

# 不同秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室 气体排放的影响\*

张翰林<sup>1,2</sup> 吕卫光<sup>1,2</sup> 郑宪清<sup>1,2</sup> 李双喜<sup>1,2</sup> 王金庆<sup>1,2</sup>  
张娟琴<sup>1,2</sup> 何七勇<sup>1,2</sup> 袁大伟<sup>1,2</sup> 顾晓君<sup>2,3\*\*</sup>

(1. 上海市农业科学院生态环境保护研究所/上海市设施园艺技术重点实验室/上海市农业环境保护监测站 上海 201403;  
2. 农业部上海农业环境与耕地保育科学观测实验站 上海 201403; 3. 上海低碳农业工程技术研究中心 上海 201403)

**摘要** 为揭示稻麦轮作系统不同秸秆还田年限下温室气体排放特征及减排调控机制,本研究采用大田小区试验,考察了稻麦轮作不同秸秆还田年限[空白对照(CK)、常规处理秸秆不还田(NT)、1年秸秆还田(SR1)和5年秸秆还田(SR5)]对CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O 3种温室气体排放规律的影响,同时测定了土壤固碳量,估算了秸秆焚烧产生的温室气体排放量,综合计算了4种处理对全球变暖的贡献。试验结果表明,SR1和SR5均显著提升CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的排放通量,分别高出NT、CK处理73.52%、309.49%和13.29%、13.06%;同时显著降低N<sub>2</sub>O排放通量,较NT降低29.68%和42.55%;但SR1和SR5之间温室气体排放通量差异不显著;与NT相比,SR1和SR5可以显著提高土壤固碳量517.9%和709.03%,SR5土壤固碳量高出SR1达30.93%;NT秸秆焚烧产生的全球气温变暖贡献为9 698.49 kg(CO<sub>2</sub>-eqv)·hm<sup>-2</sup>,比CK高126.98%。综合分析温室气体排放、土壤固碳以及秸秆焚烧3个因素,SR1全球升温贡献最低,显著低于NT 4.72%。短期全量秸秆还田有助于降低总体温室气体排放,长期进行秸秆还田后降低幅度会逐步减小。

**关键词** 温室气体 土壤固碳 秸秆还田年限 稻麦轮作 秸秆焚烧 全球升温贡献

中图分类号: S181 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)03-0302-07

## Effects of years of straw return to soil on greenhouse gas emission in rice/wheat rotation systems

ZHANG Hanlin<sup>1,2</sup>, LYU Weiguang<sup>1,2</sup>, ZHENG Xianqing<sup>1,2</sup>, LI Shuangxi<sup>1,2</sup>, WANG Jinqing<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Juanqin<sup>1,2</sup>, HE Qiyong<sup>1,2</sup>, YUAN Dawei<sup>1,2</sup>, GU Xiaojun<sup>2,3</sup>

(1. Eco-environmental Protection Institute of Shanghai Academy of Agricultural Science / Shanghai Key Laboratory of Horticultural Technology / Environmental Protection Monitoring Station of Shanghai City, Shanghai 201403, China; 2. Agricultural Environment and Farmland Conservation Experiment Station of Ministry of Agriculture, Shanghai 201403, China; 3. Shanghai Low Carbon Agriculture Engineering Technology Research Center, Shanghai 201403, China)

**Abstract** Crop straw is the largest renewable resource on earth but it is often burned after crop harvest, resulting in loss of nutrients and environmental pollution. With current advocate for ecological agriculture, straw return to soil is the most important mode of reutilization of agricultural by-products. This mode is vigorously applied and promoted in rice/wheat rotation system. Research has shown that straw return to soil as a key mode of ecological agriculture affects many aspects of agricultural systems, including soil physical and chemical properties, carbon sequestration in soils, greenhouse gas emissions, etc. Despite this, less research has focused on the effects of different years of straw return to soil on the contributions of agricultural systems to global warming. In this study, field experiment was conducted to determine the effects of different years of straw return to soil (with CK as no straw return without fertilizer; and NT, SR1 and SR5 as 0, 1 and 5 years of straw return with normal fertilization) on greenhouse gases (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and

\* 上海市科学技术委员会基础研究领域项目(13JC1404800)、2014年度上海市农业科学院青年人才成长计划项目[沪农青字(2014)第1-23号]资助

\*\* 通讯作者: 顾晓君, 研究方向为低碳农业。E-mail: gxj@saas.sh.cn  
张翰林, 研究方向为农田碳氮循环。E-mail: zhanghanlinchick@163.com

