

杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2443–2450.

YANG Dan, YE Zhu-hong, XIAO Xun, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer use on the greenhouse gas emissions of early rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2443–2450.

化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响

杨丹¹, 叶祝弘¹, 肖珣¹, 闫颖¹, 刘鸣达^{1*}, 谢桂先^{2*}

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要:为明确化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响,在长期定位施肥试验区采用密闭静态箱法采集温室气体,监测了常规施用化肥以及化肥减量配施鲜猪粪、沼液沼渣、猪粪堆肥、紫云英绿肥等不同施肥处理的早季稻田主要温室气体排放动态,探讨了不同施肥措施对稻田温室气体累积排放量、全球增温潜势(*GWP*)及排放强度(*GHGI*)的影响。结果表明:不同施肥措施下早稻田温室气体的排放存在明显的差异;与常规施肥相比,各化肥减量配施有机肥处理均促进了早稻田 CH_4 和 CO_2 的排放,而化肥减量配施鲜猪粪、猪粪堆肥处理的 N_2O 排放量分别降低了7.09%、4.89%。在早稻生长季,化肥减量配施有机肥虽引起了稻田*GWP*值的增加,增幅在5.00%~59.58%之间,但也使稻谷产量增加了6.15%~12.10%,选择适宜的有机肥还可降低稻田的*GHGI*值;其中化肥减量配施猪粪堆肥是本试验中促进早稻增产和实现温室气体减排的最佳施肥措施。

关键词:水稻;有机肥;温室气体;产量;增温潜势

中图分类号:X592 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)11-2443-08 doi:10.11654/jaes.2018-0416

Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer use on the greenhouse gas emissions of early rice fields

YANG Dan¹, YE Zhu-hong¹, XIAO Xun¹, YAN Ying¹, LIU Ming-da^{1*}, XIE Gui-xian^{2*}

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China; 2. College of Resources and Environment, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China)

Abstract: This study determined the effects of the combined use of nitrogen fertilizer and organic manure on the greenhouse gas emissions, cumulative emissions, emission intensity (*GHGI*), and global warming potential (*GWP*) of early rice fields. The greenhouse gas produced through different treatments, including conventional chemical fertilizer and the combination of chemical fertilizer and organic manure [pig manure (PF), biogas slurry (BF), pig manure composting (DF), and green manure (GF)], was collected by closed static chamber method in the long-term fertilization experiment area. Results indicated that different treatments resulted in varying levels of greenhouse gas emissions. Compared with conventional chemical fertilizers, all treatments with organic manure increased CH_4 and CO_2 emissions in the early rice field, while N_2O emissions decreased 7.09% and 4.89% in the PF and DF treatments, respectively. The addition of organic manure to the chemical fertilizer increased *GWP* between 5.00% and 59.58% and rice yield between 6.15%~12.10%. Choosing suitable organic fertilizer can also reduce the *GHGI* value of rice fields. This study reveal that, of the various treatments, DF is an especially effective method for increasing production and decreasing greenhouse gas emissions in early rice fields.

Keywords: rice; organic fertilizers; greenhouse gases; yields; global warming potential

收稿日期: 2018-03-30 录用日期: 2018-07-20

作者简介: 杨丹(1977—),女,博士,副教授,从事农业面源污染、污染土壤修复与利用方面的教学及科研工作。E-mail: yangdan_dfcy@163.com

*通信作者: 刘鸣达 E-mail: mdsausoil@163.com; 谢桂先 E-mail: xieguixian@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201200)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0201200)

水稻作为我国重要的粮食作物,其种植面积广、产量高,但近年来为追求粮食产量而将大量化肥施入稻田,氮肥的增产效应逐年下降^[1-2]。据统计,1995—2016年,我国水稻产量从6024 kg·hm⁻²增长到6861 kg·hm⁻²,涨幅为13.8%;而稻田单季氮肥(纯N)平均施用量由145 kg·hm⁻²提高到225 kg·hm⁻²,增涨了55.1%^[3-4];长期过量施用化学氮肥会降低肥料利用率,加剧农业面源污染现状。如何在减少化肥施用量的同时保证水稻产量已成为研究的热点,且已有相关研究结果表明,化肥减量配施有机肥能够促进水稻增产、提高氮素利用效率^[5],但有机肥的施用会增加稻田温室气体的排放总量,且不同种类有机肥的效果存在较大差异^[6]。

