

文章编号:1000-8551(2019)02-0379-10

基于冬种不同作物的水旱轮作模式对水稻产量及稻田 CH_4 、 N_2O 排放的影响

钟川 杨滨娟 张鹏 李萍 黄国勤*

(江西农业大学生态科学研究中心,江西 南昌 330045)

摘要:为探究冬种不同作物、水旱轮作措施对稻田丰产及温室气体减排的影响,本研究设置5种植植模式,即紫云英-早稻-晚稻(CRR)、紫云英-早稻-甘薯||晚大豆(CRI)、油菜-早稻-晚稻(RRR)、油菜-早稻-甘薯||晚大豆(RRI)、马铃薯-早稻-晚稻(PRR),采用静态暗箱-气相色谱法测定稻田 CH_4 、 N_2O 的全年排放通量,研究基于冬季不同作物的不同水旱轮作模式对水稻产量、全球增温潜势(GWP)及温室气体排放强度(GHGI)的影响。结果表明,冬种不同作物均能提高早稻的产量,但对晚稻产量基本无影响,其中紫云英对早稻产量增效最好,CRI处理分别较其他处理高1.73%、12.08%、7.48%、10.95%;水旱轮作处理较双季稻处理可以获得更高的产量,RRI处理晚稻产量较其他4个处理分别高22.54%、5.37%、29.83%、27.24%。冬种不同作物对 CH_4 、 N_2O 排放无显著影响($P>0.05$),水旱轮作显著增加了 N_2O 排放,显著降低了 CH_4 排放($P<0.05$)。5种植植模式中,RRI处理的GWP最低,且显著低于CRR、RRR、PRR处理($P<0.05$),分别低25.54%、29.76%、20.78%。RRI处理的GHGI最低,较其他处理分别显著低32.51%、18.18%、30.77%、20.59%($P<0.05$)。综上,RRI处理在增加作物产量、减少稻田温室气体排放方面表现最好。本研究结果为长江中游双季稻区稻田丰产及温室气体减排提供了理论依据。

关键词:水旱轮作;甲烷;氧化亚氮;全球增温潜势;温室气体排放强度

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.02.0379

全球变暖是当前世界环境的热点问题,也是当今全球面临的诸多严峻挑战之一^[1]。目前,农业生产所排放的 CH_4 和 N_2O 已经成为影响全球变暖的主要温室气体^[2]。据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告,全球大气中 CH_4 、 N_2O 浓度已由工业革命前的 $715、270 \mu\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$ 增至 2016 年的 $1853、329 \mu\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[3]。农田是大气 CH_4 和 N_2O 的重要排放源^[4]。据统计,全球每年由农业生产活动排放的温室气体量为 $5.1\sim 6.1 \text{Pg}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 CO_2 当量计),占全球人为活动产生的温室气体排放总量的 $10\%\sim 12\%$ ^[5]。我国是农业大国,也是全球水稻播种面积第二的国家,2014 年水稻种植面积达到 $30.31\times 10^6 \text{hm}^2$,占全球水稻种植面积的 18.57% ^[6],因此我国农业生产已成为主要的温室气体

排放源。

冬种绿肥可以提高土壤有机质含量,改善土壤理化性状^[7],提高作物产量,是一种优质的生物肥料^[8]。前人研究发现绿肥还田能够显著提高稻田温室气体排放量^[9-10],但关于不同种类绿肥对温室气体排放影响的研究尚鲜见报道。农业管理措施如种植制度也是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的重要因素^[11]。卢维盛等^[12]研究表明,双季稻改为早稻-小白菜、早稻-茄瓜模式能明显降低稻田 CH_4 排放;陈书涛等^[13]研究大豆-小麦、玉米-小麦和水稻-小麦3种轮作制度,发现不同轮作制度对稻田 N_2O 排放影响显著;江长胜等^[14]研究表明,水旱轮作模式能显著降低冬灌田 CH_4 排放量,而 N_2O 排放量则显著增加,且综合增温潜势显著降低。随着世界人口持续增长,人们对粮食产品的需

收稿日期:2018-06-21 接受日期:2018-10-04

基金项目:国家重点研发计划课题“长江中游双季稻三熟区资源优化配置机理与高效种植模式”(2016YFD0300208)

