

文章编号:1000-8551(2020)02-0376-07

南方双季稻区不同复种方式对稻田综合温室效应的影响

伍思平¹ 哇 锋¹ 肖小军² 张 俊³ 吴自明¹ 曾勇军¹ 黄 山^{1,*}⁽¹⁾ 江西农业大学教育部/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 江西 南昌 330045;⁽²⁾ 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心/农业农村部江西耕地保育科学观测实验站,江西 南昌 331717;⁽³⁾ 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘 要:为明确南方双季稻区不同复种方式对稻田综合温室效应和温室气体排放强度的影响,试验设置油菜—一季中稻(R-MR)、冬季绿肥(紫云英)—早稻—晚稻(GM-ER-LR)、冬闲—早稻—晚稻(WF-ER-LR)3个处理,采用静态暗箱—气相色谱法监测周年温室气体排放,探明不同复种方式对周年作物产量、稻田全球增温潜势(GWP)、籽粒能量产出(GEY)和全球增温潜势强度(GWPI)的影响。结果表明,与R-MR相比,GM-ER-LR和WF-ER-LR显著增加了CH₄累积排放量(分别提高1.27倍和1.18倍),显著降低了N₂O累积排放总量(分别降低34.1%和49.4%),GM-ER-LR和WF-ER-LR的CH₄和N₂O累积排放量无显著差异。与R-MR相比,GM-ER-LR和WF-ER-LR显著提高了周年GEY(分别提高28.6%和27.0%)。在100年时间尺度上,GM-ER-LR和WF-ER-LR的稻田GWP分别是R-MR的1.27倍和1.18倍,GWPI分别较R-MR提高100%和50%。因此,GM-ER-LR和WF-ER-LR有利于提高作物产量,但会增加稻田综合温室效应和温室气体排放强度。鉴于双季稻区中稻面积有增大的趋势,综合环境效益和经济效益,油菜—一季中稻减排增效效果更好。

关键词:复种方式;双季稻;排放通量;综合温室效应;全球增温潜势强度

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.02.0376

甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是导致全球变暖的重要温室气体^[1-2]。大气CH₄和N₂O浓度已经由工业革命前的715 μL·m⁻³和270 μL·m⁻³分别增加到1 803 μL·m⁻³和324 μL·m⁻³,并且以每年0.2%~0.3%的速度增长^[2]。全球农业生态系统每年温室气体排放总量为5.1~6.1 Pg,占人为活动所引起的温室气体排放总量的10%~12%^[3]。我国是世界上最大的稻米生产国^[4]。同时,稻田也是大气温室气体重要排放源^[2,5]。因此,研究如何协同实现水稻增产和稻田温室气体减排具有重要意义。

南方双季稻区是我国重要的粮油生产基地^[6-7]。双季稻区具有长达5个多月的冬闲季,期间种植紫云英或油菜,能够利用该地区冬闲季充足的光温水资源,提高双季稻系统的周年生产力^[8-9]。在不同长期定位

试验中,胡安永等^[10]研究表明,稻田旱作期间CH₄和N₂O排放量表现为冬小麦高于休闲和紫云英处理;与冬闲处理相比,冬小麦处理显著增加稻田全球变暖潜势,冬闲和紫云英处理间总变暖潜势无显著差异。相比于冬水田,水旱轮作有利于降低CH₄排放,但会促进N₂O的排放^[11]。张啸林^[12]研究表明,双季稻—油菜轮作体系中CH₄累积排放量显著高于单季稻—小麦轮作体系。由于农村劳动力的大量转移、种粮收益低等原因,双季稻区中稻的面积有增大趋势^[13]。但是,前人研究多集中在双季稻系统下不同冬闲处理对稻田温室气体排放的影响^[14-15],对单、双季稻系统的比较研究较少。为此,本研究于2016-2017年在南方双季稻区开展田间试验,设置油菜—一季中稻、冬季绿肥(紫云英)—早稻—晚稻,冬闲—早稻—晚稻3种轮作方式,监

收稿日期:2019-01-07 接受日期:2019-03-23

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFD0300903),公益性行业(农业)科研专项(201503122),江西省重点研发项目(20161BBF60111)