收稿日期: 2014-09-17 接受日期: 2015-01-06

N<sub>2</sub>O) emissions and soil carbon sequestration in rice/wheat rotation system. Combined with the effects of straw burning on greenhouse gas emissions, the contributions of the four treatments to global warming were comprehensively estimated. Greenhouse gases (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O) emission fluxes from the rice/wheat rotation systems were analyzed using the static chamber gas chromatography method. Greenhouse gases emission fluxes from straw burning were estimated based on published lists of greenhouse gases by IPCC 2006. The results of the study showed that straw return to soil (SR1 and SR5) significantly increased CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission fluxes, which were higher than those of NT by 73.52% and 13.29%, than those of CK by 309.49% and 13.06%, respectively. Straw return to soil also decreased N<sub>2</sub>O emission flux, which was lower than those of NT (29.68%) and CK (42.55%). However, no significant difference was noted between greenhouse gases emissions under SR1 and SR5. Compared with NT, SR1 and SR5 increased one year soil carbon sequestrations respectively by 517.90% and 709.03%. Also soil carbon sequestration under SR5 was higher than that under SR1 by 30.93%. The contribution of straw burning to soil carbon sequestration under NT was 9 698.49 kg(CO<sub>2</sub>-eqv)·hm<sup>-2</sup>, which was higher than that of CK by 126.98%. The combined effects of the three factors (greenhouse gas emission, carbon sequestration and straw burning), the contribution to global warming of SR1 was lowest, significantly lower than that of NT by 4.72%. While full short-term straw return to soil was useful in reducing overall greenhouse gas emission, the range of reduction would decrease with time of full application of long-term straw return to soil.

**Keywords** Greenhouse gas; Soil carbon sequestration; Years of straw return to soil; Rice/wheat rotation; Straw burning; Contribution to global warming

(Received Sep. 17, 2014; accepted Jan. 6, 2015)

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 与人类关系最为密切, 同时也是重要的大气碳源和碳汇。一方面, 大气中 20% 的 CO<sub>2</sub>、70% 的 CH<sub>4</sub> 和 90% 的 N<sub>2</sub>O 来源于农业活动及其相关过程<sup>[1]</sup>; 另一方面, 全球农田也是巨大的碳库, 其碳储量达 170 Pg, 占全球陆地碳储量的 10% 以上<sup>[2]</sup>。

农作物秸秆作为地球上第一大可再生资源, 在农作生产中被大量焚烧, 造成了营养物质流失和严重的环境污染。目前在提倡生态农业的大背景下, 秸秆还田是实现农业资源再利用的最重要途径, 并在稻麦轮作中得到了大力推广与应用<sup>[3]</sup>。已经有很多学者针对稻麦轮作生态系统秸秆还田的增碳动态及温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O)排放机制进行了研究。Ma 等<sup>[4]</sup>研究了麦秸还田对稻田温室气体排放的影响, 认为麦秸还田会显著提高 CH<sub>4</sub> 的排放通量; Wu<sup>[5]</sup>研究显示长期秸秆还田对中国亚热带稻田固碳有较大贡献, 固碳量增加约 50%~100%; Lal<sup>[6]</sup>认为直接向农田输入有机质如秸秆还田, 是提高碳储量的最佳方式, 但同时也会提升温室气体的排放。这些研究均属于对农田系统固碳或温室气体排放分别进行研究, 并没有对于单一系统进行综合研究。逯非等<sup>[7]</sup>采用模型模拟了秸秆还田对土壤固碳和 CH<sub>4</sub> 排放的影响, 但缺乏实测数据进行验证, 迫切需要中长期定位试验对农田生态系统秸秆还田条件下的碳储存/排放进行定量评价。

稻麦轮作是我国主要的粮食生产方式, 也是我国种植面积最大的水旱轮作系统。本研究采用大田小区定位试验, 针对稻麦轮作系统研究不同秸秆还田年限对土壤固碳、秸秆焚烧以及温室气体排放的

影响, 综合考察秸秆还田对全球变暖的贡献, 以期揭示稻麦轮作系统长期秸秆还田条件下碳储存/排放特征及减排调控机制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在上海市农业科学院崇明试验基地进行, 该基地位于上海市崇明岛西部的三星镇(31°41'15"N, 121°54'00"E), 属北亚热带季风气候, 年均降水量 1 003.7 mm, 降水集中在 4—9 月, 年均气温 15.3 °C, 年均积温 2 559.60 °C。试验基地土壤类型为沙夹黄土, 常年采用稻麦两熟轮作制度。

