

靳红梅, 沈明星, 王海候, 等. 秸秆还田模式对稻麦两熟农田麦季 CH_4 和 N_2O 排放特征的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 333-339.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.02.015

秸秆还田模式对稻麦两熟农田麦季 CH_4 和 N_2O 排放特征的影响

靳红梅^{1,2}, 沈明星³, 王海候³, 陆长婴³, 常志州^{1,2}, 郭瑞华¹

(1.江苏省农业科学院循环农业研究中心/江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心, 江苏 南京 210014; 2.农业部长江中下游平原农业环境重点实验室, 江苏 南京 210014; 3.江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏 苏州 215155)

摘要: 为了探讨不同秸秆还田模式下稻麦两熟农田麦季 CH_4 和 N_2O 的排放规律, 以江苏省南部地区稻麦两熟农田为研究对象, 进行了 8 年不同秸秆还田模式[即仅麦季稻秸秆还田处理(R)、仅稻季麦秸秆还田(W)和稻麦季秸秆均还田(RW)]的田间定位试验, 采用静态箱-气相色谱法分析各处理麦季田间 CH_4 和 N_2O 的排放特征。结果表明, 与秸秆不还田对照(CK)相比, 秸秆还田可增加麦季 CH_4 和 N_2O 的排放通量。各处理间 CH_4 的累积排放量大小为 R 处理>RW 处理>W 处理>CK 对照, 麦季 N_2O 的累积排放量大小为 W 处理>R 处理>RW 处理>CK 对照。各秸秆还田模式(R、W、RW)下, 麦季 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势(GWP)分别为 1 225.5 kg/hm², CO₂-eq、1 250.9 kg/hm², CO₂-eq 和 1 214.5 kg/hm², CO₂-eq, 均显著($P<0.05$)高于秸秆不还田的 1 068.5 kg/hm², CO₂-eq。各处理间的单位产量 GWP 表现为 RW 处理>W 处理>R 处理>CK 对照, 稻麦秸秆均全量还田对气候变化的影响最大。 N_2O 对总增温潜势的贡献率大于 95%, 是麦季减排的主要对象。从对气候变化影响的角度考虑, 建议秸秆单季还田时采用稻秸秆全量还田。

关键词: 秸秆还田模式; 麦季; CH_4 ; N_2O ; 排放特征

中图分类号: X71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)02-0333-07

Influence of straw returning patterns on methane and nitrous oxide emission during wheat-growing season in a rice-wheat double cropping system

JIN Hong-mei^{1,2}, SHEN Ming-xing³, WANG Hai-hou³, LU Chang-ying³, CHANG Zhi-zhou^{1,2}, GUO Rui-hua¹

(1. Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 3. Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, China)

Abstract: In order to investigate methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emission fluxes under different straw returning patterns, an 8-year field trial in Suzhou, typical rice-wheat double cropping region in southern area of Jiangsu province, was conducted using static chamber-gas chromatograph technique in situ. Straw returning patterns were rice straw returning (R), wheat straw returning (W), both rice straw and wheat straw returning (RW) and no straw returning treatment (CK). The results showed that total CH_4 and N_2O emissions in straw returning treatments were significantly ($P<0.05$) higher than those in CK treatment, but the changes between the three straw returning patterns were not distinct. Total CH_4 emissions under different treatments

收稿日期: 2016-10-20

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(12)1002]

作者简介: 靳红梅(1982-), 女, 河北吴桥人, 博士, 副研究员, 主要从事农业废弃物资源化利用和环境影响评价研究。(Tel) 025-84390238; (E-mail) hmjin@jaas.ac.cn

ment (CK). The results showed that total CH_4 and N_2O emissions in straw returning treatments were significantly ($P<0.05$) higher than those in CK treatment, but the changes between the three straw returning patterns were not distinct. Total CH_4 emissions under different treatments