作者简介:伍思平,男,主要从事作物高产理论与技术研究。E-mail:571892227@qq.com

* 通讯作者:黄山,男,副教授,主要从事农田生态学研究。E-mail:ecohs@126.com

测不同复种方式的作物产量、 CH_4 和 N_2O 气体排放,以期为南方双季稻田作物丰产和温室气体减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 10 月–2017 年 10 月在江西省南昌市进贤县红壤研究所(116°17'E, 28°35'N)进行。该试验地属于亚热带季风气候,2016–2017 年平均降水量 1 588 mm。供试土壤为第四纪红色粘土发育的潜育型水稻土。试验前 0~20 cm 耕作层土壤理化性质为 pH 值 5.9、有机质 31.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 160.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 56.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 126.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验采用完全随机区组设计,各小区面积均为 48 m^2 。设置 3 个处理:油菜—季中稻(记作 R-MR),油菜种子于 2016 年 10 月 12 日(中稻收获后)人工均匀撒播入稻田,播种量为 6.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在 2017 年 5 月 10 日人工收获后,将油菜秸秆切成约 10 cm 小段原位还田,种植中稻;冬季绿肥(紫云英)—早稻—晚稻(记作 GM-ER-LR),紫云英种子于 2016 年 10 月 12 日(双季晚稻收获前 10 d 左右)人工均匀撒播入稻田,播种量为 30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在 2017 年 4 月 28 日将紫云英原位翻耕入稻田,种植双季早稻和晚稻;冬闲—早稻—晚稻(记作 WF-ER-LR),冬季休闲,种植双季早稻和晚稻。每个处理 3 次重复。

供试品种:油菜品种为湘油 1035,由湖南农业大学提供;冬种紫云英品种为余江大叶,为当地繁种;中稻品种为常规稻金农丝苗,由广东省农业科学院水稻研究所超级稻育种研究室提供;早、晚稻品种相同,均为常规稻中早 39,购自江西进贤惠农种业有限公司。早稻收获后将秸秆切成约 10 cm 小段原位还田,中稻和晚稻收获后秸秆均匀平铺在原位土壤表层。早、中、晚稻季秧苗均采用大田水育秧方式,早稻播种日期为 4 月 8 日,秧龄 28 d 移栽,栽插规格为 25.0 cm×11.0 cm,基本苗为 4 株/穴;中稻播种日期为 5 月 11 日,秧龄 25 d 移栽,栽插规格为 25.0 cm×15.0 cm,基本苗 4 株/穴。晚稻播种日期为 7 月 6 日,秧龄 20 d 移栽,栽插规格为 25.0 cm×11.0 cm,基本苗为 3 株/穴。油菜季和中稻季氮肥、磷肥和钾肥用量相同,分别为纯氮 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 67.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 K_2O 120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中油菜季以包膜尿素作为氮肥,按基肥:苗肥:薹肥=5:2:3 施用,中稻季以常规尿素作为氮肥,

按基肥:分蘖肥:薹肥=5:2:3 施用;油菜季和中稻季均以钙镁磷肥作为磷肥,做基肥一次性施用;油菜季和中稻季均以氯化钾作为钾肥,油菜季按基肥:薹肥=5:5 施用,中稻季按基肥:薹肥=5:5 施用。早晚稻季均以常规尿素作为氮肥,施用量为纯氮 120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥和钾肥施用量和施用方式与中稻季一致。

在油菜季、紫云英季和休闲季田间水分自然排干;在早、中、晚稻季田间水分管理模式为秧苗移栽后保持 3 cm 左右水层,分蘖末期排水烤田,复水后采用干湿交替灌溉方式,直至水稻收获前 10 d 左右稻田水分自然排干。早、中、晚稻季开始排水晒田日期分别为 5 月 30 日、7 月 5 日和 8 月 12 日,复水日期分别为 6 月 14 日、7 月 20 日和 9 月 1 日,试验期各处理水层深度动态变化如图 1 所示。本试验始于 2015 年,气体监测从 2016 年油菜季开始。

