

有机肥和缓控肥替代部分化肥降低双季稻田综合净温室效应

李桂花, 周吉祥, 张建峰*, 杨俊诚

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 【目的】秸秆还田是我国水稻生产中的常规土壤培肥措施, 在此背景下, 进一步研究有机肥和包膜尿素替代部分普通尿素, 以及施用硅肥和微量元素对土壤固碳效应和温室气体排放的影响及机理, 为实现稻田“固碳减排”提供依据。【方法】江西高安县的双季稻田田间定位试验始于 2013 年。在秸秆全部还田、早稻施 N165 kg/hm² 和晚稻施 N 195 kg/hm² 条件下, 设置 4 个氮素处理: 100% 普通尿素氮 (CK); 用 20% 有机肥氮替代普通尿素氮 (N1); 在 N1 基础上增加 Si、Zn 和 S 肥 (N2); 在 N2 基础上用 30% 的包膜尿素氮替代普通尿素氮 (N3)。于收获期测定作物产量和地上部生物量, 2016 年测定了早稻和晚稻生育期温室气体 (CO₂、N₂O 和 CH₄) 排放量。【结果】与早稻季相比, 晚稻季温室气体排放总量较高, 其中晚稻季 CH₄ 排放量是早稻季的 4 倍 ($P < 0.05$), 生态系统呼吸增加了 7.5%~9.3% ($P > 0.05$)。同一季节 4 个处理间生态系统呼吸没有显著差异; N₂O 排放量以 CK 最高, 其中早稻季 CK 处理比 N1、N2 和 N3 处理分别增加 31.7%、27.2% 和 43.7%, 晚稻季分别增加 20.0%、31.5% 和 40.6% ($P < 0.05$); 与 CK 处理相比, 有机肥替代处理显著增加了 CH₄ 的排放量, 其中早稻季 N1、N2 和 N3 处理分别增加了 13.1%、13.9% 和 21.4%, 晚稻季分别增加了 19.4%、12.7% 和 13.7% ($P < 0.05$)。利用地上部生物量估计当季/年尺度土壤固碳效应, 晚稻季有机肥处理 (N1、N2 和 N3) 与 CK 相比增加显著 ($P < 0.05$); 2016 年早稻产量比晚稻提高 30%, 所以早稻季综合净温室效应是负值 (碳汇), 而晚稻季是正值 (碳源), 全年总计为碳源, 这表明稻田产生温室效应。与 CK 处理相比, 有机肥和包膜尿素配施处理 (N3) 显著降低了全年综合净温室效应。【结论】连续 4 年的田间试验结果表明, 在秸秆还田基础上, 用有机肥部分替代普通尿素可显著增加 CH₄ 排放, 但又显著降低 N₂O 排放且增加土壤固碳效应。综合考虑, 有机肥投入会显著降低双季稻田综合净温室效应。使用包膜尿素替代部分普通尿素可有效降低施用有机肥产生的 CH₄ 排放, 且通过提高产量进一步降低双季稻生产系统的综合净温室效应。而施用中、微量元素肥料对综合净温室效应没有显著正效应。由于晚稻的温室气体排放量高于早稻, 因此, 通过优化施肥技术提高早稻产量是降低双季稻年度温室气体排放的有效措施。

关键词: 双季稻; 温室气体; 净温室效应; 有机肥; 缓控肥

Decreasing net global warming potential through partial substitution of urea with manure and slow-release fertilizer in a double-rice system

LI Gui-hua, ZHOU Ji-xiang, ZHANG Jian-feng*, YANG Jun-cheng

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】Straw returning is a common practice in rice production. In this case, we studied the effect and mechanism of partial substitution of urea with manure and slow-release fertilizer on decreasing the net global warming potential in a double-rice agro-ecosystem under long-term straw return condition to provides the basis for the realization of carbon sequestration and emission reduction. 【Methods】Field localized experiments were started since 2013 in a double-rice system in Jiangxi Province, China. Four nitrogen fertilizer treatments were setup on the base of whole straw of pre-crops returning to field, and total of N input of 165 kg/hm² in early rice and 195 kg/hm² in late rice. The treatments were: 1) 100% urea (CK); 2) 80% urea + 20% manure N (N1); 3)

收稿日期: 2019-09-25 接受日期: 2020-02-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0800402); 基本科研业务费专项所级统筹项目 (1610132019039)。