followed the order of $R > RW > W > CK$, while $W > R > RW > CK$ for the total N_2O emission during the whole wheat-growing season. Global warming potentials (GWPs) for treatments of R, W and RW were $1\,225.5\text{ kg/hm}^2, CO_2\text{-eq}$, $1\,250.9\text{ kg/hm}^2, CO_2\text{-eq}$ and $1\,214.5\text{ kg/hm}^2, CO_2\text{-eq}$, respectively, which were significantly ($P < 0.05$) higher than that of CK treatment [$1\,068.5\text{ kg/hm}^2, CO_2\text{-eq}$]. The yield-scaled GWPs between treatments followed the order of $RW > W > R > CK$, showing that both rice straw and wheat straw returning pattern had the most significant impact on climate change during wheat-growing season. The contribution rates of N_2O to GWPs were more than 95% for all straw returning treatments, indicating that N_2O was the main objection for greenhouse gas reductions during wheat-growing season. Given that R treatment had the least GWP, rice straw returning pattern should be recommended for one-season straw returning application.

Key words: straw returning pattern; wheat-growing season; CH_4 ; N_2O ; emission characteristics

稻麦两熟是中国长江下游地区农田的重要种植生产模式之一,也是江苏省最主要的粮食生产模式^[1-2]。稻麦轮作农田年均秸秆产生量高达 16.5 t/hm^2 ^[3],如何有效处置与利用稻麦秸秆,不仅是当前社会关注的热点问题之一,也是各级政府面临的难点问题^[4]。

目前,秸秆还田是江苏稻麦两熟区大力推广的农业措施,也是解决秸秆出路并实现秸秆资源有效利用的最重要途径之一^[4]。大量研究表明,秸秆还田具有改善土壤结构^[5]、增加土壤有机质积累量^[6-7]、提高土壤酶活性^[8-9]、提高作物产量和改善品质^[10-11]等积极作用。但秸秆还田后输入的新鲜有机质^[6],也可能大大增加农田温室气体排放量^[12-14]。 CH_4 和 N_2O 是与全球气候变化关系最密切的温室效应气体^[15],其单位质量的全球增温潜势(GWP)分别是 CO_2 的25倍和298倍(100 a尺度)^[16]。

稻麦秸秆还田对农田温室气体排放影响的研究已有大量报道,部分结果表明秸秆还田可以增加农田 CH_4 和 N_2O 的排放量^[12-14,17],但也有相反结果^[18]。造成这一差异的主要原因是不同研究试验设计中的还田量、还田模式和还田时间不尽相同。此外,目前研究主要针对秸秆还田后稻田温室气体排放,特别是对稻季 CH_4 排放影响的研究较多^[12-14,17,19],而麦季由于农田管理措施的差异,其 CH_4 排放量虽然较少,但 N_2O 排放却占主导地位,其对环境的影响值得关注^[20]。从长远利益和国家需求视角出发,探明稻麦两熟农田麦季 CH_4 和 N_2O 的排放特征,对选择合理的还田技术,最大限度地避免秸秆还田可能产生的负面环境效应具有重要意义。

本试验以长江下游典型稻麦两熟农田为研究对象,拟通过8年连续田间定位试验,研究秸秆稻麦季均还田、仅麦秸秆稻季还田、仅稻秸秆麦季还田等秸

秆还田模式下麦季 CH_4 和 N_2O 的排放特征,以期为麦田温室气体排放量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 试验区概况

试验区位于江苏省苏州市现代农业(水稻)示范区($31^\circ 27' 45'' N, 120^\circ 25' 57'' E$)。该地区属于北亚热带季风气候,年日照时数3 039 h,降雨量1 128 mm,平均温度 $15.7\text{ }^\circ C$,有效积温($> 10.0\text{ }^\circ C$)4 947.0 $^\circ C$ 。秸秆还田模式定位试验开始于2007年6月水稻生长季,试验土壤类型属壤质黄泥土,本底值0~20 cm耕层土壤有机质含量33.0 g/kg,全氮含量1.7 g/kg,碱解氮含量111.2 mg/kg,有效磷含量35.3 mg/kg,速效钾含量82.0 mg/kg, pH6.12,土壤容重 1.1 g/cm^3 。种植制度为水稻-小麦轮作。