### 1.2 试验设计

本试验共设置 4 个处理, 分别为空白处理(无肥、无秸秆还田, CK)、常规处理(常规施肥、无秸秆还田, NT)、秸秆还田 1 年处理(SR1)和秸秆还田 5 年处理(SR5)(试验从稻季开始算起, 麦季结束为 1 年), 进行大田小区试验, 试验小区为长方形, 面积为 258 m<sup>2</sup> (43 m×6 m), 每个处理设置 3 个重复, 随机区组排列。各施肥处理(NT、SR1 和 SR5)化肥氮施用量一致, 水稻季及麦季纯氮素总施用量分别为 300 kg·hm<sup>-2</sup>、255 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中稻季分别施用基肥(6 月 5 日)180 kg·hm<sup>-2</sup>、分蘖肥(6 月 19 日)60 kg·hm<sup>-2</sup>和穗肥(7 月 15 日)60 kg·hm<sup>-2</sup>, 麦季分别施用基肥(12 月 4 日)170 kg·hm<sup>-2</sup>和追肥(3 月 6 日)85 kg·hm<sup>-2</sup>。种植水稻期田间水分管理方式为淹水—烤田—淹水—湿润。采用收割机进行水稻(或小麦)收割并实现秸秆全量还田。每年稻季、麦季秸秆还田量约为 9 000 kg·hm<sup>-2</sup>、4 800 kg·hm<sup>-2</sup>。先将收割的秸秆移出小区, 待小麦

(或水稻)播种前,将秸秆切割成 10 cm 左右,采用旋耕机旋打 20 cm 的深度进行翻耕。空白处理与常规处理秸秆直接移出小区。试验从 2013 年 6 月 6 日种植水稻开始,于 2014 年 4 月 21 日小麦收获结束。试验采用肥料为三元复合肥(15:15:15),其中碳铵含 N17%,尿素含 N46%,过磷酸钙(颗粒)含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>16%。

### 1.3 样品采集及测定方法

农田温室气体的采集、通量分析采用静态箱-气相色谱法,进行定点温室气体采集,每个处理设置 3 次重复。静态箱内径 50 cm,高 110 cm。试验田安置有机玻璃底座,采样时静态箱扣于底座上,底座边上搭设浮桥供采气时行走。

从作物种植后 2 周开始采集温室气体,大约每 2 周采集 1 次。每块试验田设 1 个测试点,在田块中间设置取样点,为减少试验误差,重复 3 次。自早晨 8:00 开始,4 个处理同时进行气体采集。罩箱后 5 min、10 min、15 min 和 20 min 分别取 60 mL 气体,注入 100 mL 气袋中保存。采集气体的同时记录箱温、土壤温度。采集样品中的 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 浓度由美国安捷伦公司产 GC7890 气相色谱分析仪进行检测, N<sub>2</sub>O 检测器(Electron Capture Detector, ECD, 美国安捷伦公司),检测温度 330 °C, CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 检测器(Flame Ionization Detector, FID, 美国安捷伦公司)检测温度分别为 380 °C 和 200 °C,柱温为 550 °C。

在小麦收获时,采用 S 型取样法,使用柱状取土器采集 0~20 cm 土壤样品,每个处理采集 8 个点进行混合,在室内自然风干,过 100 目筛后测定土壤有机碳,土壤有机碳采用重铬酸钾高温氧化法测定。土壤容重采用环刀法测定。

### 1.4 数据处理

温室气体排放量采用增温潜势(global warming-potential, GWP)进行计算。在过去的 100 a 增温尺度,

CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 的增温系数分别为 1、25 和 298,与其全年排放通量相乘后相加得到增温潜势 GWP [kg(CO<sub>2</sub>-eqv)·hm<sup>-2</sup>],具体公式为:

$$GWP=(25\times CH_4+CO_2+298\times N_2O) \quad (1)$$

进行秸秆还田后,对稻麦轮作系统土壤碳库(soil organic carbon pools, SOCP)的影响通过下式计算:

$$SOCP=SOC\times BD\times H \quad (2)$$

式中: SOC 为土壤有机碳含量, g·kg<sup>-1</sup>; BD 为土壤容重, g·cm<sup>-3</sup>; H 为耕层厚度,取 0.2 m。

为了方便将秸秆还田后农田土壤固碳效果和温室气体的综合增温潜势进行对比,通过公式将土壤固碳(TCS)折算为固持大气 CO<sub>2</sub> 的量:

$$ATCS=TCS\times 44/12 \quad (3)$$

式中: ATCS 表示土壤固碳效果对于减缓全球变暖的贡献,单位为 kg(CO<sub>2</sub>-eqv)·hm<sup>-2</sup>。

试验结果均以每次测得的 3 次重复的平均值±标准差来表示,试验数据采用 Microsoft Excel 和 SPSS 16.0 软件进行统计和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆还田年限对温室气体排放的影响

#### 2.1.1 甲烷(CH<sub>4</sub>)排放特征

稻季试验 CH<sub>4</sub> 排放通量结果显示(图 1a),在稻季从移苗开始后,随着田间蓄水,CH<sub>4</sub> 排放通量逐渐增大。4 种处理 CH<sub>4</sub> 排放通量均自 6 月 29 日开始急剧上升,到 7 月 18 日前后达到峰值,其中 SR1 和 SR5 的峰值为 100~110 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。7 月 20 日水稻进入烤田期,CH<sub>4</sub> 排放通量逐渐下降,至 7 月底烤田结束后,CH<sub>4</sub> 排放通量则急剧下降至 0~10 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,此后水稻开始复水,灌溉以干湿交替为主,CH<sub>4</sub> 排放通量则由于前茬秸秆大部分已腐熟,基本平稳在 0~5 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。