稻田是温室气体的主要排放源,每年大气中约有20%的CH₄、8%的CO₂及11%的N₂O源于稻田,且受肥料的施用、水分管理措施影响较大^[7]。在施氮量相同的前提下施用有机肥会引起稻田CH₄、CO₂排放总量的增加,而N₂O排放的变化因有机肥的种类不同而有较大差异,因此不同种类有机肥对稻田温室气体排放增量的影响也不尽相同^[8]。有机肥对稻田温室气体排放的影响需综合考虑CH₄、CO₂和N₂O三种主要温室气体,且保证水稻产量,是实现稻田温室气体减排的关键。本试验研究化肥减量配施不同种类有机肥对早稻田CH₄、CO₂和N₂O的排放动态及早稻不同生长阶段累积排放量的影响,比较不同施肥措施下的全球增温潜势(GWP)及单位产量的全球增温潜势(GHGI),以期为科学评价化肥减量配施有机肥措施对早稻生产及稻田温室气体排放的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验于2017年4—7月在湖南农业大学长期定位施肥试验基地进行,该基地位于湖南省长沙市浏阳市永和镇花园村(113°49'E,28°19'N)。该地区年平均降雨量为1 488.56 mm,且季节分配不均,主要集中在7—8月,年日照时长2 389.6 h,年平均气温15.9℃;早稻季平均气温为23.7℃。供试土壤为河流冲积物发育的潮泥土,试验地原始土壤(耕层0~20 cm)基本理化性质:pH值5.61,有机质含量16.62 g·kg⁻¹,全氮含量1.21 g·kg⁻¹,全磷含量0.54 g·kg⁻¹,全钾含量11.51 g·kg⁻¹,碱解氮含量48.93 mg·kg⁻¹,有效磷含量21.25 mg·kg⁻¹,速效钾含量155.7 mg·kg⁻¹。

1.2 供试材料

供试水稻(*Oryza sativa* L.)品种为中早39。供试的新鲜猪粪、沼渣沼液、紫云英绿肥收集于试验区农户家;猪粪堆肥为强湘牌精制有机堆肥;化肥为尿素(N≥46.4%)、过磷酸钙(P₂O₅≥12.0%)和氯化钾(K₂O≥60.0%)。供试有机肥理化性质如表1所示。

表1 供试有机肥养分基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the organic fertilizer

有机肥 种类	N质量 分数/%	P ₂ O ₅ 质量 分数/%	K ₂ O质量 分数/%	有机碳 (C)/%	pH (2.5:1)	含水率/ %
鲜猪粪肥	0.23	0.23	0.13	13.49	8.38	68.7
沼渣沼液肥	0.43	0.27	0.13	0.09	5.78	—
猪粪堆肥	0.83	1.07	0.75	30.5	8.28	32.1
紫云英绿肥	0.30	0.05	0.17	6.76	—	85.3

注:养分质量分数以鲜基计。

1.3 试验设计

试验设置6个处理,分别为不施氮肥处理(WN)、当地常规施肥处理(CF)、化肥减量配施鲜猪粪肥处理(PF)、化肥减量配施猪粪堆肥处理(DF)、化肥减量配施沼渣沼液肥处理(BF)和化肥减量配施紫云英绿肥(GF)处理,各处理设3次重复,按随机区组排列,小区面积为20 m²。其中常规施肥处理N、P₂O₅、K₂O用量分别为150、72、90 kg·hm⁻²;各配施有机肥处理化肥氮素施用量为96 kg·hm⁻²,有机氮施用量为24 kg·hm⁻²,磷、钾肥不足部分用过磷酸钙和氯化钾补齐。有机肥及化学磷肥作基肥一次性均匀施入田中;化学氮肥、钾肥以总施用量的60%作基肥、40%作分蘖肥。

水稻种植密度为23 cm×24 cm,每穴2~3株秧苗,4月25日施入基肥,4月28日移栽,5月4日追肥,7月19日收获。其中5月20—29日为烤田期,6月2日—7月5日为干湿交替,7月5日后自然落干,其余时间稻田处于淹水状态。按常规生产管理,收获后测定各小区水稻籽粒产量。

1.4 气体采集与分析

温室气体采集及测定采用静态暗箱—气相色谱法。采样箱为不锈钢材料(55 cm×55 cm×100 cm),外覆隔热泡沫板以防止采样期间箱内温度变化过大。采样箱底座尺寸为55 cm×55 cm×15 cm,每小区分配一个底座并长期埋于田间;每个底座内有9株水稻植株。采样时保证凹槽有水密封,箱体顶部安置一个12 V小风扇以充分混合箱内气体,每次采样时记录箱内温度变化情况。水稻生育期内每次施肥后的第

1、2、3、5、7 d连续采样,之后每隔7 d采样一次,如遇下雨天则采样日期向后顺延。采样时间为早上8:00—11:00,在扣上采样箱后的第0、15、30 min用手持抽气泵采集100 mL气体收集于铝箔采样袋中,密封恒温保存。 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 浓度采用气相色谱(Clarus 580)同步测定,其中 CH_4 、 CO_2 用FID检测器测定, N_2O 用ECD检测器测定。各种气体的排放通量及累积排放通量的计算公式^[8]如下:

$$F = \rho \times h \times (dc/dt) \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下气体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; h 为采样箱的净高度,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, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$C = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中: C 为累积排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; F 为温室气体排放通量; i 为第几次监测; $t_{i+1} - t_i$ 为两次监测间隔的时间,d; n 为监测的总次数。