1.2 试验设计

试验设置3个秸秆连续定位还田模式:稻、麦秸秆周年连续全量还田(RW)、水稻秸秆连续全量还田(R)、小麦秸秆连续全量还田(W),以不还田为对照(CK)。每个处理重复3次。处理小区面积为 32.5 m^2 ($5.5\text{ m} \times 6.5\text{ m}$)。秸秆为试验田上茬收获的作物秸秆,还田前均进行5~10 cm机械粉碎。秸秆还田量及还田方式为:水稻生产季的麦秸(碳、氮含量分别为46.50%和0.48%)还田量为 4.5 t/hm^2 ,旋耕还田;小麦生产季的稻秸(碳、氮含量分别为42.30%和0.72%)还田量为 6.0 t/hm^2 ,直接覆盖还田。试验田种植水稻品种为苏香粳1号,5月中旬播种,6月下旬人工移栽,移栽规格为行距23.3 cm、株距13.3 cm,每穴3苗,10月28日左右收获。小麦品种为扬麦系列(2008-2010年为扬麦19号、2011-2015年为扬麦22号),在上茬水稻收获前10

d 左右套播,播种量为 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$,5 月底收获。

试验自 2007 年稻季开始实施。各处理氮肥(纯氮)、磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)用量分别为 $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $90 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$,氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3 施用,磷肥一次性作基肥施入,钾肥作基肥和穗肥施用,每次 50%,分蘖肥和穗肥分别于 6 月 27 日、8 月 6 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^[19]。

本研究选取 2015 年麦季的试验数据为研究对象。2015 年供试小麦品种为扬麦 22 号,2015 年 10 月 29 日播种,播种量为 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$,2016 年 5 月 29 日收获,生育期为 212 d。田间管理措施同一般高产大田。生长季内降水及温度变化见图 1。

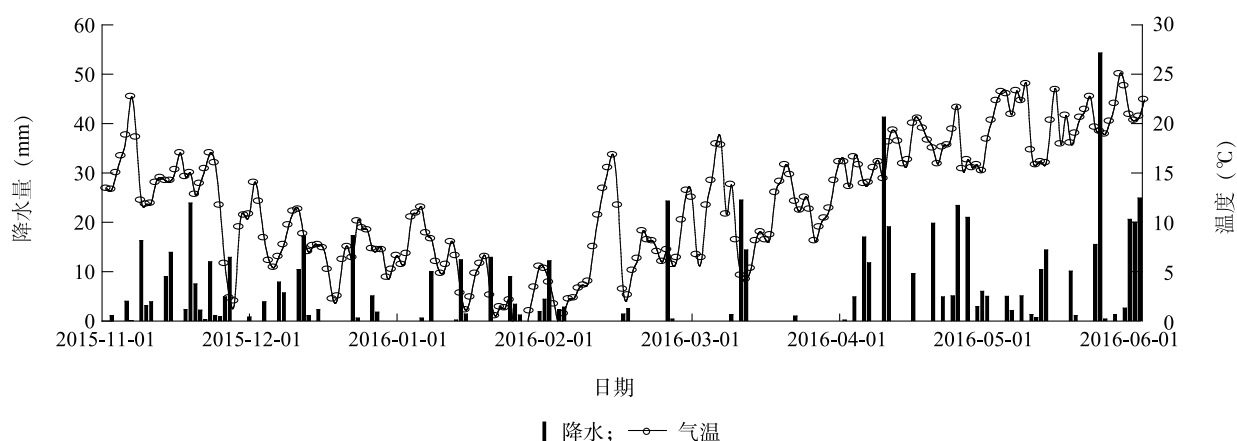


图 1 小麦生长季内降水及气温变化

Fig.1 Changes of precipitation and air temperature during the growing season of wheat

1.3 取样及测定方法

于 2015 年小麦播种后 30 d 开始对小麦生长期 CH_4 和 N_2O 气体的排放特征进行观测。气体样品的采集采用静态箱法。静态箱由 PVC 材质制成,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。底横截面积为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,埋入地下约 15.0 cm 深处,每个小区固定采样底座 3 个。底座上部有 5.0 cm 深的凹槽,测定时加水密封。静态箱总高 1.2 m,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和温度计,便于采集气体样品,并记录箱内温度。