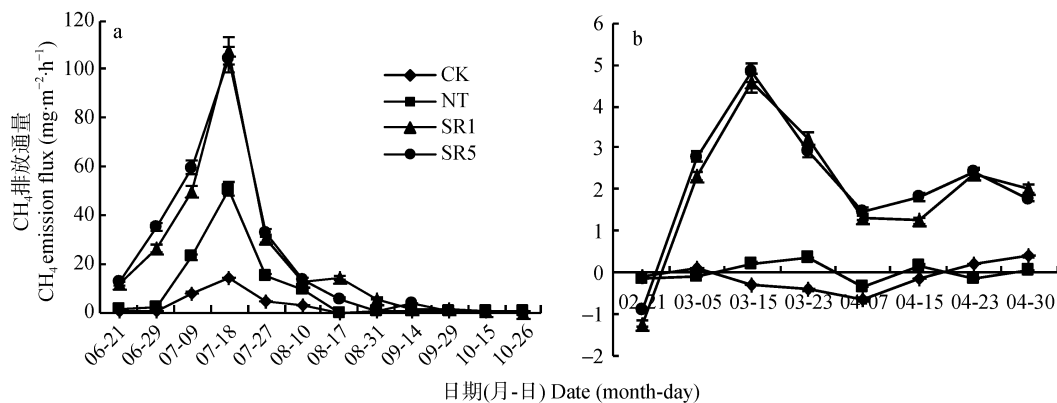


图 1 秸秆还田条件下稻麦轮作系统稻季(a)和麦季(b)甲烷排放通量变化规律

Fig. 1 Variations of CH<sub>4</sub> emission fluxes in rice (a) and wheat (b) seasons of rice/wheat rotation system under straw returning to field CK, NT, SR1 和 SR5 分别指空白处理、常规处理、秸秆还田 1 年处理和秸秆还田 5 年处理,下同。CK, NT, SR1 and SR5 represent blank control, normal treatment, straw returning for 1 year treatment and straw returning for 5 years treatment. The same below.

4 种处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量峰值均在 7 月 18 日出现, SR1 和 SR5 之间无显著差异, 但显著高于 NT 与 CK 对照, 高出 NT 105.31%~112.06%, 且整个稻季的排放量显著高于 CK 和 NT(表 1), 说明秸秆还田在稻季会显著提高 CH<sub>4</sub> 的排放通量。这与前人研究结果相似, 马静等<sup>[8]</sup>对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放情况进行了研究, 认为麦秆直接还田增加了稻田 CH<sub>4</sub> 的排放量。

表 1 秸秆还田条件下稻麦轮作系统甲烷全年排放通量  
Table 1 Annual CH<sub>4</sub> emission flux of rice/wheat rotation system under straw returning to field kg(CH<sub>4</sub>)-hm<sup>-2</sup>

处理 Treatment	稻季排放量 Flux in rice season	麦季排放量 Flux in wheat season	总量 Annual flux
CK	297.36±22.57c	-16.75±1.14c	280.61±16.92c
NT	674.15±41.22b	-11.91±0.98c	662.24±41.94b
SR1	1 049.74±87.15a	48.42±2.56b	1 098.15±74.86a
SR5	1 108.77±94.24a	91.22±7.36a	1 199.99±87.16a

表中数据为 3 个数值的平均值±标准误, 不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下同。Date in the table are mean ± SE. Different letters represent significant difference at P < 0.05. The same below.

麦季的试验结果显示(图 1b), 在 2 月温度较低时, 4 种处理 CH<sub>4</sub> 的排放通量均为负值, 在 3 月份温度升高后, SR1 和 SR5CH<sub>4</sub> 的排放通量均有大幅度提升, 并在 3 月 15 日出现了麦季峰值, 分别为 4.56 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 和 4.81 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, 其中 SR5 麦季 CH<sub>4</sub> 排放量显著高于 SR1, 高出 88.39%, 而 CK 和

NT 则一直在 0 上下浮动, 最终整个麦季 CH<sub>4</sub> 的排放通量均为负值(表 1), 表现为 CH<sub>4</sub> 的汇。

综合稻季和麦季的 CH<sub>4</sub> 排放通量(表 1), SR1 和 SR5 均达到 1 000 kg(CH<sub>4</sub>)-hm<sup>-2</sup>, 2 个处理之间无显著差异, 但显著高于 NT 与 CK, 分别高出 73.52%和 309.49%。

### 2.1.2 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放特征

稻季试验 CO<sub>2</sub> 排放通量结果显示(图 2a), 4 种处理 CO<sub>2</sub> 排放通量均从 6 月移苗后逐步上升, 在 8 月 17 日达到峰值, 在 8 月下旬至收获期, CO<sub>2</sub> 排放通量逐步降低, 大致稳定在 300~700 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。整个稻季 SR1 和 SR5 处理之间无显著差异, 但显著高于 NT 稻季 CO<sub>2</sub> 排放通量(表 2), 分别提高 11.15%和 7.08%。