根据100 a尺度范围内 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势分别为 CO_2 的25倍和298倍,计算不同处理稻田排放 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的全球增温潜势(GWP , $\text{kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$)及温室气体排放强度($GHGI$, 即单位产量的 GWP , $\text{kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$),综合评价稻田排放3种温室气体产生温室效应的总和。具体计算公式(IPCC, 2007)如下:

$$GWP = f_{\text{CH}_4} \times 25 + f_{\text{N}_2\text{O}} \times 298 + f_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

式中: f_{CH_4} 、 $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 f_{CO_2} 为整个水稻生长季稻田 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 的累积排放量, $\text{kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

$$GHGI = GWP / Y \quad (4)$$

式中: Y 为单位面积水稻产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.5 数据分析方法

采用Microsoft excel 2013进行数据计算及图表绘

制,利用SPSS 21.0对不同施肥处理间稻田温室气体排放通量的差异显著性进行单因素方差分析,多重比较采用Duncan法。图表中不同小写字母表示差异达到显著水平($P < 0.05$),不同大写字母表示差异达到极显著水平($P < 0.01$)。

2 结果与分析

2.1 早稻季 CH_4 排放通量的变化特征

早稻田 CH_4 排放通量动态变化规律如图1所示。不同施肥处理 CH_4 排放通量整体呈现先升高后降低的趋势,动态变化主要出现在移栽后25 d内,且各化肥减量配施有机肥处理均在追肥后出现 CH_4 排放高峰。进入晒田期后 CH_4 排放通量显著下降,其平均排放通量较淹水期降低了78.2%左右。晒田结束后,田间复水,但 CH_4 排放通量仍处于较低水平,直至水稻成熟。不同施肥处理 CH_4 排放通量在前期差异明显,且施入有机肥的处理明显高于纯化肥处理,其中PF处理在水稻移栽14 d时 CH_4 排放通量出现峰值,为 $114.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。同时,整个早稻季PF处理平均排放通量也最大,达到了 $39.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其次是BF处理为 $14.96 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,而CF、DF、GF、WN处理分别为 10.40 、 11.76 、 12.33 、 $14.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与常规化肥处理相比,配施有机肥会促进稻田 CH_4 排放,且排放通量的大小和有机肥种类有较大关系。

2.2 早稻季 CO_2 排放通量的动态变化特征

由图2可知,不同施肥措施下早稻季 CO_2 的排放特征整体呈逐渐增高的趋势,水稻移栽直至分蘖期追肥后各处理 CO_2 排放通量较小,变化幅度仅在 $48.6 \sim 195.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间;移栽后25 d开始缓慢上升,直至58 d前后达到了早稻季 CO_2 排放通量的最高峰,且各处理动态变化特征较为一致。其中,PF处理 CO_2 排

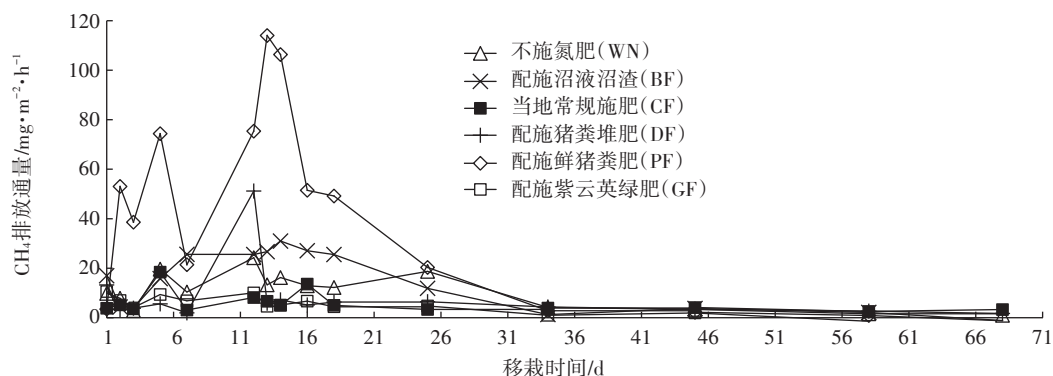


图1 早稻季稻田 CH_4 排放通量动态变化

Figure 1 CH_4 emission during rice growth period of early rice fields

放通量一直处于较高水平,波动范围在 $135.7 \sim 1\,162.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间。各处理 CO_2 平均排放通量大小顺序依次为 $\text{PF} > \text{BF} > \text{DF} > \text{CF} > \text{GF} > \text{WN}$ 。除 PF 处理外,其余配施有机肥处理早稻季 CO_2 平均排放通量较 CF 处理差异不显著,但均表现出明显的动态变化特征,变化范围在 $-2.54\% \sim 7.82\%$ 之间。