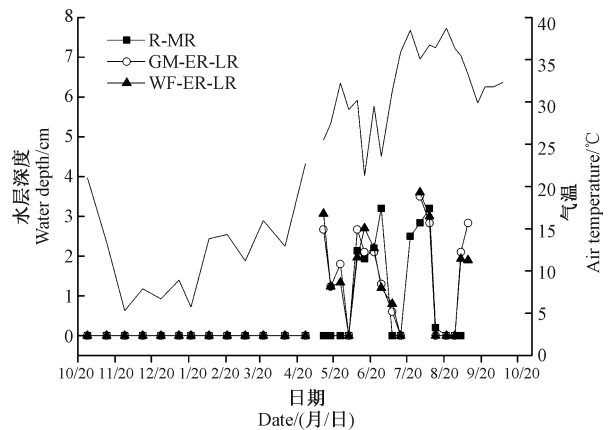


图 1 试验周期内田间水层深度和气温动态变化

Fig.1 The dynamic change of water depth and air temperature during the experimental period

1.3 测定项目与方法

1.3.1 温室气体排放 采用静态暗箱—气相色谱法监测田间温室气体的排放通量^[16]。暗箱规格为 50 cm×50 cm×50 cm,暗箱由不锈钢金属材质制成,当水稻或油菜高度>50 cm 时,需额外增添一个或两个相同尺寸的双向开口的箱体,此时箱体总高度为 100 或 150 cm。箱体表面包裹海绵和锡箔纸,避免气体采集过程中太阳照射导致暗箱内温度升高过快。暗箱内顶部安装一个电压为 12 V 的小型风扇,外接便携式蓄电池,气体采集过程中,使暗箱内气体充分混匀。油菜季、紫云英季和冬闲季温室气体采集时,在油菜和紫云英种植小区内,选取出苗均匀、长势基本一致的地点,固定一个上部留有 3 cm 深的凹槽,下部 15 cm 深的底座,将底座直接插入土壤。在早稻季、中稻季和晚稻季,稻

田翻耕前底座移出稻田,秧苗移栽后,底座再次埋入稻田。早晚稻季底座内秧苗均为 8 穴,中稻季底座内秧苗为 6 穴。田间气体采集时,暗箱与底座或暗箱与暗箱连接处的凹槽内注水以隔绝空气。水稻生长季,稻田温室气体每 7 d 采集一次,油菜季、紫云英季和冬闲季每 15 d 采集一次。气体采集时,同步记录田间气温动态变化(图 1)。田间气体采集时间为上午 9:00–11:00,分别在 0、10、20、30 min 用 50 mL 针孔注射器来回抽取箱内气体多次后,采集 50 mL 气体转入 100 mL 预先抽真空采气袋,迅速带回实验室用 Agilent 7890b 气象色谱仪(美国安捷伦科技有限公司)测定样品 CH_4 和 N_2O 气体浓度。 CH_4 和 N_2O 检测器分别为氢火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)和电子捕获检测器(electroncapture detector, ECD)。温室气体测定时仪器具体参数设定参照文献[17]。温室气体排放通量计算公式如下:

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

式中, F 为温室气体排放通量($\text{CH}_4, \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $\text{N}_2\text{O}, \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 表示标准状态下的气体密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); h 为采气暗箱的净高度(cm); dc/dt 为单位时间内暗箱内温室气体的排放速率; T 为采气过程中暗箱内的平均温度($^{\circ}\text{C}$);273 为气态方程常数。

根据测定 CH_4 和 N_2O 气体浓度与气体采集时间的关系曲线计算温室气体排放通量(拟合曲线相关系数大于 0.90);当测定的 CH_4 或 N_2O 气体浓度较低时,气体浓度与时间拟合曲线相关系数大于 0.80 亦可。加权平均得到试验周期内 CH_4 累积排放总量 [$\text{Ac}(\text{CH}_4), \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$] 和 N_2O 累积排放总量 [$\text{Ac}(\text{N}_2\text{O}), \text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$]。

1.3.2 综合温室效应、籽粒能量产出和全球增温潜势强度 综合温室效应在 100 年时间尺度上,单位质量的 CH_4 和 N_2O 的综合温室效应(global warming potential, GWP)分别为 CO_2 的 25 倍和 298 倍^[2],其计算公式如下:

$$\text{GWP} = 25\text{Ac}(\text{CH}_4) + \frac{[298\text{Ac}(\text{N}_2\text{O})]}{1000} \quad (2)$$