土壤排放 CO<sub>2</sub> 与很多因素有关, 秸秆还田主要是通过改变农田土壤氮素、碳素循环速率及 pH、Eh 和温度等环境条件、微生物活性等, 影响土壤 CO<sub>2</sub> 的排放通量。诸多研究结果认为, 秸秆还田可以显著提升农田土壤呼吸强度<sup>[9]</sup>。随着秸秆还田量的增多, 土壤呼吸一般也随之加强。强学彩等<sup>[10]</sup>对玉米季、小麦季 3 种不同秸秆还田量的土壤呼吸测定结果显示, 随着秸秆量的增加土壤 CO<sub>2</sub> 释放量增加。但土壤呼吸通量增加的量与秸秆还田量并不是完全正相关。本试验研究证明了这一点, 秸秆还田显著增加了 CO<sub>2</sub> 排放通量, SR1 略高于 SR5, 但不同秸秆还田年限之间并没有显著差异。

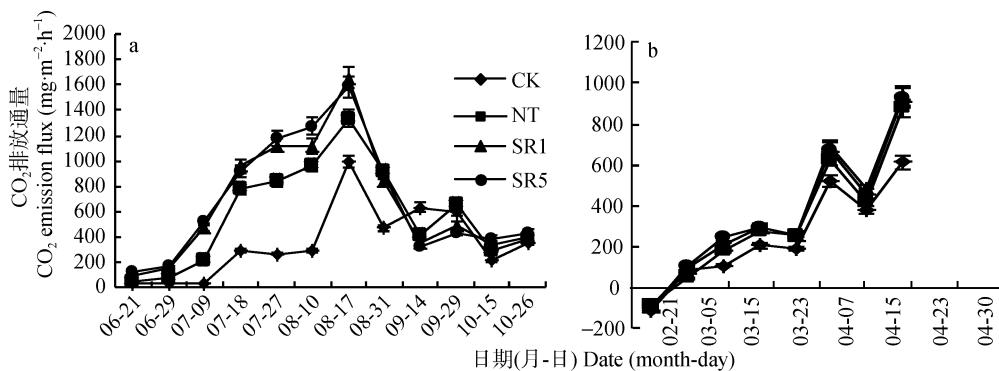


图 2 秸秆还田条件下稻麦轮作系统稻季(a)和麦季(b)CO<sub>2</sub> 排放通量变化规律

Fig. 2 Variations of CO<sub>2</sub> emission fluxes in rice (a) and wheat (b) seasons of rice/wheat rotation system under straw returning to field treatments

麦季试验 CO<sub>2</sub> 排放通量结果显示(图 2b), 4 种处理排放通量变化趋势基本一致, 均从 2 月后大致呈上升趋势, 2 月 21 日 CO<sub>2</sub> 排放通量均为负值, 从 3 月份后成为 CO<sub>2</sub> 排放源。秸秆还田并没有显著影响整个麦季 CO<sub>2</sub> 排放通量, SR1 和 SR5 与 NT 之间无显著差异(表 2)。主要影响因素为气温, 随着温度的升高, CO<sub>2</sub> 排放通量也随之上升。

综合稻季和麦季的 CO<sub>2</sub> 排放通量(表 2), SR1 和

表 2 秸秆还田条件下稻麦轮作系统 CO<sub>2</sub> 全年排放通量  
Table 2 Annual CO<sub>2</sub> emission flux of rice/wheat rotation system under straw returning to field treatments kg(CO<sub>2</sub>)-hm<sup>-2</sup>

处理 Treatment	稻季排放量 Flux in rice season	麦季排放量 Flux in wheat season	总量 Annual flux
CK	1 209.60±92.21c	941.54±91.92b	2 151.14±176.98c
NT	3 606.76±287.92b	1 830.48±153.28a	5 437.25±426.14b
SR1	4 125.45±372.56a	2 034.60±134.15a	6 160.04±524.28a
SR5	4 177.49±312.26a	1 969.97±176.22a	6 147.46±419.27a

SR5 均高于  $6\ 100\ \text{kg}(\text{CO}_2)\cdot\text{hm}^{-2}$ , 2 个处理之间无显著差异, 显著高于 NT, 分别高出 13.29% 和 13.06%。

### 2.1.3 氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )排放特征

稻季试验  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量结果显示(图 3a), 4 种处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量在 8 月 10 日前基本维持在 0 左右, 8 月 17 日迅速升至稻季峰值, 说明烤田期后干湿交替的环境有助于  $\text{N}_2\text{O}$  排放。NT 峰值最大, 达到  $125\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 分别高出 SR1 和 SR5 峰值 37.98% 和 65.63%; 之后除 CK 外, 又在 9 月 14 日出现一个