联系方式: 李桂花 E-mail: liguihua@caas.cn; * 通信作者 张建峰 E-mail: zhangjianfeng@caas.cn

on the base of N1, applying extra Si, Zn and S (N2); 4) on the base of N2, 30% of total N replaced with coating urea (N3). Rice yield, above ground biomass and soil organic matter content was measured, the greenhouse gas emissions were measured during double-rice growth season in 2016. 【 **Results** 】 Greenhouse gas emissions in late rice season were significantly higher than those in early rice season, e.g. the CH₄ emission was as high as 4 times ($P < 0.05$) and CO₂ emissions were 7.5%–9.3% higher ($P > 0.05$). Among the four treatments, the CO₂ emission was not significantly different in both early and late rice season; the N₂O emission was significantly decreased in the manure containing treatments (N1, N2 and N3), with decrement of 31.7%, 27.2% and 43.7% in early rice season, and 20.0%, 31.5% and 40.6% in late rice season in turn ($P < 0.05$). Manure application resulted in a significant increase of CH₄ emission compared with CK. In early rice season, the increment in CH₄ emission under N1, N2 and N3 were 13.1%, 13.9% and 21.4%, and 19.4%, 12.7% and 13.7% in late rice season, respectively ($P < 0.05$). Soil carbon sequestration potential in seasonal or yearly scale, which was estimated with above ground biomass, was significantly higher under manure treatments (N1, N2 and N3) comparing to CK ($P < 0.05$). In 2016, the net global warming potential (GWP) in early rice season was negative (carbon sink) due to 30% increment of the yield, while that was positive in late rice season (carbon source), and the whole year belonged to carbon source. Even so, the net GWP in N1, N2 and N3 treatments were significantly lower than that in CK, in order of N3 < N1 = N2 < CK. 【 **Conclusions** 】 In the field with long-term straw returning, partial substitution of mineral N with manure would increase the absolute CH₄ emission, but the increased yield and carbon input would offset the adverse effect, and significantly decrease the N₂O emission and increase soil carbon storage, which would significantly decrease the net GWP in double rice system. The extra use of coating urea would strengthen the positive effect, but Si and micronutrient would not. Therefore, optimize fertilizer management to increase early rice yield is an efficient way to decrease greenhouse gas intensity in a double rice system due to much higher greenhouse gas emission in late rice season.

Key words: double rice; greenhouse gas; net global warming potential; manure; slow-release fertilizer

我国是世界第一大水稻生产国, 水稻种植面积占全世界水稻总种植面积的 19%, 占全国耕地面积的 23%。因此, 采取合理施肥措施, 实现水稻高产, 同时降低温室气体排放, 对资源高效利用和降低环境污染的可持续农业发展具有重要意义。

大量数据表明, 稻田生产过程中由 CH₄ 与 N₂O 排放造成的综合温室效应 (global warming potential) 是小麦季的 5.1 倍、玉米季的 2.4 倍^[1]。通过合理的水肥管理措施减少稻田温室气体排放对维护良好的生态环境具有重大意义。施用尿素会增加稻田 N₂O 排放, 但可能增加^[2]或减少^[3]CH₄ 排放, 这取决于土壤的基础酸碱性^[4], 尿素施入酸性土壤由于 pH 低会加速 CH₄ 的形成, 而施入中性或碱性土壤后则会因为土壤 pH 高而抑制 CH₄ 的形成^[4]。

缓控肥和有机肥对温室气体排放影响的研究结果不一。缓控肥主要通过控制氮素的释放可显著降低水田 CH₄ 和 N₂O 的排放量^[5], 对 CO₂ 的排放没有影响^[6]。丁维军等^[7]研究认为, 施用缓释氮肥降低土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量分别为 24.7%、3.0% 和

26.8%。另有研究表明, 有机无机肥配施与单施化肥相比增加稻田 CH₄ 排放量^[8,9], 不影响^[8]、增加^[9,10]、降低^[11] N₂O 排放量。相反, 董玉红等^[12]发现有机肥施用抑制 CH₄ 的排放, 却增加 CO₂ 的排放量。

农田生态系统固碳对减缓温室效应具有重要的作用。而稻田长期处于淹水状态, 利于有机物料形成有机质固存在土壤中。微量元素 Si、Zn 和 S 增加水稻产量, 利于有机质增加^[13]。有关双季稻温室气体排放已有大量研究^[14-15], 但考虑农田土壤固碳综合净温室效应的研究很少^[8, 16]。因此, 我们选择有机替代普通尿素、缓控肥替代普通尿素、微量元素添加等施肥方式, 与农民常规普通尿素处理进行对比, 综合考虑当季农田尺度的温室效应, 为双季稻田“固碳减排”提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于江西省宜春市高安县渡埠农场 (N

28°15'26.0"、E 115°07'32.7")。该地海拔高度为 7 m, 属于亚热带季风性湿润气候, 年均降水量为 1680 mm, 主要分布在 4~6 月, 年均气温 17.2℃。土壤属红壤性水稻土, 试验前耕层土壤性质为: pH 5.28、有机质 23.62 g/kg、全氮 1.69 g/kg、碱解氮 184.31 mg/kg、速效钾 178.33 mg/kg、有效磷 44.54 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2013 年 3 月—2016 年 11 月进行, 共种植 8 季水稻, 其中 4 季早稻和 4 季晚稻。在施用全氮量一致的前提下, 设置 4 个氮肥处理: 1) 单施普通尿素 (CK); 2) 用 20% 有机肥氮替换普通尿素氮 (N1, 80% 普通尿素 + 20% 有机氮); 3) 在 N1 处理基础上加 Si、Zn 和 S 微肥 (N2, 80% 普通尿素氮 + 20% 有机氮 + Si + Zn + S); 4) 在 N2 处理基础上, 用 30% 缓控肥氮替代普通尿素氮 (N3: 50% 普通尿素氮 + 30% 缓控氮 + 20% 有机氮 + Si + Zn + S)。每个处理 4 次重复, 随机区组排列, 小区面积 42 m²。所有处理施磷量 (90 kg/hm², 过磷酸钙) 和钾量 (150 kg/hm², 氯化钾) 相同, 秸秆全部还田。CK 处理氮肥用量为早稻 165 kg/hm² (基-蘖-穗肥为 60-40-0), 晚稻 195 kg/hm² (基-蘖-穗肥为 40-30-30); N2 和 N3 加施 Si、Zn 和 S 的量分别为 30、3.45、30 kg/hm²。微量元素肥、缓控肥和有机肥全部作为基肥, 普通尿素按不同时期和比例进行分施。早稻为中嘉早 17 号, 晚稻为五丰优 T025。每年 5 月 1 日移栽早稻, 7 月 23 日收获; 8 月 2 日移栽晚稻, 11 月 2 日收获。