采用全球增温潜势强度(global warming potential intensity, GWPI)表示温室气体的排放强度。GWPI 表示生产单位等效籽粒能量产出(grain energy yield, GEY)的稻谷对气候变暖的潜势(以每 kg 稻谷产量的综合温室效应 CO_2 当量计算)^[2,18],GEY 和 GWPI 计算公式如下:

$$\text{GEY}(\text{GJ} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{季产量} \times \text{籽粒能源转换因子} \quad (3)$$

$$\text{GWPI}(\text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1}) = \frac{\text{GWP}}{\text{GEY}} \quad (4)$$

水稻籽粒能源转换因子为 $14.5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,油菜籽粒能源转换因子为 $29.9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采用作物的等效籽粒能量产出计算 GWPI,而不是作物的绝对产量,以消除油菜和水稻的物种差异。

1.3.3 产量 在油菜和水稻成熟期,各小区人工收割 10 m^2 ,机械脱粒,称重,取 1 kg 烘干测定含水量,计算干重再统一换算成 14% 的含水率,测定各小区的实际产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.4 数据处理

采用 Origin 9.0 软件作图,运用 SPSS 18.0 进行数据处理,采用 LSD 法于 $P=0.05$ 水平上进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 CH_4 排放通量季节变化

在本试验周期内,各处理 CH_4 排放通量的季节变化范围为 $-0.05 \sim 53.83 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 2)。在油菜季、紫云英季和冬闲季, CH_4 排放通量均趋近于零,而在早、中、晚稻季, CH_4 排放通量动态变化幅度较大。在 R-MR 的中稻季,水稻移栽后 CH_4 排放通量逐渐增加,在 6 月 29 日监测到排放最高峰,中期排水晒田后迅速下降,后期覆水及干湿交替灌溉模式中未监测到较大排放峰。在 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 的早稻季,水稻移栽后 CH_4 排放通量迅速增加,均在 5 月 26 日监测到排放最高峰,中期排水晒田后亦迅速下降,复水后施用穗肥,在 6 月 23 日监测到较大排放高峰,直至

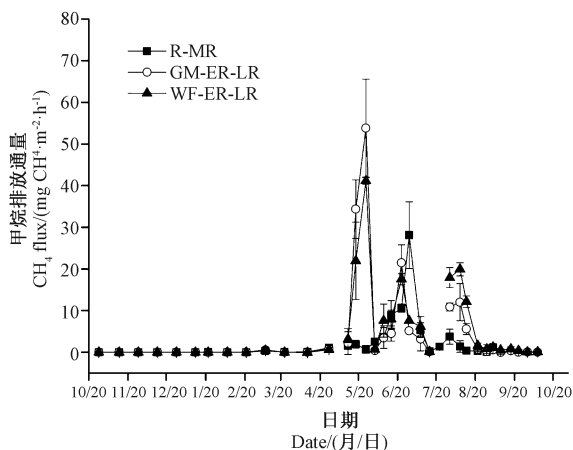


图 2 不同复种方式对稻田 CH_4 排放动态的影响

Fig.2 Effects of different multiple cropping pattern on CH_4 emission fluxes

水稻收获前一周,CH₄ 排放通量趋近于零。而在 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 的晚稻季,水稻移栽后淹水条件下,前三次 CH₄ 排放通量均监测到较大排放高峰,中期排水晒田及后期干湿交替灌溉模式中,CH₄ 排放通

量趋近于零。GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 试验周期内 CH₄ 累积排放总量均显著高于 R-MR,而 GM-ER-LR 与 WF-ER-LR 间无显著差异(表 1)。

表 1 不同复种方式对稻田 CH₄ 累积排放总量的影响

Table 1 Effects of different multiple cropping regimes on total CH ₄ emissions							/kg·hm ⁻²
处理 Treatments	紫云英季 Milk vetch season	油菜季 Rapeseed season	冬闲季 Fallow season	早稻季 Early rice season	中稻季 Middle rice season	晚稻季 Late rice season	周年 Annual
R-MR	-	2.89±1.21	7.73±2.94	-	119.54±28.73	-	130.16±31.99b
GM-ER-LR	4.18±1.37	-	-	245.20±19.10	-	46.60±7.37	295.99±25.93a
WF-ER-LR	-	-	2.72±0.43	195.51±20.37	-	85.70±4.12	283.92±22.28a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same as following.