小峰值, SR5 峰值高于其他处理。但从整个稻季  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量来看(表 3), SR1 显著高于 SR5, 但显著低于 NT, SR1 和 SR5 分别降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放 21.35% 和 36.71%。前人针对秸秆还田对  $\text{N}_2\text{O}$  排放的研究结果并不一致, 蒋静艳等<sup>[11]</sup>认为在连续淹水的稻田环境中, 小麦秸秆施用会抑制  $\text{N}_2\text{O}$  排放。邹国元等<sup>[12]</sup>则认为秸秆还田可能促进土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。本研究显示, 秸秆还田有利于减少稻季农田的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量, 且随着还田年限的增长, 减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放的效果会越来越明显。

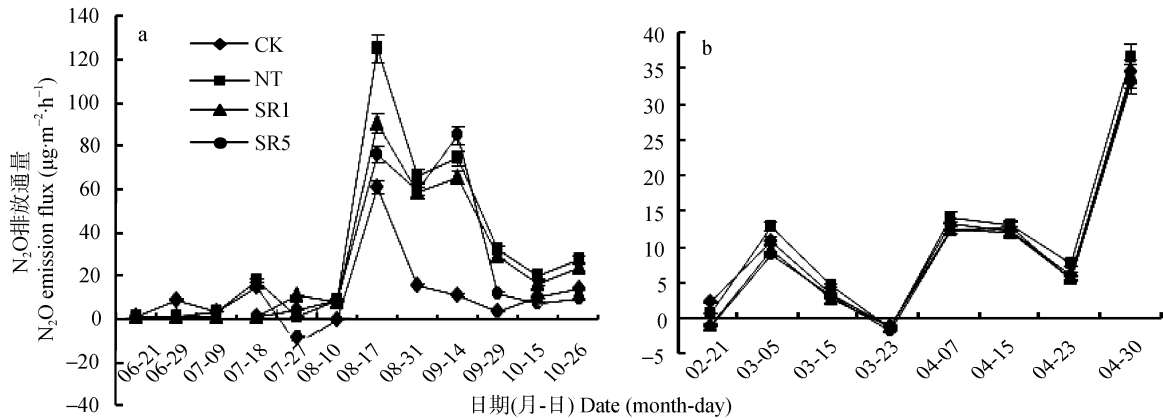


图 3 秸秆还田条件下稻麦轮作系统稻季(a)和麦季(b) $\text{N}_2\text{O}$  排放通量变化规律

Fig. 3 Variations of  $\text{N}_2\text{O}$  emission fluxes in rice (a) and wheat (b) seasons of rice/wheat rotation system under straw returning to field treatments

麦季  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量结果显示(图 3b), 4 种处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量变化趋势基本保持一致, 在 4 月 30 日时达到峰值, NT 峰值最大, 比 SR1 和 SR5 分别高 8.21% 和 10.67%。4 种处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量在其他时间段均维持在  $-2\sim 12\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  之间, 排放量较小。邹建文等<sup>[13]</sup>对常规灌溉稻麦轮作进行研究, 秸秆还田可以减少后季麦田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放; 但持续淹水则并不减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放量。马二登等<sup>[14]</sup>研究发现, 水稻秸秆表面覆盖可以显著提升麦田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量, 均匀混施和原位焚烧则会显著减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放量。本研究表明翻耕全量秸秆还田可以显著降低麦季  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量(表 3), SR1 和 SR5 相较 NT 分别降低 40.91% 和 50.00%, 不同秸秆还田年限之间并无显著差异。

表 3 秸秆还田条件下稻麦轮作系统  $\text{N}_2\text{O}$  全年排放通量

Table 3 Annual  $\text{N}_2\text{O}$  emission flux of rice/wheat rotation system under straw returning to field treatments  $\text{kg}(\text{N}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	稻季排放量 Flux in rice season	麦季排放量 Flux in wheat season	总量 Annual flux
CK	0.32±0.03d	1.01±0.09a	1.33±0.11c
NT	1.08±0.04a	0.93±0.07a	2.01±0.15a
SR1	0.89±0.07b	0.66±0.01b	1.55±0.10b
SR5	0.79±0.02c	0.62±0.04b	1.41±0.12bc

综合稻季和麦季的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量(表 3), SR1 和 SR5 均显著低于 NT, 分别降低 29.68% 和 42.55%, 2 个处理之间无显著差异。

### 2.2 不同秸秆还田年限对土壤固碳的影响

采用不同的农田管理措施, 秸秆还田产生的土壤固碳效果并不一致。曾研华等<sup>[15]</sup>研究表明, 单纯水稻秸秆还田并不能显著提高土壤总有机碳的含量, 在配施化肥后土壤活性有机碳含量则明显增加; 但在无肥区则出现相反趋势, 不还田的土壤有机碳含量较高, 这可能是因为土壤微生物与植株根系争肥现象不明显所导致。陈尚洪等<sup>[16]</sup>认为秸秆还田条件下, 免耕、翻耕和旋耕三者中, 旋耕处理土壤有机碳含量和有机碳密度均为最高, 而免耕为最低。