2.3 早稻季 N_2O 排放通量的动态变化特征

由图3可知,整个早稻生长季 N_2O 排放通量的动态变化特征不同于 CH_4 和 CO_2 。在稻田进入晒田期后各处理均出现排放高峰,随后逐渐下降直至趋于平缓。WN 处理 N_2O 平均排放通量最低,仅为 $1.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; PF、DF 处理 N_2O 平均排放通量较 CF 处理分别下降了 9.53% 和 15.57%,而 GF、BF 处理较 CF 处理分别增加了 2.04% 和 0.51%。各处理 N_2O 平均排放通量大小顺序依次为 $\text{GF} > \text{BF} > \text{CF} > \text{PF} > \text{DF} > \text{WN}$,可见氮肥的施入增加了稻田 N_2O 的平均排放量,而有机肥对其的影响因种类不同而规律不同。

2.4 早稻季 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 累积排放量

为进一步明确不同化学减氮配施有机肥处理对早稻不同生育期稻田 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 排放量的影响,

将早稻生长期划分为秧苗移栽至有效分蘖末期(I)、有效分蘖末期至拔节期(II)、拔节期至抽穗期(III)、抽穗期至成熟期(IV)4个生长阶段,比较早稻各生育阶段不同处理间 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 累积排放量的差异,见图4。

由图4A可以看出,稻田 CH_4 排放主要集中在水稻有效分蘖末期至拔节期,占水稻全生育期 CH_4 累积排放量的 40.3%~59.1%,其次是水稻秧苗移栽至有效分蘖末期及拔节期至抽穗期,占水稻全生育期的比例为 33.7%~40.8%,而水稻抽穗期至成熟期 CH_4 累积排放量则相对较小,占水稻全生育期的 10.0% 左右;其中 PF 处理在水稻抽穗期前各生长阶段 CH_4 累积排放量较其余处理均处于较高水平,而 DF 处理虽促进了稻田 CH_4 的排放,但较 CF 而言在早稻季各生长阶段的差异并不显著。从图4B看出稻田 CO_2 排放主要集中在水稻抽穗期至成熟期,占水稻全生育期的比例为 47.4%~63.0%,而水稻秧苗期至分蘖末期 CO_2 累积排放量较小,只占总排放量的 5.53%~8.15%,且各处理仅在水稻抽穗期至成熟期 CO_2 累积排放量间的差异达到了显著性水平。图4C为各阶段稻田 N_2O 累积排