1.3 田间管理

移栽后人工除草两次, 人工收获水稻。水稻收获后将秸秆粉碎, 人工还田。早稻移栽前和收获后进行翻地和耙地, 耗油量用实测值计算。

1.4 样品采集和测定

早稻和晚稻生长过程中, 用静态暗箱 (长 30 cm、宽 30 cm、高 100 cm + 25 cm) 原位采集温室气体 (N₂O、CH₄ 和 CO₂), 用气相色谱法测定。基肥和追肥后第二天起, 每天采集一次, 连续采集一星期, 之后每星期采集一次。采样时间为上午 8:00—11:00, 若下雨则顺延一天。每次按 5 个间隔 0、5、10、15、20 min 采集, 第一次采集时测定箱外气体和气温。通气量计算方法参考文献[16]。

1.5 当季作物尺度土壤固碳效应的计算

当季尺度土壤固碳效应 (δSOC) 用农田生态系统

净碳收支 (NECB) 进行估算^[17-18]。

NECB = NPP/0.58 - C_{呼吸} - C_{籽粒收获} - C_{甲烷} + C_{有机肥碳}

式中, 净初级生产力 (NPP) 按水稻各部位碳含量累加, 根茬碳按照水稻根冠比为 0.1^[19] 计算根质量, 碳含量为 45%^[20]; 根系沉积 C 按光合作用同化碳的 15% 计算^[21]; 作物凋落物碳按地上部和根系碳的 5% 计算^[22]; 籽粒碳含量用产量的 38% 计算; 秸秆碳含量用 42% 计算。有机肥碳投入量是 C 447 kg/hm²。NECB 转化为水田土壤有机碳的表观平均转换速率按 0.213 计算^[23]。

1.6 综合净温室效应的计算

综合净温室效应 (net GWP) = CH₄ × 28 + N₂O × 265 + (E₁ + E₂) × 44/12 - δSOC × 44/12^[18]

式中, E₁ 和 E₂ 指农田管理操作和化肥农药带来的碳排放, 碳排放系数参照柴油 0.94^[24]、生产氮肥 1.74^[24]、生产 P₂O₅ 肥 0.2^[24-25]、生产 K₂O 肥 0.15^[24-25]。温室气体强度 (GHGI) 是综合净温室效应 (net GWP) 与水稻产量的比值, 表示每生产单位质量粮食对气候变化造成的影响。

1.7 数据的统计分析

试验结果用 SigmaPlot 12.5 进行方差分析, 不同处理采用 LSD 法进行差异显著性检验 (P < 0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对生态系统呼吸 (CO₂ 排放)、N₂O 和 CH₄ 排放的影响

从 CO₂ 排放量看, 早稻季和晚稻季 4 个处理间没有显著差异, 晚稻季 CK、N1、N2 和 N3 处理分别比早稻季增加了 9.3%、8.7%、9.1% 和 7.5%。从 N₂O 排放量看, CK 处理显著高于其他氮素处理, 在早稻季比 N1、N2 和 N3 处理分别高出 31.7%、27.2% 和 43.7%, 晚稻分别高出 20.0%、31.5% 和 40.6% (P < 0.05); 早稻季 N3 处理 (含缓控肥) 显著低于 N2 处理 22.8% (P < 0.05); 晚稻季的 N₂O 排放量高于早稻季。从 CH₄ 排放量看, 晚稻季各处理高于早稻季 4 倍以上。与 CK 相比, 早稻季 N1、N2、N3 处理的 CH₄ 排放增加 13.1%、13.9% 和 21.4% (P < 0.05), 晚稻分别增加 19.4%、12.7% 和 13.7% (P < 0.05)。

2.2 当季作物尺度农田土壤固碳效应

基于 2016 年地上部碳含量, 计算得到总初级生产力 (GPP)。各处理之间 GPP 没有显著差异 (表 2)。

表 1 不同施肥处理早稻和晚稻季温室气体排放量 (kg/hm²)

Table 1 Cumulative greenhouse gas emissions in early and late rice seasons under different fertilizer treatments

