56(26):2162-2173.
- ZHENG Ju-feng, CHENG Kun, PAN Gen-xing, et al. Perspectives on studies on soil carbon stocks and the carbon sequestration potential of China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26):2162-2173.
- [24] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4):609-618.
- PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHANG Xu-hui, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4):609-618.
- [25] 陈泮勤, 王效科, 王礼茂, 等. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- CHEN Pan-qin, WANG Xiao-ke, WANG Li-mao, et al. Carbon budget and its sink promotion of the terrestrial ecosystem in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [26] Pan G, Zhou P, Li Z, 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 Ecosystem and Environment*, 2009, 131:274-280.
- [27] 王振忠, 吴敬民, 陈留根, 等. 稻麦两熟地区秸秆全量直接还田施肥技术的增产培肥效果[J]. 江苏农业学报, 2003, 19(3):151-156.
- WANG Zhen-zhong, WU Jing-min, CHEN Liu-gen, et al. Effects of direct and whole straw manuring method on increasing yield of crop and fertility of soil in rice-wheat double cropping area of Taihu Lake district[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2003, 19(3):151-156.