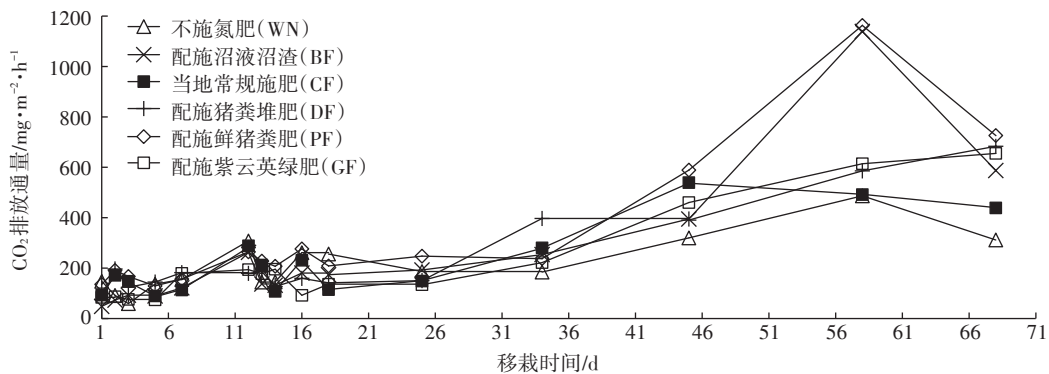


图2 早稻季稻田 CO_2 排放通量动态变化

Figure 2 CO_2 emission during rice growth period of early rice fields

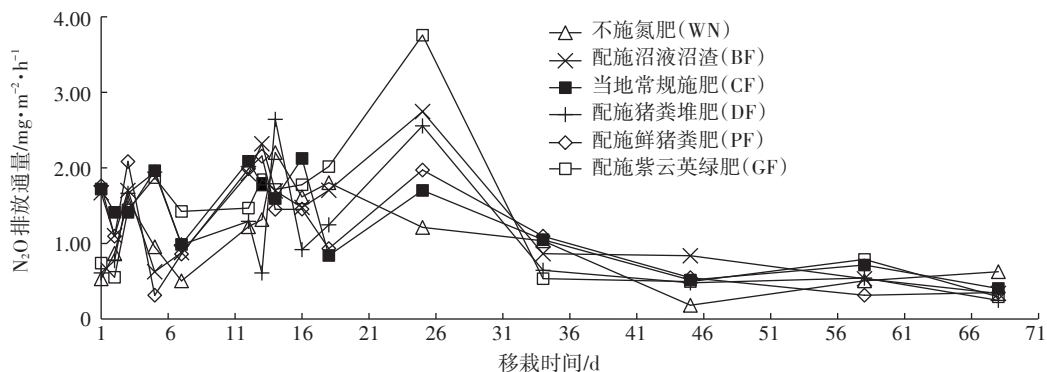
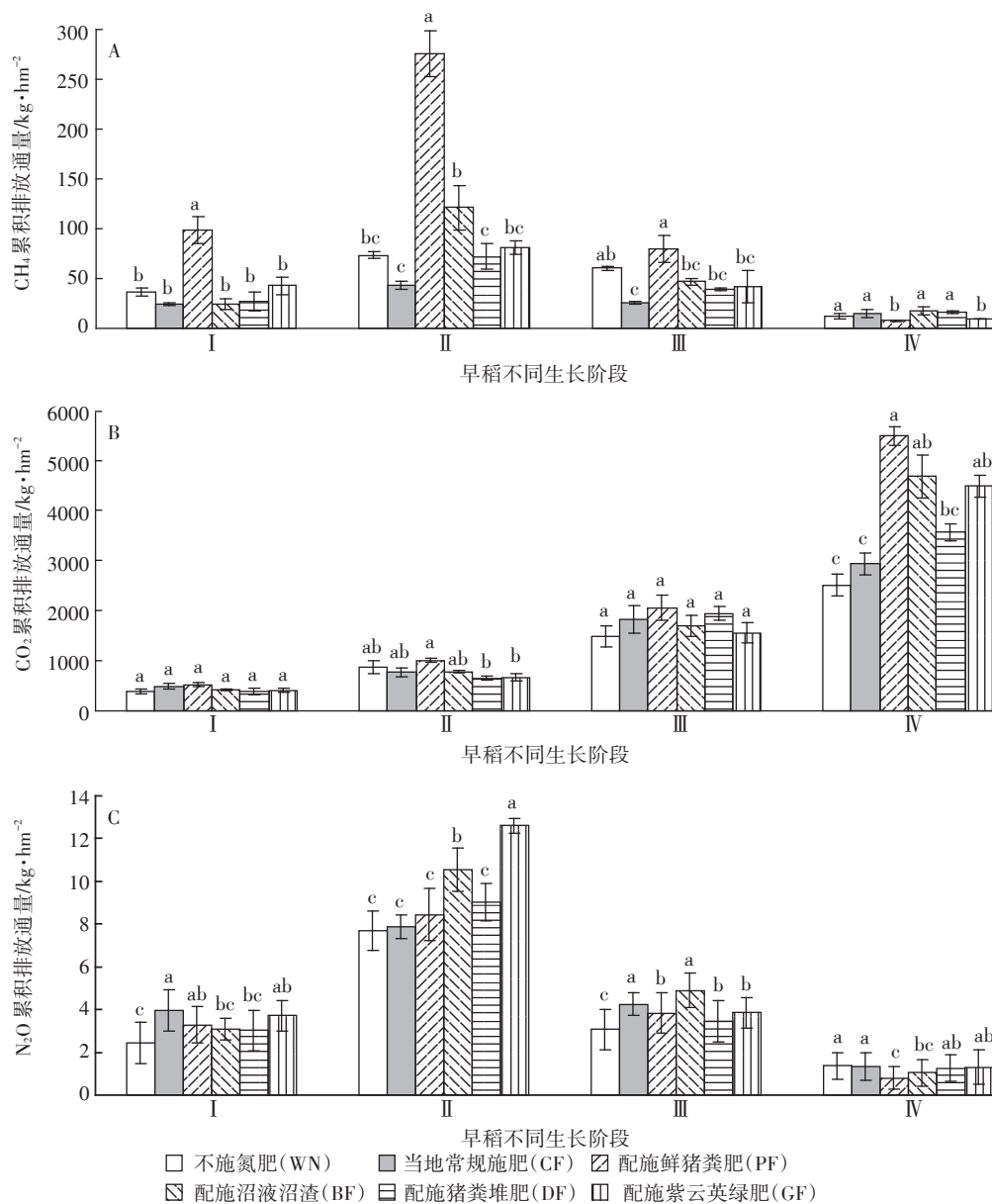


图3 早稻季 N_2O 排放通量动态变化

Figure 3 N_2O emission during rice growth period of early rice fields



I 为秧苗移栽至有效分蘖末期、II 为有效分蘖末期至拔节期、III 为拔节期至抽穗期、IV 为抽穗期至成熟期

图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 早稻不同生育阶段 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的累积排放量

Figure 4 CH_4 、 CO_2 and N_2O cumulative emissions during rice growth period of early rice fields

放量, N_2O 的排放主要在水稻生长的有效分蘖末期至拔节期及拔节期至抽穗期两个阶段, 占水稻全生育期的 69.57%~78.95%, 即晒田期及干湿交替的水分落干期, 且各处理间差异较大。

综合考虑 3 种温室气体在早稻季全生育期的累积排放量(图 5), CO_2 为稻田排放的主要温室气体, 占总排放量的比例高达 96.23%~97.90%, 配施有机肥处理均促进了稻田 CH_4 和 CO_2 的排放, 但仅 PF 处理 CH_4 和 CO_2 的累积排放量与 WN、CF 处理间的差异达到了