2.2 N₂O 排放通量季节变化

由图 3 可知,各处理 N₂O 排放规律不一,R-MR 在 3 月 23 日、GM-ER-LR 及 WF-ER-LR 在 2 月 6 日均监测到排放最高峰。3 个处理在水稻生育前中期 N₂O 排放通量趋近于零,均表现为大气 N₂O 较弱的源或汇。R-MR 临近中稻收获前仅监测到一次排放高峰(9 月 3 日),GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 在晚稻季复水后施用穗肥及后期干湿交替灌溉模式下,N₂O 排放通量动态变化幅度很大,两处理均在 9 月 17 日监测到排放最高峰。R-MR 试验周期内 N₂O 累积排放总量显著高于 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR,分别提高 51.8%和 97.7%,而 GM-ER-LR 与 WF-ER-LR 间无显著差异(表 2)。

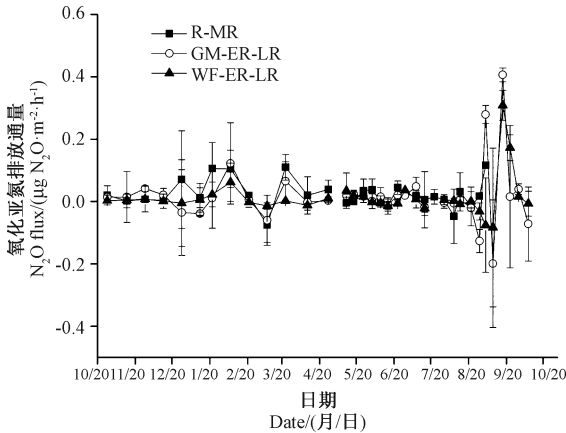


图 3 不同复种方式对稻田 N₂O 排放动态的影响
Fig.3 Effects of different multiple cropping pattern on seasonal variations of N₂O emission fluxes

表 2 不同复种方式对稻田 N₂O 累积排放总量的影响

Table 2 Effects of different multiple cropping pattern on total N ₂ O emissions							/(g·hm ⁻²)
处理 Treatments	紫云英季 Milk vetch season	油菜季 Rapeseed season	冬闲季 Fallow season	早稻季 Early season	中稻季 Middle season	晚稻季 Late season	周年 Annual
R-MR	-	1.30±0.14	0.09±0.02	-	0.34±0.09	-	1.70±0.04a
GM-ER-LR	0.34±0.20	-	-	0.24±0.03	-	0.54±0.05	1.12±0.20b
WF-ER-LR	-	-	0.22±0.23	0.11±0.06	-	0.53±0.07	0.86±0.23b

2.3 稻田 GWP、GEY、GWPI 和周年总产量

GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 试验周期内稻田 GWP、GEY 和 GWPI 均显著高于 R-MR(表 3)。与 WF-ER-LR 相比,GM-ER-LR 周年总产量提高 1.2%,而 GWP 增加 4.3%,GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 两处理间 GWPI 无显著差异,分别较 R-MR 提高 100%和 50%。

3 讨论

3.1 不同复种方式对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

本研究结果表明,稻田 CH₄ 排放主要集中在水稻季(早、中、晚稻季);而在非水稻季(油菜季、紫云英

表 3 不同复种方式对稻田综合温室效应、温室气体排放强度和产量的影响

Table 3 Effects of different multiple cropping pattern on the GWP, GEY, GEPI and crop yield

处理 Treatments	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)					籽粒能量 产出 GEY /(GJ·hm ⁻²)	综合温室 效应 GWP /(kg·hm ⁻²)	全球增温 潜势强度 GWPI /(kg·MJ ⁻¹)
	油菜季 Rapeseed season	早稻季 Early season	中稻季 Middle season	晚稻季 Late season	周年 Annual			
R-MR	1 095. 2±50. 5	—	8 883. 8±82. 3	—	9 979. 0±95. 1b	161. 6±1. 5b	3 254. 4±324. 0b	0. 02±0. 002b
GM-ER-LR	—	7 322. 3±54. 7	—	7 006. 2±46. 2	14 328. 5±47. 1a	207. 8±0. 8a	7 400. 2±167. 2a	0. 04±0. 001a
WF-ER-LR	—	7 130. 9±63. 5	—	7 021. 5±76. 9	14 152. 4±21. 2a	205. 2±3. 9a	7 098. 4±108. 3a	0. 03±0. 001a