气体采样频率为 7 d 1 次,采样时间在上午 8:00–11:00。采样时将静态箱罩在注满水的底座上,密封后按 0 min、10 min、20 min、30 min 的时间间隔用 50.00 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 50.00 ml 保存于气体采样袋(0.05 L,大连德霖气体包装有限公司产品)中,同时记录箱内温度。各小区共采样 3 次,采样后 24 h 内带回实验室分析。

CH_4 和 N_2O 气体体积分数用带有 ^{63}Ni 电子捕获检测器的 Agilent 7890A 气相色谱测定。 CH_4 检测器为 FID,检测温度为 300°C ,柱温 60°C ,载气为 99.999% 的高纯氮气,流速 $30 \text{ ml}/\text{min}$ 。 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(95.000% 氩气+ 5.000% 甲烷),流速 $40 \text{ ml}/\text{min}$ 。气体排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{d_c}{d_i} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中, F [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] 为气体排放通量, ρ (kg/m^3) 为标准状态下气体的密度, V (m^3) 是采样箱的净体积, A (m^2) 为横截面积, d_c/d_i (ppm/h) 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 ($^\circ\text{C}$) 为采样过程中采样箱内的平均温度。

2016 年 5 月底小麦收获后,每个小区按“S”形采集 0~20 cm 土层的土壤,风干后过筛(100 目)。土壤总有机碳含量(SOC)采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化外加热法测定^[21],总氮含量(TN)采用凯氏定氮仪(海能仪

器有限公司产品)测定。所有土壤均以秸秆不还田处理为对照。

1.4 数据分析

CH_4 和 N_2O 的日排放通量用 3 个重复的平均值及标准误来表示,其累积排放量是将 3 个重复的排放速率按时间间隔加权,计算公式如下:

$$T = \sum \left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (D_{i+1} - D_i) \times 24 / 10^5 \quad (2)$$

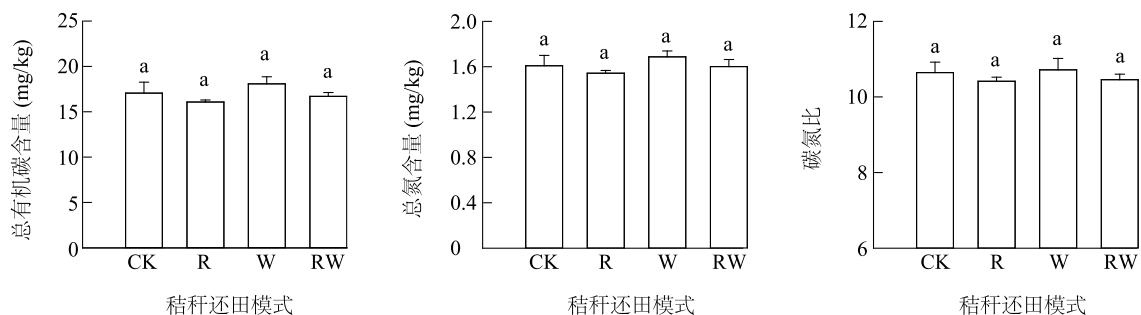
式中, $T(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 为 CH_4 或 N_2O 季节排放总量, $F_i[\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 和 $F_{i+1}[\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次采样时的平均排放通量, $D_i(\text{d})$ 和 $D_{i+1}(\text{d})$ 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次采样时间, $24(\text{h}/\text{d})$ 为 1 d 的小时数, 10^5 为单位转换系数。

不同处理间 CH_4 和 N_2O 排放差异采用单因素方差分析 (ANOVA), 多重比较采用最小显著差法 (LSD), 数据分析软件为 SPSS 13.0v。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田模式下土壤理化性状