显著水平。而不同处理 N_2O 的累积排放量因肥料的种类不同而有较大差别, 表现为 $\text{GF} > \text{BF} > \text{CF} > \text{DF} > \text{PF} > \text{WN}$, 其中 PF、DF 处理较 CF 处理分别下降了 7.09% 和 4.90%。

2.5 早稻田温室气体的综合温室效应

由表 2 可以看出, 稻田 N_2O 累积排放量虽少, 但折算为 CO_2 当量后相对于 CH_4 和 CO_2 而言其对温室效应的贡献较大; 其中以不施肥处理稻田综合增温潜势最低, 施用化肥或有机肥均可导致稻田排放气体

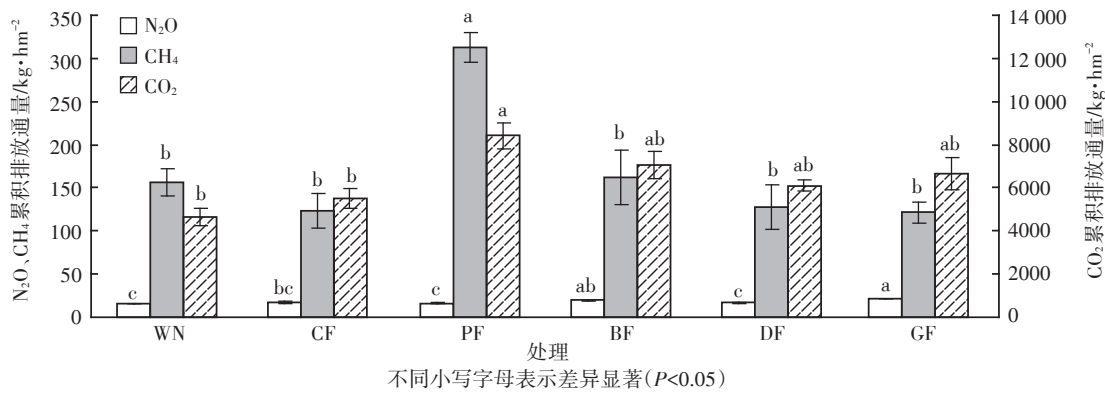


图 5 早稻生长季 CH₄、CO₂ 和 N₂O 的累积排放量

Figure 5 CH₄, CO₂ and N₂O cumulative emissions of early rice fields

表 2 稻田综合增温潜势和温室气体排放强度

Table 2 Warming potential and greenhouse gas intensity of rice season

处理	E-CH ₄ /kg CO ₂ ·hm ⁻²	E-N ₂ O/kg CO ₂ ·hm ⁻²	E-CO ₂ /kg CO ₂ ·hm ⁻²	GWP/kg CO ₂ ·hm ⁻²	稻谷产量/kg·hm ⁻²	GHGI/kg CO ₂ ·kg ⁻¹
WN	3349bB	4715cC	4650bB	12 715cB	4924bA	2.58bB
CF	2834bB	5251bcBC	5500bB	13 586bcB	5250abA	2.59bB
PF	8392aA	4879cBC	8409aA	21 680aA	5770aA	3.76aA
BF	3878bB	5827abAB	7034abAB	16 741bB	5573abA	3.00bAB
DF	3162bB	4994cBC	6107abAB	14 265bcB	5885aA	2.43bB
GF	2796bB	6398aA	6667abAB	15 862bCB	5805aA	2.73bB

注:表中E-CH₄、E-N₂O、E-CO₂分别为f_{CH₄}、f_{N₂O}和f_{CO₂}乘以25、298、1后的数值,方差分析为单因素方差分析后的结果。表中不同小写字母表示差异显著(P<0.05),不同大写字母表示差异极显著(P<0.01)。

GWP值的增加,各处理的高低顺序依次为PF>BF>GF>DF>CF>WN。PF、BF、GF、DF处理的GWP值较CF处理分别增加了59.58%、23.22%、16.75%、5.00%。结合稻谷产量数据来看,配施有机肥各处理产量均高于CF处理,且以DF处理产量最高,较CF处理提高了12.10%。进一步计算各处理的GHGI值,大小顺序依次为PF>BF>GF>CF>WN>DF,其中只有PF处理极显著高于WN和CF处理,其他配施有机肥处理与CF处理间差异不显著,尤其是DF处理与其余有机肥处理相比降幅最大。因此,化肥减量配施有机肥不仅可促进稻谷产量的提高,而且不会造成温室气体排放强度的增加;尤其是DF处理的温室气体排放强度最低。

3 讨论

稻田生态系统CH₄、CO₂和N₂O的排放受肥料种类、水分管理等农业管理措施的复杂影响,是土壤、水稻及温度等其他环境因素共同作用的结果。

CH₄的产生是严格厌氧条件下产CH₄细菌作用于产CH₄底物的结果,本试验中,各处理在稻田淹水、施肥后均出现明显的CH₄排放峰,后期逐渐降低并趋于稳定。这是因为稻田淹水后土壤处于厌氧环境,从而