水稻类型 Rice type	处理 Treatment	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
早稻 Early rice	CK	14634 ± 2158 a	4.02 ± 0.08 a	70.04 ± 3.25 b
	N1	14516 ± 1275 a	2.74 ± 0.20 b	79.19 ± 3.23 a
	N2	14656 ± 2259 a	2.93 ± 0.25 b	79.78 ± 3.38 a
	N3	14962 ± 891 a	2.26 ± 0.07 c	85.43 ± 7.69 a
晚稻 Late rice	CK	17748 ± 1224 a	5.27 ± 0.45 a	326.95 ± 10.88 b
	N1	17285 ± 2159 a	4.11 ± 0.29 b	394.75 ± 10.27 a
	N2	17576 ± 2245 a	3.69 ± 0.53 b	367.51 ± 15.05 a
	N3	17380 ± 1449 a	3.03 ± 0.11 c	366.11 ± 9.39 a

注 (Note): 数据为 2016 年平均值 ± SD The data are average ± SD in 2016; CK—100% 普通尿素氮 100% urea N; N1—80% 普通尿素氮 + 20% 有机肥氮 80% urea N + 20% organic N; N2—N1 + Si, S, Zn; N3—50% 普通尿素氮 + 30% 缓释氮 + 20% 有机氮 + Si, S, Zn 50% urea N + 30% slow release N + 20% organic N + Si, S, Zn. 同列数据后不同字母表示同一季节不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments in the same season ($P < 0.05$).

表 2 当季作物尺度农田生态系统净碳收支平衡 (C kg/hm²)

Table 2 Net carbon budget of agro-ecosystem over one growth season

水稻类型 Rice type	处理 Treatment	籽粒 Grain	秸秆 Straw	根茬 Root	根沉积 Rhizodeposit	凋落物 Litter	GPP	肥料 Fertilizer	净碳收支 NECB
早稻 Early rice	CK	3449 ± 232 a	3812 ± 256 a	726 ± 48 a	1198 ± 80 a	399 ± 26 a	16524 ± 644 a	0	9031 ± 477 a
	N1	3710 ± 103 a	4100 ± 142 a	781 ± 21 a	1288 ± 36 a	429 ± 12 a	17772 ± 1446 a	447	10490 ± 985 a
	N2	3547 ± 216 a	3920 ± 239 a	746 ± 45 a	1232 ± 75 a	410 ± 26 a	16991 ± 1601 a	447	9834 ± 585 a
	N3	3639 ± 319 a	4022 ± 335 a	766 ± 64 a	1264 ± 98 a	421 ± 36 a	17434 ± 1887 a	447	10096 ± 868 a
晚稻 Late rice	CK	2398 ± 133 a	2650 ± 154 a	504 ± 28 a	757 ± 44 a	277 ± 16 a	11355 ± 646 a	0	3871 ± 173 b
	N1	2570 ± 297 a	2840 ± 337 a	541 ± 51 a	811 ± 50 a	297 ± 18 a	12170 ± 1298 a	447	5037 ± 412 a
	N2	2520 ± 321 a	2785 ± 397 a	530 ± 43 a	795 ± 59 a	291 ± 21 a	11932 ± 1450 a	447	4790 ± 436 a
	N3	2618 ± 195 a	2893 ± 232 a	551 ± 30 a	826 ± 66 a	303 ± 28 a	12398 ± 950 a	447	5212 ± 359 a

注 (Note): 数据为 2016 年平均值 ± SD Data in the table are mean ± SD in 2016; CK—100% 普通尿素氮 100% urea N; N1—80% 普通尿素氮 + 20% 有机肥氮 80% urea N + 20% organic N; N2—N1 + Si, S, Zn; N3—50% 普通尿素氮 + 30% 缓释氮 + 20% 有机氮 + Si, S, Zn 50% urea N + 30% slow release N + 20% organic N + Si, S, Zn. NECB—net ecosystem carbon budget. 同列数据后不同字母表示同一季节不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column indicate significant difference among different treatments in the same growth season ($P < 0.05$).

但是多年施用有机肥的 3 个处理与 CK 相比, 表现出籽粒和秸秆碳含量呈增加趋势。加上有机肥投入的碳, N1、N2 和 N3 的净碳收支 (NECB) 在晚稻季中显著高于 CK ($P < 0.05$)。同时, 因为 2016 年早稻的籽粒和秸秆碳含量高于晚稻, 所以早稻净碳收支高于晚稻 (表 2)。

2.3 综合净温室效应

综合考虑土壤固碳效应、农业操作、肥料投入所产生碳排放 (表 3) 的综合净温室效应 (net GWP, 表 4), 在早稻季表现为碳汇, 在晚稻季表

现为碳源, 主要原因是晚稻季 CH₄ 排放量是早稻的 4 倍以上 (表 1), 而早稻产量高于晚稻产量 (表 4)。综合全年结果看, 净温室效应为碳源 (表 4)。晚稻季 N1、N2 和 N3 处理的土壤固碳效应与 CK 相比差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。晚稻季 N3 处理的综合净温室效应显著低于 CK, 全年净温室效应为 N3 < N2 < N1 < CK。温室气体排放强度 (GHGI) 早稻季低于晚稻季。肥料处理间, 早稻的温室气体强度受肥料影响, 主要表现为 CK < N1 ≈ N2 ≈ N3。