秸秆还田会造成土壤结构和透气性的变化,进而可能影响土壤温度^[22]。本研究中,小麦生长季内各处理 0~5 cm 土层温度基本一致(图 2)。大量研究表明,土壤温度是影响温室气体排放的主要因素之一^[13-14]。本研究中各处理间的温度变化基本相同,因此,温度对各处理间 CH_4 和 N_2O 排放差异的影响可以忽略。



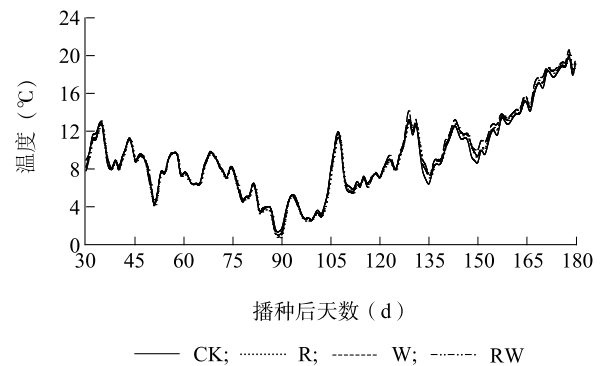
CK、R、W、RW 见图 2 注。

图 3 麦季 0~20 cm 土层土壤总有机碳含量、总氮含量和碳氮比

Fig.3 Total content of soil organic carbon and nitrogen and the ratio of carbon to nitrogen in 0~20 cm soil layers during the growing season of wheat

2.2 不同秸秆还田模式对麦季 CH_4 和 N_2O 排放特征的影响

2.2.1 CH_4 和 N_2O 排放通量 不同秸秆还田模式下,



CK: 秸秆不还田; R: 水稻秸秆连续全量还田; W: 小麦秸秆连续全量还田; RW: 稻、麦秸秆周年连续全量还田。

图 2 不同处理 0~5 cm 土壤温度变化

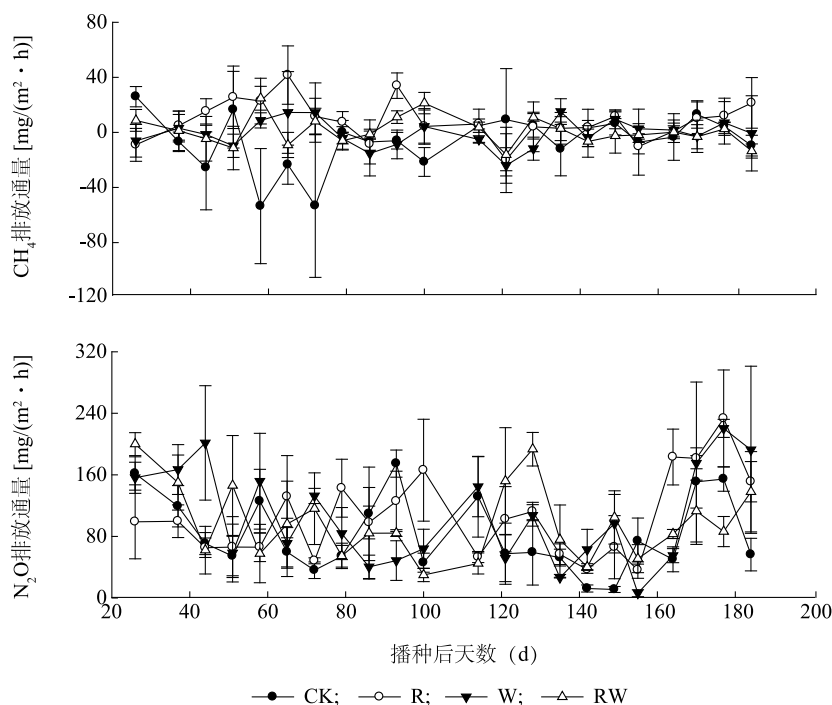
Fig.2 Changes of soil temperature in 0~5 cm soil layers under different straw returning patterns