促进了CH₄产生,但土壤中高浓度CH₄又促进了甲烷氧化菌的生长,使滞留在土壤中尚未排放的CH₄被氧化,所以后期的排放量降低^[9]。从CH₄累积排放量可以看出,与常规施肥相比,有机肥的施入促进了早稻田CH₄的排放,与多数研究结果一致,其主要原因是有机肥不仅为产甲烷菌提供丰富的产CH₄基质,还进一步降低了土壤的氧化还原电位,有利于CH₄的大量产生^[10-12]。试验结果的统计分析结果表明,各配施有机肥处理虽促进了早稻田CH₄的排放,但与常规施肥相比,仅化肥减量配施鲜猪粪处理的CH₄累积排放量的增加达到了5%显著性水平。说明适宜的配施有机肥措施不会造成稻田CH₄排放显著增加。

稻田CO₂的排放由土壤呼吸和水稻植株呼吸两部分构成,其排放通量主要由植株生长阶段、环境温度等条件综合决定。水稻移栽初期,植株幼小、呼吸作用较弱;随着水稻生长的进行,尤其是进入拔节期后,整个系统的呼吸作用明显增强,故CO₂排放通量也逐渐升高。但与其他研究结果相比,本试验中稻田CO₂排放高峰出现较晚,这可能是水稻移栽后45 d遭遇连续强降雨引起的环境温度降低及早稻生长受限所导致的^[13]。施用化肥或配施有机肥均促进了稻田

CO₂的排放,这与刘红江、李成芳等的研究结果相同^[14-15],其原因可能是与施肥影响了稻株生长活力及土壤微生物活性有关^[16-17]。尤其是有机肥的施用,增加土壤碳源的同时促进了土壤有效氮素的积累,进而促进了土壤微生物活性的提高和水稻植株的生长,从而增加了稻田CO₂的排放^[18]。

N₂O是土壤硝化、反硝化过程的中间产物,其排放动态主要受到施肥和土壤水分状况等因素的影响。从早稻田N₂O排放通量的变化规律可以看出,各处理在水稻晒田期出现N₂O的排放峰值,这是因为在稻田处于淹水状态时,土壤的低氧和厌氧状态使好氧的硝化作用受到抑制,且水层阻碍了N₂O向大气扩散,同时更有利于反硝化作用中产生的N₂O彻底还原为N₂^[19-20],中期排水晒田时土壤转变为有氧状态,促进了硝化过程的进行,也抑制了反硝化作用中N₂O还原为最终产物N₂,故出现了N₂O排放高峰;但一周后随着稻田复水,N₂O排放再次降低并趋于稳定。从早稻田N₂O累积排放量可以看出,施用新鲜猪粪和猪粪堆肥处理N₂O排放低于常规施肥处理。施用有机肥影响稻田N₂O排放的作用机制可能主要有以下两个方面:一是有机物料的分解进一步消耗土壤中的氧气,从而减少了N₂O的产生^[21];二是有机肥的施用给土壤输入了丰富的有机碳源,在腐解过程中会对氧化亚氮还原酶活性产生影响,C/N升高后,碳源相对“过剩”,可能会消耗部分NO₃⁻作为氮源,进而使反硝化作用中的电子受体NO₃⁻相对减少,从而还原产生的N₂O量减少^[22-24]。因此,合理选择有机肥种类可有效降低施肥对稻田土壤N₂O排放带来的不利影响,但硝化作用与反硝化作用共同作用下的N₂O排放过程是极其复杂的,还值得进一步深入研究。

综上所述,与常规化肥处理相比,配施有机肥会增加CH₄、CO₂的排放量,但可以降低稻田N₂O的排放量。要衡量不同施肥措施下稻田生态系统温室气体排放对温室效应的作用还需综合考虑这3种主要温室气体的整体作用。各处理稻田排放温室气体的增温潜势(GWP)及温室气体排放强度(GHGI)的计算结果表明配施有机肥可导致GWP的增加,但也带来了明显的增产效果,因此并不一定造成GHGI值的提高。其中,配施猪粪堆肥(DF)处理增产效果最明显,GWP与GHGI值的降低幅度最大。因此,应加强堆肥技术的研究,使优质堆肥应用于农业生产,这将会实现经济(农业增产)与环境(消纳畜禽养殖业废弃物、减轻粪污引发的农业面源污染、减排温室气体)效益的双赢。

4 结论

(1)化肥减量配施有机肥会增加稻田CH₄、CO₂的排放,仅配施新鲜猪粪处理的CH₄累积排放量较常规施肥处理间差异达到了显著水平;其余配施有机肥处理的CH₄和CO₂累积排放量较常规施肥处理无显著差异。