季和冬闲季),稻田 CH₄ 排放通量均趋近于零,这与前人研究结果相同^[19-21]。究其原因,主要是在水稻季,水稻前期淹水条件下,秸秆有机物还田为产甲烷菌提供本底基质导致 CH₄ 排放速率加剧^[21-22],且水稻分蘖前期地上部和地下部生物量较小,通气组织不发达,对稻田 CH₄ 氧化能力有限^[23];而在非水稻季,田间管理为水分自然排干,甲烷氧化菌占绝对主导地位,即使能产生 CH₄,大部分也被氧化了^[22]。本研究中,与 R-MR 相比,GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 显著增加了试验周期内稻田 CH₄ 累积排放总量,主要是因为 R-MR 水稻周年累积淹水天数(60 d)低于 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR(83 d),稻田淹灌环境下有利于产甲烷菌的存活从而促进稻田 CH₄ 的排放^[24-25]。且 R-MR 油菜秸秆还田量低于 GM-ER-LR 紫云英加早稻秸秆还田量和 WF-ER-LR 早稻秸秆还田量,有机物外源添加显著提高稻田 CH₄ 累积排放总量^[21, 26-27]。此外,R-MR 稻季周年施氮量(150 kg·hm⁻²)低于 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 中双季早晚稻氮素施用总量(240 kg·hm⁻²),CH₄ 排放通量随施氮量的增加而增加^[28]。本研究中双季晚稻的日排放量较 RM-R 的中稻低,主要是南方双季晚稻区稻田整体气温较低,抑制了产甲烷菌的活性^[29-30]。

在非水稻季,3 种轮作方式中稻田 N₂O 排放通量动态变化幅度均较大,并且在中、晚稻季生育后期也监测到较大幅度的 N₂O 排放通量。其原因可能是本试验在非水稻季稻田采取水分自然排干及在 R-MR 油菜季施用氮素,且在水稻季生育后期采取干湿交替灌溉模式。这种水分管理模式和氮素施用均可能会引起土壤微生物硝化与反硝化过程加剧,促进稻田 N₂O 气体排放^[17,24,31]。而在早稻季和中稻季前中期均未监测到 N₂O 排放高峰,原因可能是在南方双季稻区此季节经常出现连续阴雨天气,当稻田土壤孔隙含水量较高时(>90%),土壤孔隙中 O₂ 利用率极低,影响土壤微生物硝化-反硝化进程^[21-22],从而抑制稻田 N₂O 产生及排放。本试验中 R-MR 试验周期内 N₂O 累积排放总

量显著高于 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR。在 R-MR 试验周期内 N₂O 累积排放主要是在油菜季,占稻田周年 N₂O 累积排放总量的 76.5%。黄太庆等^[32]研究表明,在非水稻季,油菜施氮处理 N₂O 季节累积排放量显著高于冬闲处理,本研究结果与之相似,即油菜施氮处理为土壤硝化和反硝化微生物提供足够的 N 源。此外,本研究还发现,GM-ER-LR 紫云英季 N₂O 累积排放总量高于 WF-ER-LR 冬闲季,这与前人研究结果类似^[30],主要原因是紫云英根系较发达,会显著提高土壤有机碳含量和土壤碳库管理指数,从而促进 N₂O 排放量;其次,化学氮肥的施用,也是促进稻田 N₂O 排放的主要因素。

3.2 不同复种方式对稻田 GWP、GEY、GWPI 的影响

本研究结果表明,GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 周年 GEY 显著高于 R-MR。尽管 R-MR 中稻季产量高于 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 的双季早稻或晚稻季产量,且油菜能量转换因子>水稻能量转换因子,但其周年 GEY 累积总量仍低于 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR。此外,GM-ER-LR 周年总产量最高,较 WF-ER-LR 提高 1.2%。在本试验 3 种复种方式中,GM-ER-LR 周年总产量提高主要体现在早稻季。主要原因可能是 GM-ER-LR 在非水稻季种植紫云英,紫云英翌年直接翻入土壤,有利于土壤培肥,促进作物养分吸收从而提高产量^[8]。GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 试验周期内稻田 GWP 显著高于 R-MR,其 GWPI 较 R-MR 也显著增加,这可能与 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 中 CH₄ 排放量大有很大关系。本试验中 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 稻田 N₂O 累积排放总量极低,但 CH₄ 累积排放总量显著高于 R-MR。前人研究发现,在稻作系统中 GWP 的大小主要由 CH₄ 累积排放总量决定^[22,24,33],本研究结果与之类似。GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 虽然较显著增加周年总产量,但也显著提高稻田 GWP 和 GWPI,为全球气候变暖带来一定的风险。本研究仅为 1 年田间试验,研究期限较短,今后会继续对不同轮作方式的双