经过 8 年连续秸秆还田, 0~20 cm 土层 SOC 、 TN 并没有显著的增加(图 3), 相反, R 处理还有小幅降低。这表明秸秆还田输入的碳和氮并没有全部保留在土壤中被植物吸收利用, 有部分通过温室气体排放而损失。土壤 C/N 均在 10 至 12 之间, 各处理与对照相比, 没有明显差异(图 4)。相关分析结果表明, 0~20 cm 土层 SOC 、 TN 和 C/N 与 N_2O 、 CH_4 的累积排放量无显著相关性。这说明, N_2O 和 CH_4 的排放量可能与秸秆及土壤中易被微生物利用的碳氮关系更密切, 而与土壤中总碳和总氮并无明显的相关关系。

小麦生长期间 CH_4 和 N_2O 排放通量无明显的规律性, 且变异较大(图 4)。主要是由于麦季不进行灌溉, 气体排放动态仅随降雨和温度变化而波动。CK、R、W 和

RW 处理 CH_4 的排放通量分别为: $-156.96 \sim 71.86 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-62.13 \sim 83.97 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-48.03 \sim 73.83 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $-43.44 \sim 41.80 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, N_2O 的排放通量分别为: $3.33 \sim 225.53 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $9.12 \sim 296.30 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $0.41 \sim 409.74 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $3.21 \sim 290.03 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。总体看来,CK 对照和 W

处理中 CH_4 排放通量多数小于 0, 而 R 处理和 RW 处理的 CH_4 排放通量多数大于 0, 各处理 N_2O 排放通量均大于 0。这主要是由于麦季土壤基本处于无积水状态, N_2O 对该季增温潜势的贡献明显大于 CH_4 。同时, 无水条件下排放的 CH_4 易被氧化, 因此 CH_4 排放通量表现为正值。



CK、R、W、RW 见图 2 注。

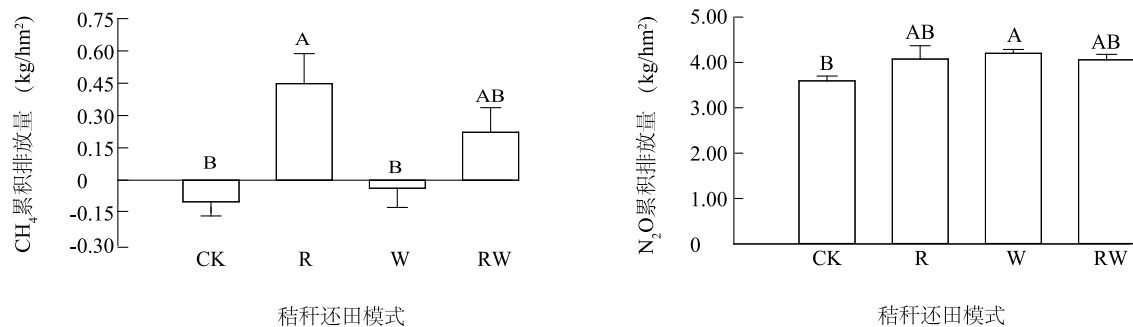
图 4 不同秸秆还田模式下麦季 CH_4 和 N_2O 的排放通量

Fig.4 CH_4 and N_2O emission fluxes under different straw returning patterns during the growing season of wheat

2.2.2 CH_4 和 N_2O 累积排放量 通过内插法计算整个生长季内 CH_4 和 N_2O 的累积排放量, 结果(图 5)显示, R 和 RW 处理的 CH_4 累积排放量大于 0, 分别为 $0.448 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $0.223 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 而 W 处理与 CK 对照相似, 其 CH_4 累积排放量小于 0, 分别为 $-0.037 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $-0.101 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。各处理间 CH_4 累积排放量的大小为: R 处理 > RW 处理 > W 处理 > CK 对照。这说明麦季稻秸秆还田和稻秸秆+麦秸秆同时还田有利于 CH_4 排放, 主要是由于秸秆还田后增加了底物养分, 长期施用造成土壤微生物群落结构的改变, 使土壤 CH_4 排放能力高于其氧化能力, 表现出 CH_4 源的作用^[23]。不同处理下麦季 N_2O 的累积排放量大小为: W 处理 > R 处理 > RW 处理 > CK 对照, 分别为 $4.201 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 4.075