表 3 农事操作和化学品投入所产生的碳排放量

Table 3 Amount of carbon emission from farmer practices and chemical inputs

农事操作 Farming practice	燃油 (L/hm ²) Diesel	碳排放量 (kg/hm ²) C emission	肥料 Fertilizer	施用量 (kg/hm ²) Applying rate	C 排放量 (kg/hm ²) C emission
翻地 Tillage	14.74	13.9	尿素 Urea	135/165/195	234.8/287.1/339.2
耙地 Disking	6.15	5.8	缓控肥 CU	50/62	131/162
秸秆粉碎 Stover smashing	16.3	15.3	P ₂ O ₅	90	16
			K ₂ O	150	22.5
			Si, Zn, S	63.5	11

注 (Note): 施用量中 135 表示早稻 N1、N2 施入的普通尿素氮, 165 表示早稻农民施氮量和晚稻 N1 和 N2 施氮量, 195 表示晚稻农民施氮量; 50/62 分别表示早稻和晚稻 N3 处理中加入的缓控肥 135 means urea N applied in early rice season under N1 and N2; 165 means urea N applied in early rice season under CK, and in late rice season under N1 and N2; 195 means urea N applied under CK in late rice season; 50/62 means slow release N applied in early and late rice season, respectively.

表 4 稻田土壤固碳效应、综合净温室效应和温室气体强度

Table 4 Soil organic C sequestration potential, net global warming potential and greenhouse gas intensity

水稻类型 Rice type	处理 Treatment	土壤固碳效应 δSOC (C kg/hm ²)	综合净 GWP Net GWP (CO ₂ kg/hm ²)	全年净 GWP Whole year GWP (CO ₂ kg/hm ²)	产量 Yield (kg/hm ²)	温室气体排放强度 GHGI (CO ₂ -eq kg/kg, grain)
早稻 Early rice	CK	1923 ± 107a	-2708 ± 512 a		9076 ± 610 a	-0.40 ± 0.03b
	N1	2234 ± 187 a	-4166 ± 208 b		9763 ± 273 a	-0.50 ± 0.01a
	N2	2094 ± 227 a	-3586 ± 309 ab		9334 ± 569 a	-0.46 ± 0.03a
	N3	2150 ± 102 a	-3811 ± 177 b		9577 ± 840 a	-0.47 ± 0.04a
晚稻 Late rice	CK	824 ± 81 b	9036 ± 108 a	6327 ± 226 a	6311 ± 368 a	1.25 ± 0.07 a
	N1	1072 ± 102 a	9526 ± 285 a	5360 ± 103 b	6764 ± 803 a	1.27 ± 0.16 a
	N2	1020 ± 90 a	8845 ± 362 ab	5258 ± 223 b	6633 ± 947 a	1.19 ± 0.15 a
	N3	1110 ± 73 a	8301 ± 206 b	4490 ± 306 c	6889 ± 552 a	1.07 ± 0.08 a

注 (Note): GWP—温室效应 Global warming potential; GHGI—温室气体排放强度 Greenhouse gas intensity; CK—100% 普通尿素氮 100% urea N; N1—80% 普通尿素氮 + 20% 有机肥氮 80% urea N + 20% organic N; N2—N1 + Si, S, Zn; N3—50% 普通尿素氮 + 30% 缓释氮 + 20% 有机氮 + Si, S, Zn 50% urea N + 30% slow release N + 20% organic N + Si, S, Zn. 同列数据后不同字母表示同一季节不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column indicate significant difference among different treatments in the same growth season ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 当年尺度土壤固碳速率的估计

土壤有机质变化很慢, 因此利用地上部生物量来估计水稻碳输入, 并通过气体碳输出间的平衡, 估计当季/年尺度土壤固碳速率。从结果看, (δSOC) 全部为正值, 表明土壤有机质增加, 其年增加速率为 C 2.7~3.2 t/hm² (表 4)。数值高于 Pan 等^[26] 依据 20 世纪 80 年代初第二次土壤普查数据估算的我国南方稻田固碳速率 (C 0.13~2.20 t/hm²), 也高于湖南双季稻不同施肥处理下的固碳速率 (C 0.29~0.61 t/hm²^[8]和 C 1.11~1.43 t/hm²^[9])。主要原因是前者

用第二次土壤普查数据, 肥料投入量和产量远低于现在, 后者施用碳氮比低的菜籽饼肥或绿肥, 易于分解, 所以生态系统呼吸远高于本研究。除了有机肥数量和种类外, 稻田固碳效率还与初始有机碳含量存在线性负相关关系^[27], 湖南水稻土初始有机质含量为 32.8 g/kg, 远高于本研究土壤 23.6 g/kg, 因此这也可能是后者呼吸增加的一个原因。然而, 在有机质含量为 34.9 g/kg 的湖南双季稻田长期秸秆还田条件下, 土壤固碳速率为 C 1.8~2.6 t/hm²^[26]。说明稻田土壤固碳不仅要考虑初始碳含量, 还要考虑投入物料的数量和分解特性, 以及水稻土中的氧化铁 (与固碳正相关) 和气候因子^[27]。