(2)有机肥对N₂O排放的影响因有机肥的种类不同而不同,化肥减量配施紫云英绿肥明显增加N₂O的排放,配施新鲜猪粪和配施猪粪堆肥则降低N₂O的排放。

(3)综合考虑CH₄、CO₂和N₂O的全球增温潜势及不同施肥措施下稻田温室气体排放强度,化肥减量配施猪粪堆肥在促进早稻增产的同时降低了稻田生态系统的温室气体排放强度,是本试验中较为合理的施肥措施。

参考文献:

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 26(5): 36-47.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 26(5): 36-47.
- [2] 赵宏伟, 沙汉景. 我国稻田氮肥利用率的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(2): 116-122.
ZHAO Hong-wei, SHA Han-jing. Recent research of fertilizer-nitrogen use efficiency in paddy field of China[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2014, 45(2): 116-122.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and agriculture organization (FAO) Shared database: Production [DB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国人民出版社, 2017.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: Chinese People's Publishing House, 2017.
- [5] 郭智, 周炜, 陈留根, 等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 21-27.
GUO Zhi, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, et al. Effect of pig manure application on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during the paddy season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6): 21-27.
- [6] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田CH₄和N₂O排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12.
ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH₄ and N₂O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 7-12.

- [7] 邵美红, 孙加焱, 阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 181-187.
SHAO Mei-hong, SUN Jia-yan, RUAN Guan-hai. Review on greenhouse gases emission and the reduction technology in rice fields[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 2011, 23(1): 181-187.
- [8] 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: 153-158.
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: 153-158.
- [9] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide emission from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7-14.
- [10] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764.
ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758-764.
- [11] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 707-720.
SHI Sheng-wei, LI Yu-e, LI Ming-de, et al. Annual CH_4 and N_2O emissions from double rice cropping system under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal Atmospheric Sciences*, 2011, 35(4): 707-720.
- [12] 侯晓莉, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同稻秆处理方式下双季稻温室气体排放通量研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 803-809.
HOU Xiao-li, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Greenhouse gases emission from paddy fields under different rice straw treatments[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(5): 803-809.
- [13] 赵 峥, 岳玉波, 张 翼, 等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2273-2278.
ZHAO Zheng, YUE Yu-bo, ZHANG Yi, et al. Impact of different fertilization practices on greenhouse gas emission from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2273-2278.
- [14] 刘红江, 郭 智, 张丽萍, 等. 有机-无机肥不同配施比例对稻季 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 808-814.
LIU Hong-jiang, GUO Zhi, ZHANG Li-ping, et al. Effects of different combined application ratio of organic-inorganic fertilization on CH_4 and N_2O emissions in paddy season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(5): 808-814.
- [15] 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.
- [16] Song C C, Wang Y Y, Wang Y S, et al. Character of the greenhouse gas emission in the freshwater mire under human activities[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(1): 82-86.
- [17] 魏甲彬, 成小琳, 周玲红, 等. 冬季施用鸡粪和生物炭对南方稻田土壤 CO_2 与 CH_4 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1742-1751.
WEI Jia-bin, CHENG Xiao-lin, ZHOU Ling-hong, et al. Effect of chicken manure and biochar on CO_2 and CH_4 emission in paddy fields in South China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1742-1751.
- [18] Smith T M, Shugart H H. The transient response of carbon storage to a perturbed climate[J]. *Nature*, 1993, 361(6421): 523-526.
- [19] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N_2O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2010(6): 1524-1530.
SUN Zhi-qiang, HAO Qing-ju, JIANG Chang-sheng, et al. Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010(6): 1524-1530.
- [20] 郭腾飞, 梁国庆, 周 卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 337-345.
GUO Teng-fei, LIANG Guo-qing, ZHOU Wei, et al. Effect of fertilizer management on greenhouse gas emission and nutrient status in paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(2): 337-345.
- [21] 杨艳菊, 蔡祖聪, 张金波. 氧气浓度对水稻土 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2016, 48(3): 539-545.
YANG Yan-ju, CAI Zu-cong, ZHANG Jin-bo. Effects of oxygen concentration on nitrous oxide emissions from paddy soils[J]. *Soils*, 2016, 48(3): 539-545.
- [22] 秦艳梅, 过燕琴, 高志亮, 等. 中国农田 N_2O 排放通量原位观测研究的汇总分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2608-2613.
QIN Yan-mei, GUO Yan-qin, GAO Zhi-liang, et al. A summary of field studies on N_2O measurements in Chinese croplands during 1990-2008[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2608-2613.
- [23] 夏仕明, 陈 洁, 蒋玉兰, 等. 稻田 N_2O 排放影响因素与减排研究进展[J]. 中国稻米, 2017, 23(2): 5-9.
XIA Shi-ming, CHEN Jie, JIANG Yu-lan, et al. Advances in nitrous oxide emission and its reduction in rice field[J]. *China Rice*, 2017, 23(2): 5-9.
- [24] 李香兰, 徐 华, 蔡祖聪, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放消长关系及其减排措施[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2123-2130.
LI Xiang-lan, XU Hua, CAI Zu-cong, et al. Trade-off relationship and mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2123-2130.