季稻田温室气体排放进行长期监测。

4 结论

本研究结果表明,与 R-MR 相比,GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 均显著提高试验周期内 CH₄ 累积排放总量,但也显著降低了 N₂O 累积排放总量。与 R-MR 相比,GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 均显著提高周年 GEY,但也增加了试验周期内稻田 GWP。综上,与 R-MR 相比,虽然在南方双季稻区 GM-ER-LR 和 WF-ER-LR 均增加了粮食产出,但也会增加稻田的温室效应和温室气体排放强度。因此,鉴于双季稻区中稻面积有增大趋势,综合环境效益和经济效益,油菜—一季中稻的增产减排效果更好,可为南方双季稻低碳高效栽培提供理论依据。

参考文献:

[1] 赵光昕,张晴雯,刘杏认,田秀平. 农田土壤硝化反硝化作用及其对生物炭添加响应的研究进展[J]. 中国农业气象,2018,39(7):442-452

[2] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. UK: Cambridge University Press, 2013: 1535

[3] Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P I. Policy and tecnological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2007, 118(1): 6-28

[4] Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Country STAT [DB/OL]. (2017-01-25)[2018-11-20]. <http://www.fao.org/home/en/>

[5] 郑洁敏,钟一铭,戈长水,杨京平,王小鹏. 不同施氮水平下水稻田温室气体排放影响研究[J]. 核农学报,2016,30(10): 2020-2025

[6] 倪学志,于晓媛. 耕地轮作、农业种植结构与我国持久粮食安全[J]. 经济问题探索,2018(7): 78-88

[7] 郑伟,肖国滨,吕伟生,李亚贞,陈明,黄天宝,肖小军,吴艳,叶川. 播种量对双季稻套播油菜群体生长的影响[J]. 中国油料作物学报,2018,40(2): 227-232

[8] 黄山,汤军,廖萍,曾勇军,石庆华,潘晓华. 冬种紫云英与稻草还田对双季水稻产量和土壤性状的互作效应[J]. 江西农业大学学报,2016,38(2): 215-222

[9] 吕伟生,肖国滨,叶川,李亚贞,陈明,肖小军,赖诗盛,郑伟,吴艳,黄天宝. 油-稻-稻三熟制下双季稻高产品种特征研究[J]. 中国农业科学,2018,51(1): 37-48

[10] 胡安永,孙星,刘勤. 太湖地区不同轮作模式对稻田温室气体(CH₄和N₂O)排放的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(1): 99-106

[11] 马秀梅,朱波,杜泽林,郑循华. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究[J]. 农业环境科学学报,2005(6): 1199-1202

[12] 张啸林. 不同稻田轮作体系下温室气体排放及温室气体强度研究[D]. 南京:南京农业大学,2013

[13] 陈雪飞. 我国中部粮食主产区农民职业分化对农户土地利用行为及其粮食生产的实证研究[D]. 武汉:华中师范大学,2013

[14] 王保君,胡乃娟,顾泽海,陈兵林,陈利根,朱利群. 稻秆还田方式对稻麦轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 南京农业大学学报,2017,40(3): 367-375

[15] 杭玉浩,王强盛,许国春,刘欣. 水分管理和秸秆还田对稻麦轮作系统温室气体排放的综合效应[J]. 生态环境学报,2017,26(11): 1844-1855

[16] 成臣,曾勇军,杨秀霞,黄山,罗亢,石庆华,潘晓华,商庆银. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(6): 1887-1895

[17] 马艳芹,钱晨晨,孙丹平,邓丽萍,黄国勤,陆卫斌. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(S2): 128-134

[18] Ladha J K, Rao A N, Raman A K, Padre A T, Dobermann A, Gathala M. Agronomic improvements can make future cereal systems in south asia far more productive and result in a lower environmental footprint[J]. Global Change Biology, 2016, 22(3): 1054-1074

[19] 李飞跃,梁媛,汪建飞,赵玲. 生物炭固碳减排作用的研究进展[J]. 核农学报,2013,27(5): 681-686

[20] 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊. 轮作方式对冬水田温室气体排放的影响[J]. 环境科学,2019,40(1): 392-400