kg/hm^2 、 $4.057 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $3.594 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。其中 W 处理显著高于对照 ($P < 0.05$)。这说明, 麦秸秆还田的处理反而会增加 N_2O 的排放, 可能是由于 C/N 不同造成的^[24]。8 年连续秸秆还田, W 处理、R 处理和 RW 处理的碳累计输入量(秸秆还田量与秸秆碳含量的乘积)分别为 $16.72 \text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $20.30 \text{ t}/\text{hm}^2$ 和 $37.02 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。与其他处理相比, W 处理中的 C/N 可能更易造成 N_2O 的排放。

2.2.3 温室效应 为了统一度量整体温室效应的结果, 将不同秸秆还田模式处理排放的 CH_4 量和 N_2O 量换算为全球增温潜势 (GWP) (表 1), 秸秆还田各处理中整个麦季 CH_4 和 N_2O 的总 GWP 均显著高于秸秆不还田的对照 ($P < 0.05$), 不同秸秆还田模式间的总 GWP 无显著性差异, 但以 W 处理的总



CK、R、W、RW 见图 2 注。不同大写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同秸秆还田模式下麦季 CH₄ 和 N₂O 的累积排放量

Fig.5 Accumulative emissions of CH₄ and N₂O under different straw returning patterns during the growing season of wheat

GWP 最高,而 RW 处理的最低。麦季排放的 N₂O 对总增温潜势的贡献明显高于 CH₄,所占比例大于 95.00%,是减排的主要对象。以“单位产量的 GWP”这一指标来评价不同秸秆还田模式对 CH₄ 和

N₂O 排放的综合影响^[17],由表 1 可以看出,麦季不同秸秆还田模式单位产量 GWP 表现为 RW 处理>W 处理>R 处理>CK 对照,但处理间差异不显著。

表 1 不同秸秆还田模式下麦季排放 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势 (100 a)

Table 1 The global warming potentials (100 a) of CH₄ and N₂O under different straw returning patterns during the growing season of wheat

秸秆还田模式	全球增温潜势 (kg/hm ² , CO ₂ -eq)			小麦产量 (t/hm ²)	单位产量全球增温潜势 (kg/hm ² , CO ₂ -eq)
	CH ₄	N ₂ O	CH ₄ +N ₂ O		
CK	-2.510±1.640b	1 071.000±31.300b	1 068.500±31.000b	5.560±0.160a	0.192±0.006a
R	11.200±3.500a	1 214.300±87.400a	1 225.500±89.600a	5.700±0.030a	0.215±0.016a
W	-0.930±2.230b	1 251.900±25.100a	1 250.900±25.500a	5.800±0.130a	0.216±0.004a
RW	5.560±2.850ab	1 209.000±35.800a	1 214.500±38.600a	5.540±0.180a	0.219±0.007a

CK、R、W、RW 见图 1 注。同一列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

大量研究结果表明,秸秆还田后输入的新鲜有机质^[6],可大大增加农田温室气体排放量^[12-14]。CH₄和 N₂O 是与全球气候变化关系最密切的温室效应气体^[15]。麦季土壤基本不淹水,通气良好,N₂O 对该季全球增温潜势的贡献明显大于 CH₄,在整个温室气体排放中占主导地位(所占比例大于 95.00%),是减排的主要对象,这与前人的研究结果一致。秸秆还田可显著提高麦季 CH₄ 和 N₂O 对气候变化的影响能力,其中稻麦秸秆全量还田处理对气候变化的影响最大。

秸秆还田会造成土壤结构和透气性的变化,进而可能影响土壤温度^[22]。大量研究结果表明,土壤温度是温室气体排放的主要因子之一^[13-14]。本研究中,由于各处理间温度变化基本相同,因此,温度