3.2 早、晚稻农田温室气体排放和综合净温室效应的差异

一般而言,晚稻季温度高更利于有机质分解,再加上晚稻经历更长厌氧期,所以晚稻季温室气体排放高于早稻。在本试验地区,晚稻季平均温度 25℃,早稻季平均温度 18℃,晚稻所有温室气体排放远大于早稻,尤其是 CH₄ (表 1)。刘英烈等^[8]、商庆银^[28]对湖南浏阳和桃源双季稻的研究得到过相同的结果。但刘晓雨等^[29]在湖南望城的研究结果是 CO₂ 排放量早、晚稻季相同,CH₄ 排放量早稻显著高于晚稻,而 N₂O 排放量早稻显著低于晚稻。表明温室气体的排放受温度^[8]、水分管理(水层厚度或烤田)^[8]、施肥量^[29]、肥料类型(尤其是有机物料)^[28-29]以及施肥时间^[8]等多个因素的影响。

将土壤固碳考虑到温室气体效应后,我们的计算结果早稻季净温室效应为碳汇、晚稻季为碳源(表 4)。湖南双季稻长期免耕、秸秆还田条件下得到的结果也是如此^[30]。而在湖北望城和江西进贤,两稻季温室效应没有差异^[29]。

本试验中,两稻季温室气体排放强度值(GHGI,表 4)与湖南长沙早稻(CO₂-eq 0.28 kg/kg, grain)、晚稻(CO₂-eq 0.22~0.93 kg/kg, grain)接近^[30],与湖南浏阳^[8]的晚稻结果(CO₂-eq 1.09~1.34 kg/kg, grain)相近。综合全年净温室效应是碳源(表 4),表明稻田会增加温室效应。但从数值大小看,江西综合净温室效应 CO₂ 4.5~6.3 t/hm²(表 4)远低于商庆银^[28]在湖南测定的结果(CO₂ 18.7~24.8 t/hm²),主要原因是湖南秸秆加绿肥处理投入的有机氮远高于化肥氮,结果 CH₄ 和 CO₂ 排放量是江西的 1.5~2 倍。总之,从长期平衡施肥、有机无机肥配施试验看,早稻的增产潜力是晚稻的 2 倍^[24]。因此,在温度较低的早稻季增加产量,减少温室气体排放,有可能是降低温室气体排放强度(GHGI)的有效方法。

3.3 同一季节不同施肥处理对农田温室气体排放、综合净温室效应和温室气体强度的影响

3.3.1 同一季节不同施肥处理对 CH₄ 排放量的影响

不论是早稻还是晚稻,有机无机肥配施处理(N1, N2 和 N3) CH₄ 排放量显著高于 CK 处理(表 1)。这与在江西进贤^[29]、湖北浏阳^[8]、湖南桃源^[28]长期定位试验得到的结果一致。说明有机肥投入一方面在淹水条件下通过有机质分解加速土壤氧化还原电位下降,促进甲烷菌的活性;另一方面为甲烷菌提供底物。相反,湖北望城^[29]长期秸秆还田(NPKS)、添加

猪粪(NPKM)与 NPK 处理相比,CH₄ 排放没有显著差异。说明除了有机肥投入数量和种类影响 CH₄ 排放量^[29],长期有机肥投入后,还有可能存在饱和点或平衡点,即使有机肥投入量再增加也不会导致 CH₄ 排放量增加^[9]。

在秸秆还田和用 20% 有机肥替代普通尿素氮(N1 处理)的基础上,再增加 Si、Zn、S 肥(N2 处理),没有显著影响水稻产量和温室气体排放量,这是因为秸秆和有机肥本身提供了大量的水稻必需的 Si 和微量元素,因此, N1 和 N2 处理在测定的指标中均没有显著差异。用缓控肥替代普通尿素结合有机肥(N3 处理)与 N1 处理相比,CH₄ 排放量差异不显著。田伟等^[31]研究发现不论是用缓控肥替代全部化肥,还是缓控肥、化肥和有机肥配施都不影响 CH₄ 的排放量^[31],而李健陵等^[5, 32]发现,不配施有机肥的前提下,用包膜尿素替代普通尿素可显著降低双季稻 CH₄ 排放。本质上化肥影响 CH₄ 排放主要是通过: 1) NH₄⁺ 促进植物生长和根系分泌物的释放,从而增加 CH₄ 产生的前体; 2) NH₄⁺ 和 CH₄ 共同竞争甲烷单加氧酶,减少 CH₄ 氧化,促进 CH₄ 排放; 3) NH₄⁺ 促进甲烷氧化菌的生长,从而减少 CH₄ 排放^[33]。缓控肥通过平稳释放 NH₄⁺,从而达到减少排放的目的^[5]。本试验处理为化肥和有机肥配施,在 C、N 同时存在的情况下,通过增加微生物固持,从而减少游离 NH₄ 和易分解碳底物,从而起到与缓控肥相似的作用,所以 N1 和 N3 两种处理间并没有表现出显著差异。