本研究结果显示(表 4), 秸秆还田可以有效提高土壤固碳量, 这符合逯非等<sup>[7]</sup>的研究结果, 秸秆还田具有可观的土壤固碳潜力。SR1 和 SR5 比 NT 显著提高土壤固碳量 517.90 和 709.03%, SR5 单年土壤固碳量增加高于 SR1, SR5 土壤固碳量高出 SR1 达 30.93%。表明长期秸秆还田依然可以增加土壤有机碳, 且增长幅度有所提高。

### 2.3 不同秸秆还田年限对全球变暖贡献的影响

根据 2006 IPCC 公布的温室气体清单<sup>[17]</sup>, 水稻秸

表 4 不同秸秆还田处理对稻麦轮作系统土壤固碳的影响  
Table 4 Effects of different straw returning to field treatments on soil carbon sequestration of rice/wheat rotation system

处理 Treatment	土壤有机碳含量 Soil organic carbon content (g·kg <sup>-1</sup> )		土壤固碳量 Soil carbon sequestration (kg·hm <sup>-2</sup> )
	2013 年稻季种植前 Before rice season in 2013	2014 年麦季结束后 After wheat season in 2014	
	CK	16.21±1.05	
NT	16.21±1.05	16.55±1.91c	820±31c
SR1	16.21±1.05	17.72±1.73b	3 831±194b
SR5	17.63±1.23	19.42±1.57a	5 016±127a

秆燃烧排放因子: CO<sub>2</sub> 656.27 g·kg<sup>-1</sup>、CH<sub>4</sub> 2.19 g·kg<sup>-1</sup>、N<sub>2</sub>O 0.11 g·kg<sup>-1</sup>; 小麦秸秆燃烧排放因子: CO<sub>2</sub> 586.39 g·kg<sup>-1</sup>、CH<sub>4</sub> 2.22 g·kg<sup>-1</sup>、N<sub>2</sub>O 0.05 g·kg<sup>-1</sup>。

本试验 SR1 和 SR5 采用稻麦秸秆全量还田, 故燃烧秸秆为 0。本试验中 CK 与 NT 全部秸秆采用燃烧的方法处理, 根据秸秆的产量和秸秆燃烧排放因

子计算燃烧秸秆对温室气体排放的贡献。由表 5 可知, 秸秆还田有助于提高产量, 但同时也增加了秸秆产量, SR1 和 SR5 在稻季和麦季均提高了秸秆产量。NT 在燃烧秸秆后会造大量的温室气体排放, 达到 9 698.49 kg(CO<sub>2</sub>-eqv)·hm<sup>-2</sup>。同时在 IPCC 的温室气体清单中, 除去 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 这 3 种温室气体外, 还有 CO, 其水稻和小麦燃烧因子分别为 44.12 g·kg<sup>-1</sup> 和 22.19 g·kg<sup>-1</sup>, CO 较易进一步生成 CO<sub>2</sub>, 故实际燃烧秸秆可能会生成更多的温室气体。

将每种处理的温室气体排放贡献减去土壤固碳量, 再加上秸秆燃烧的贡献, 最终得出 4 种处理对全球变暖的贡献(表 5)。由表 5 可知, 秸秆还田会增加温室气体排放, 增加土壤固碳, 但从总体上看秸秆还田对减缓全球变暖还是优于常规处理, 其中 SR1 显著低于 NT, 比 NT 降低 4.72%。SR5 略低于 NT, 但两种处理并无显著差异。

表 5 不同秸秆还田处理稻麦轮作系统的秸秆产量和对全球变暖的贡献

Table 5 Straw yield and global warming contribution of rice/wheat rotation system under different straw returning to field treatments

处理 Treatment	秸秆产量 Straw yield (kg·hm <sup>-2</sup> )		温室气体排放 Greenhouse gas emission [kg(CO <sub>2</sub> -eqv)·hm <sup>-2</sup> ]	土壤固碳 Soil carbon sequestration [kg(CO <sub>2</sub> -eqv)·hm <sup>-2</sup> ]	秸秆焚烧 Combustion emissions of straw [kg(CO <sub>2</sub> -eqv)·hm <sup>-2</sup> ]	对全球变暖的贡献 Contribution to global warming [kg(CO <sub>2</sub> -eqv)·hm <sup>-2</sup> ]
	稻季 Rice season	麦季 Wheat season				
CK	3 859.16±20.82c	2 135.28±81.12b	9 562.75±726.85a	-168±12d	4 272.87±12b	14 003.62±102.24c
NT	8 906.29±31.09b	4 680.33±141.91a	22 591.79±1 278.22c	820±31c	9 698.49±31a	31 670.29±349.47a
SR1	9 125.38±44.05ab	4 793.57±112.73a	34 074.26±2 115.18b	3 831±194b	0c	30 243.26±278.98b
SR5	9 211.54±92.36a	4 825.19±132.57a	36 567.12±1 986.24b	5 016±127a	0c	31 551.12±127.33a