[21] Jiang Y, Liao P, Van G N, Sun Y, Zeng Y, Huang S. Lime application lowers the global warming potential of a double rice cropping system[J]. Geoderma, 2018, 325: 1-8

[22] 廖萍,睦锋,汤军,曾勇军,吴自明,石庆华,黄山. 施用生物炭对双季稻田综合温室效应和温室气体排放强度的影响[J]. 核农学报,2018,32(9): 1821-1830

[23] Jiang Y, Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars[J]. Global Change Biology, 2017, 23(11): 4728-4738

[24] 成臣,杨秀霞,汪建军,程慧煌,罗亢,曾勇军,石庆华,商庆银. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(1): 186-195

[25] 彭世彰,侯会静,徐俊增,杨士红,茆智. 稻田 CH₄ 和 N₂O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报,2012,28(13): 121-126

[26] 郭腾飞,梁国庆,周卫,刘东海,王秀斌,孙静文,李双来,胡诚. 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

[27] 杨娟,王昌全,白根川,游来勇,易云亮,黄帆,李喜喜. 秸秆还田下“麦-稻”轮作生产生命周期能耗及温室气体排放[J]. 农业环境科学学报,2015,34(1): 196-204

[28] 兰雅萍,黄月清,李雨窄. 施氮量对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 福建热作科技,2014,39(1): 8-12

[29] 唐海明,肖小平,帅细强,汤文光,林叶春,汤海涛,杨光立. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学报,2012,32(5): 1481-1489

[30] 马艳芹,黄国勤. 晚稻施氮量对冬种紫云英生长季温室气体排

- 放与土壤碳库的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 217–221
- [31] 董文军, 来永才, 孟英, 唐傲, 张喜娟, 冷春旭. 稻田生态系统温室气体排放影响因素的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2015(5): 145–148
- [32] 黄太庆, 马煜春, 熊正琴, 孔宪旺, 余丰毅. 不同种植制度对稻田旱作季节 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 519–523
- [33] 吴震, 董玉兵, 熊正琴. 生物炭施用3年后对稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 141–148

Effects of Different Multiple Cropping Pattern on the Global Warming Potential in Southern Double Cropping Rice Fields

WU Siping¹ SUI Feng¹ XIAO Xiaojun² ZHANG Jun³ WU Ziming¹ ZENG Yongjun¹ HUANG Shan^{1,*}

(¹Ministry of Education/Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045; ²Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Scientific Observational and Experimental Station of Arable Land Conservation in Jiangxi, Ministry of Agriculture, Nanchang, Jiangxi 331717; ³Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: To examine effect of different multiple cropping pattern on the global warming potential and greenhouse gas intensity in the double cropping rice fields, the experiment was set up to rapeseed-middle rice rotation (R-MR), green manure (milk vetch)-early rice-late rice rotation (GM-ER-LR), and winter fallow-early rice-late rice rotation (WF-ER-LR). The different cropping patterns for annual crop yield rice field global warming potential (GWP), grain energy yield (GEY) and global warming potential (GWPI) were identified by the static opaque chamber -gas chromatography method. The results showed that compared to R-MR, the CH_4 emissions of GM-ER-LR and WF-ER-LR significantly increased by 1.27 and 1.18 times, respectively, whereas N_2O emissions were significantly reduced by 34.1% and 49.4%, respectively. No significant differences were found in CH_4 and N_2O emissions between GM-ER-LR and WF-ER-LR. Compared with R-MR, the grain energy yield significantly increased by 28.6% and 27.0% in GM-ER-LR and WF-ER-LR, respectively. The global warming potential was 1.27 and 1.18 folds higher in GM-ER-LR and WF-ER-LR than in R-MR. The global warming potential intensity increased by 100% in GM-ER-LR and 50% in WF-ER-LR than in R-MR. Therefore, GM-ER-LR and WF-ER-LR were beneficial to enhance crop yield, but increased the global warming potential and greenhouse gas intensity. Thus, this study suggested that the rapeseed-middle rice rotation system could not only reduce greenhouse gas emissions but achieve higher environmental and economic benefits.

Keywords: multiple cropping pattern, double rice-cropping system, greenhouse gases flux, global warming potential, global warming potential intensity