3.3.2 同一季节不同施肥处理对生态系统呼吸的影响

不论是早稻还是晚稻,不同施肥处理生态系统 CO₂ 排放量没有显著差异。这与湖南望城双季稻长期不同施肥试验结果^[29]相同,该研究发现长期秸秆还田(NPKS)和有机无机肥配施(猪粪, NPKM)与 NPK 处理相比,没有增加生态系统呼吸。主要原因是 CO₂ 通量与作物生长有关^[12]。本试验的 4 种处理均在秸秆还田基础上进行,长期秸秆还田带入土壤中的碳素远高于有机肥,对土壤肥力的贡献也大于有机肥,因此,水稻产量和地上部生物量都没有显著差异,最终土壤-作物的生态系统呼吸无显著差异。而在江西进贤和湖南桃源的试验, NPK 对照基本没有添加外来碳,因此,其生态系统呼吸大大低于早稻季绿肥/晚稻季猪粪处理(江西进贤)和秸秆加绿肥双季稻轮作区(湖南桃源)。湖南浏阳的短期施肥试验(NPK + 菜籽饼肥)结果^[8]也是如此。刘晓雨^[29]的分析还表明,在长期不同施肥下,微生物通过改

变数量和结构来调整外源碳的利用方式和效率, 也影响生态系统 CO₂ 排放量。总而言之, 是否添加外源碳是系统呼吸强度变化的主要原因。

3.3.3 同一季节不同施肥处理对 N₂O 气体排放的影响

不论是早稻季还是晚稻季, 与 CK 处理相比, 以 20% 的猪粪氮替代普通尿素氮 (N1、N2、N3) 降低了 N₂O 排放, 而在此基础上将普通尿素氮的 30% 改为缓释肥进一步显著降低了 N₂O 排放, 即 N3 < N1 ≈ N2 < CK (表 1)。这与 Yao 等^[34]、Zou 等^[34] 在水稻-小麦系统中得到的结果一致。在江西进贤早稻季 NPKM (绿肥/猪粪) 处理 N₂O 气体排放显著高于 NPK 处理, 晚稻季没有差异, 是因为绿肥中氮素的有效性高, 其与 NPK 配施增加了氮素的释放。湖南浏阳 (菜籽饼肥)、湖南桃源 (秸秆和绿肥) 两季都是 NPKM > NPK 处理, 也可以从其施用的有机肥中氮素的有效性得到解释^[8-9]。而在湖北望城两稻季 NPK、NPKS、NPKM 处理的 N₂O 的排放量都没有明显差异, 可能与 3 个处理中包含的无机氮量相等有关^[8]。

在海南, 降低化肥用量和采用部分包膜肥均显著降低了晚稻 N₂O 排放量^[31]。但并非所有的包膜肥都可以降低 N₂O 排放量。如湖北荆州树脂包膜尿素没有显著减少 N₂O 的排放量^[32], 硫包膜尿素也没有降低 N₂O 排放量^[5]。这与包膜肥中氮素的释放量是否与作物吸收相匹配有关。综合来看, 在不增加氮素总量的前提下, 以有机肥替代部分化肥, 或者采用氮素释放与作物吸收相匹配的缓释氮肥都可以有效降低 N₂O 排放量。

3.3.4 同一季节不同施肥处理对综合净温室效应 (net GWP) 和温室气体排放强度 (GHGI) 的影响 有机肥施用增加了土壤碳输入, 而包膜尿素的应用减少 N₂O 排放量, 所以早、晚稻季综合净 GWP 都是 CK > N3, 全年净 GWP 为 CK > N1 > N2 > N3 (表 4)。但是, 水稻的温室气体排放强度 (GHGI) 在早稻季 CK 处理最高, 而晚稻季所有处理没有显著差异 (表 4)。究其原因, 是包膜肥显著提高了单位氮投入的产量。因此, 长期有机肥投入需要增加水稻产量来抵消增加的温室气体排放, 如果没有增产效应, 则含有机肥的施肥措施就会导致 GHGI 的增加。

4 结论

在秸秆还田基础上, 用有机肥替代部分化肥, 再施用一定比例的包膜尿素可有效提高水稻产量和

土壤固碳效应, 抵消有机肥投入增加的综合净温室效应, 显著降低 N₂O 排放。晚稻温室气体排放量高于早稻, 因此, 早稻比晚稻通过施肥降低温室效应的潜力更大。

参 考 文 献:

- [1] Linguist B, Groenigen K J, Adviento-Borbe M A, *et al.* An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 194-209.
- [2] Lindau C W, Bollich P K, de Laune R D, *et al.* Effect of urea fertilizer and environmental factors on CH₄ emissions from a Louisiana, USA rice field[J]. *Plant and Soil*, 1991, 136: 195-203.
- [3] Krüger M, Frenzel P. Effects of N-fertilisation on CH₄ oxidation and production, and consequences for CH₄ emissions from microcosms, and rice fields[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(5): 773-784.
- [4] Zheng H, Huang H, Yao L, *et al.* Impacts of rice varieties and management on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice fields in China: a meta-analysis[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11: 3685-3693.
- [5] 王斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 314-323.
Wang B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 314-323.
- [6] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3227-3238.
Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3227-3238.
- [7] 丁维军, 陶林海, 吴林, 等. 新型缓释尿素对削减温室气体、NH₃ 排放和淋溶作用的研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(10): 2840-2847.
Ding W J, Tao L H, Wu L, *et al.* Effects of controlled release urea on greenhouse gases, NH₃ emissions and eluviations[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10): 2840-2847.
- [8] 刘英烈. 不同氮肥水平集约化栽培模式双季稻生态系统温室气体收支的田间观测[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2016.
Liu Y L. Field studies on balance of greenhouse gases in annual double rice cropping systems under intensified cultivation patterns at different nitrogen rates[D]. Nanjing: PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2016.
- [9] Shang Q Y, Yang X S, 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: 2196-2210.
- [10] Yang X, Shang Q, Wu P, *et al.* Methane emissions from double rice agric under long-term fertilizing systems in Hunan, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(3): 308-316.
- [11] Yao Z, Zhou Z, Zheng X, *et al.* Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystems in China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1-2): 315-330.
- [12] 董玉红, 欧阳竹. 有机肥对农田土壤二氧化碳和甲烷通量的影响