对各处理间 CH₄ 和 N₂O 排放差异的影响可以忽略。同时,经过 8 年连续秸秆还田,0~20 cm 土层 SOC、TN 并没有显著的增加。相关性分析结果表明,0~20 cm 土层 SOC、TN 和 C/N 与 N₂O、CH₄ 的累积排放量无显著相关性,这可能是不同秸秆还田模式温室气体排放差异不显著的主要原因。同时也说明,秸秆还田输入的碳和氮并没有全部保留在土壤中或被植物吸收利用,有部分通过温室气体排放而损失。但总体来看,W 处理中 CH₄ 和 N₂O 的累积排放量显著高于 CK 的,同时其总 GWP 也最高。这可能与麦秸秆还田处理有利于 CH₄ 排放有关。麦秸秆木质素含量较高,而稻秸秆纤维素和半纤维素含量较高,长期施用造成土壤微生物群落结构的改变,使土壤 CH₄ 排放能力高于其氧化能力,表现出 CH₄ 源的作用^[23]。同时,可能是由于 C/N 不同造成的^[24],但是具体的作用机制尚需进一步阐明。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 常志州,王德建,杨四军,等.对稻麦秸秆还田问题的思考[J].江苏农业学报,2014,30(2):304-309.
- [3] 顾克军,张斯梅,许博,等.江苏省水稻秸秆资源量及其可收集量估算[J].生态与农村环境学报,2012,28(1):32-36.
- [4] 常志州,石祖梁,张斯梅,等.“区域统筹、整体推进、终端扶持”是破解秸秆禁烧与全量利用的根本出路[J].农业资源与环境学报,2015,32(4):321-326.
- [5] 苏衍涛,王凯荣,刘迎新,等.稻草覆盖对红壤旱地土壤温度和水分的调控效应[J].农业环境科学学报,2008,27(2):670-676.
- [6] 马超,周静,刘满强,等.秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J].土壤学报,2013,50(5):915-921.
- [7] 刘冲,王茂文,刘兴华,等.苏北沿海滩涂秸秆还田对大麦生长及土壤质量的影响[J].江苏农业科学,2015,43(7):414-415,425.
- [8] 李倩,张睿,贾志宽.玉米旱作栽培条件下不同秸秆覆盖量对土壤酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):152-154.
- [9] 高大响,黄小忠,王亚萍.秸秆还田及腐熟剂对土壤微生物特性和酶活性的影响[J].江苏农业科学,2016,44(12):468-471.
- [10] 张志国,徐琪,BLEVINS R L.长期秸秆覆盖免耕对土壤某些理化性质及玉米产量的影响[J].土壤学报,1998,35(3):384-391.
- [11] 洪德峰,陈红,唐振海,等.不同深耕方式和秸秆还田对夏玉米植株性状及籽粒产量的影响[J].山东农业科学,2015,47(1):26-28.
- [12] 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.
- [13] MA E D, ZHANG G B, MA J, et al. Effects of rice straw returning methods on N_2O emission during wheat-growing season[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(3): 463-469.
- [14] MA J, XU H, KAZUYUKI Y, et al. Methane emission from paddy soils as affected by wheat straw returning mode[J]. Plant and Soil, 2008, 313(2): 167-174.
- [15] LASHOF D A, AHUJA D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to the global warming[J]. Nature, 1990, 344(6266): 529-531.
- [16] CALLANDER B A, VARNEY S K. The supplementary report to the IPCC scientific assessment[R]. New York: Cambridge University Press, 1992.
- [17] 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.
- [18] CHAPUIS-LARDY L, WRAGE N, METAY A, et al. Soils, a sink for N_2O ? Review[J]. Global Change Biology, 2007, 13(1): 1-17.
- [19] 王海候,沈明星,陆长婴,等.不同秸秆还田模式对稻麦两熟农田稻季甲烷和氧化亚氮排放的影响[J].江苏农业学报,2014,30(4):758-763.
- [20] 马静,徐华,蔡祖聪,等.稻季施肥管理措施对后续麦季 N_2O 排放的影响[J].土壤,2006,38(6):672-691.
- [21] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] ZHAO M, TIAN Y, MA Y, et al. Mitigating gaseous nitrogen emissions intensity from a Chinese rice cropping system through an improved management practice aimed to close the yield gap[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 203: 36-45.

(责任编辑:王妮)