### 3 结论

本研究显示, 秸秆还田可以显著提升 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放通量, 平均分别比不还田的常规栽培(NT)高 73.52%和 13.29%, 同时显著降低 N<sub>2</sub>O 排放通量, 较 NT 降低 29.68%和 42.55%, 这与前人研究结果相仿<sup>[3,7]</sup>; 而秸秆还田 1 年和 5 年处理之间温室气体排放通量差异不显著, 说明秸秆还田年限对土壤温室气体排放影响不大; 土壤固碳结果表明, 1 年和 5 年秸秆还田处理土壤固碳量显著高于 NT 处理, 分别高 517.90%和 709.03%, 而 SR5 土壤固碳量高出 SR1 达 30.93%, 长期秸秆还田依然有较大的固碳潜力。综合分析温室气体排放、土壤固碳以及秸秆焚烧 3 个因素, SR1 全球升温贡献最低, SR5 与 NT 之间无显著性差异。短期全量秸秆还田有助于降低总体温室气体排放, 长期进行秸秆还田后降低幅度会逐步减小, 应针对不同还田年限的农田采用不同措施处理, 进行秸秆间断还田或者部分还田可能有助于增

加农田碳汇。

秸秆还田增加温室气体排放的同时, 也增加土壤碳汇, 不同还田年限对二者的平衡有较大的影响, 应如何采取调控手段才能达到农田土壤固碳减排的双赢作用? 本研究采用稻麦轮作系统作为研究对象, 其氧化-还原交互变化特殊的物理化学环境是否对试验结果有特殊影响或耦合机制, 这些问题仍需要进行系统的研究。

### 参考文献

- [1] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-285  
Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farmland ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(2): 278-285
- [2] 张国盛, 黄高宝, Yin C. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 351-357  
Zhang G S, Huang G B, Yin C. Soil organic carbon sequestration potential in cropland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,

- 25(2): 351–357
- [3] 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 C F, Kou Z K, Zhang Z S, 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
- [4] Ma J, Ma E, Xu H, et al. Wheat straw management affects CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 1022–1028
- [5] Wu J. Carbon accumulation in paddy ecosystems in subtropical China: Evidence from landscape studies[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 29–34
- [6] Lal R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22(2): 151–184
- [7] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷减排[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99–108  
Lu F, Wang X K, Han B, 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
- [8] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 墒沟埋草对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 27–31  
Ma J, Xu H, Cai Z C, et al. Influence of wheat straw buried in ditches on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4): 27–31
- [9] 叶文培, 王凯荣, Johnson S E, 等. 添加玉米和水稻秸秆对淹水土壤 pH、二氧化碳及交换态铵的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 345–350  
Ye W P, Wang K R, Johnson S E, et al. Effects of maize and rice straw amendment on the pH, CO<sub>2</sub>, and exchangeable NH<sub>4</sub><sup>+</sup> of submerged soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 345–350
- [10] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO<sub>2</sub> 释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 469–472  
Qiang X C, Yuan H L, Gao W S. Effect of crop-residue incorporation on soil CO<sub>2</sub> emission and soil microbial biomass[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 469–472
- [11] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 552–556  
Jiang J Y, Huang Y, Zong L G. Influence of water controlling and straw application on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice field[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 552–556
- [12] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47–50  
Zou G Y, Zhang F S, Chen X P, et al. Effect of straw addition on denitrification in upland soil[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(6): 47–50
- [13] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4): 409–414  
Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. Effects of water regime and straw application in paddy rice season on N<sub>2</sub>O emission from following wheat growing season[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(4): 409–414
- [14] 马二登, 马静, 徐华, 等. 秸秆还田方式对麦田 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 土壤, 2007, 39(6): 870–873  
Ma E D, Ma J, Xu H, et al. Effects of rice straw returning methods on N<sub>2</sub>O emissions from wheat-growing season[J]. *Soils*, 2007, 39(6): 870–873
- [15] 曾研华, 吴建富, 潘晓华, 等. 不同稻草还田方式下土壤碳库管理指数的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(30): 77–81  
Zeng Y H, Wu J F, Pan X H, et al. Study on soil C pool management index of straw returning to field in different ways[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(30): 77–81
- [16] 陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 806–809  
Chen S H, Zhu Z L, Liu D H, et al. Influence of straw mulching with no-till on soil nutrients and carbon pool management index[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 806–809
- [17] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. General Guidance and Reporting of Intergovernmental Panel on Climate Chapter 4. 2006: 89–90