- [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1303–1307.
Dong Y H, Ouyang Z. Effects of organic manures on CO₂ and CH₄ fluxes of farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1303–1307.
- [13] 万永辉. 专用肥和壮秧剂对水稻生长发育和产量形成的影响[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2014.
Wan Y H. Rice special compound fertilizer and seedling strengthen agent on rice growth and yield formation[D]. Wuhan: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2014.
- [14] Cai Z, Tsuruta H, Gao M, *et al.* Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(1): 37–45.
- [15] Zhang G, Zhang X, Ma J, *et al.* Effect of drainage in the fallow season on reduction of CH₄ production and emission from permanently flooded rice field[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(1): 81–91.
- [16] Zhang X, Xu X, Liu Y L, *et al.* Global warming potential and greenhouse gas intensity in rice agriculture driven by high yields and nitrogen use efficiency[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13: 2701–2714.
- [17] Zhang X Y, Fan C H, Ma Y C, *et al.* Two approaches for net ecosystem carbon budgets and soil carbon sequestration in a rice-wheat rotation system in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 100: 301–313.
- [18] 熊正琴, 张晓旭. 氮肥高效施用在低碳农业中的关键作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1433–1440.
Xiong Z Q, Zhang X X. Key role of efficient nutrient application in low carbon agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1433–1440.
- [19] Huang Y, Zhang W, Sun W, *et al.* Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999[J]. *Ecological Applications*, 2007, 17(3): 692–701.
- [20] 芦思佳. 施肥对黑土有机碳组分及碳收支的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2011.
Lu S J. Impact of fertilization on the component and budget of black soil organic carbon[D]. Harbin: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2011.
- [21] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长和施氮水平对土壤有机碳更新的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(2): 280–286.
Yang L F, Cai Z C. Effect of growing maize and N application on the renewal of soil organic carbon[J]. *Acta Scientia Circumstantiae*, 2006, 26(2): 280–286.
- [22] Kimura M, Murase J, Lu Y. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation organic materials and the fates of their end products (CO₂ and CH₄)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(9): 1399–1416.
- [23] Xie Z, Liu G, Bei Q, *et al.* CO₂ mitigation potential in farmland of China by altering current organic matter amendment pattern[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(9): 1351–1357.
- [24] Lal R. Carbon emissions from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30: 981–990.
- [25] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1): 217–232.
- [26] Pan G, Li L, Wu L, Zhang X. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79–92.
- [27] 周萍, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 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 P, Pan G X, Li L Q, Zhang X H. 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.
- [28] 商庆银. 长期不同施肥制度下双季稻田土壤肥力与温室气体排放规律的研究[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2012.
Sang Q Y. Studies on soil fertility and carbon sequestration and mitigation under long-term fertilization in Chinese double rice-cropping systems[D]. Nanjing: PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2012.
- [29] 刘晓雨. 施用有机物料对农田固碳减排及生产力的影响: 田间试验及整合研究[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2013.
Liu X Y. Effects of soil organic amendment on productivity and greenhouse gas mitigation of croplands: field studies and synthetic analysis[D]. Nanjing: PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2013.
- [30] 薛建福. 耕作措施对南方双季稻田碳、氮效应的影响[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2015.
Xue J F. Effects of tillage on soil carbon and nitrogen in double paddy cropping system of southern China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.
- [31] 田伟, 伍延正, 汤水荣, 等. 不同施肥模式对热区晚稻水田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40: 2426–2429.
Tian W, Wu Y Z, Tang S R, *et al.* Effects of different fertilization modes on greenhouse gas emission in paddy fields in hot areas[J]. *Environmental Science*, 2019, 40: 2426–2429.
- [32] 李健陵, 李玉娥, 周守华, 等. 节水灌溉、树脂包膜尿素和脲酶/硝化抑制剂对双季稻温室气体减排的协同作用[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(20): 3958–3967.
Li J L, Li Y E, Zhou S H, *et al.* Synergistic effects of water-saving irrigation, polymer-coated nitrogen fertilizer and urease/nitrification inhibitor on mitigation of greenhouse gas emissions from the double rice cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3958–3967.
- [33] Schimel J. Global change: rice, microbes and methane[J]. *Nature*, 2000, 403: 375–377.
- [34] Zou J, Huang Y, Lu Y, *et al.* Direct emission factor for N₂O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(26): 4755–4765.