作者简介:钟川,男,主要从事农业生态方面研究。E-mail:1778401548@qq.com

* 通讯作者:黄国勤,男,教授,主要从事作物栽培、耕作制度、农田生态环境研究。E-mail:hgqjxes@sina.com

求日益增加,在评价农田生态系统综合增温潜势的同时,结合考虑其产量要素尤显必要。Van Groenigen 等^[15]研究表明,温室气体排放强度(greenhouse gas intensity, GHGI)相较于全球增温潜势(global warming potential, GWP)更能够全面体现农业生产对作物产量、农田土壤温室气体排放的双重影响。孙丹平^[16]研究表明,稻田冬种绿肥及水旱轮作复种模式可以提高作物产量,提高土壤有机质含量,同时干湿交替的种植模式也有利于减缓稻田温室气体排放。目前,基于不同绿肥下水旱轮作种植模式的研究尚鲜见报道,且何种种植模式的产量和环境效益双优还有待进一步明确。本研究通过大田试验,设置冬种不同作物及水旱轮作改良措施,研究 5 种不同种植模式对水稻产量及全年稻田 CH₄、N₂O 排放的影响,并通过分析 5 不同种植模式的 GWP 和 GHGI,明确产量、环境效益双优的可持续生产模式,以期为长江中游双季稻区稻田丰产及温室气体减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 10 月-2017 年 10 月,在江西农业大学科技园水稻试验田(28°46'N、115°55'E)进行。试验地属亚热带季风性湿润气候,年均太阳总辐射量为 $4.79 \times 10^{13} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$,年均日照时数为 1 852 h,7、8 月最多、2、3 月最少,光照分布与水稻生长旺季基本同步,对水稻生产有利。年 $\geq 0^\circ\text{C}$ 日积温达 6 450 $^\circ\text{C}$,年降水量 1 665.7 mm,年平均气温 19.4 $^\circ\text{C}$ 。

供试土壤为发育于第四纪的红粘土,为亚热带典型红壤分布区。试验田土壤基本理化性质为有机质 28.56 g·kg⁻¹、全氮 1.79 g·kg⁻¹、有效磷 27.48 mg·kg⁻¹、速效钾 160.74 mg·kg⁻¹、碱解氮 171.5 mg·kg⁻¹、pH 值 5.15。

1.2 试验材料

供试材料:紫云英(余江大叶子),由邓家埠水稻原种场提供;油菜(中油 821)、马铃薯(东农 303)、甘薯(广薯 87)、大豆(丰源一号),均由科源种业公司提供;早稻(中嘉早 17)、晚稻(天优华占),由泗溪镇农情种业公司提供。

1.3 试验设计与田间管理

本试验共设计 5 个处理(表 1),即紫云英-早稻-晚稻(记作 CRR,对照)、紫云英-早稻-甘薯 || 晚大豆(记作 CRI)、油菜-早稻-晚稻(记作 RRR)、油菜-早稻-甘薯 || 晚大豆(记作 RRI)、马铃薯-早稻-晚稻(记

作 PRR)。每个处理 3 次重复,共 15 个试验小区。每个小区面积为 33 m²(11 m×3 m),小区间用高 30 cm 的水泥田埂隔开。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	种植模式 Cropping patterns
CRR(CK)	紫云英-早稻-晚稻
CRI	紫云英-早稻-甘薯 晚大豆
RRR	油菜-早稻-晚稻
RRI	油菜-早稻-甘薯 晚大豆
PRR	马铃薯-早稻-晚稻

注:“-”表示连茬;“||”表示间作。下同。

Note: ‘-’ represents continuous planting. ‘||’ represents intercropping. The same as following.

甘薯大豆采用开沟起垄的方式种植,垄宽 1.2 m,垄高 0.35 m,每垄种 4 行大豆 1 行甘薯,甘薯两边各 2 行大豆,甘薯大豆间行距 0.3 m,甘薯株距 0.2 m,大豆间行距 0.2 m,株距 0.15 m。紫云英播种量为 37.5 kg·hm⁻²,播种时用钙镁磷肥(P₂O₅ 12%)拌种均匀撒播,P₂O₅ 用量 45 kg·hm⁻²,所用磷肥在水稻施肥总量中扣除,油菜播种量为 15 kg·hm⁻²,播种时用沙质土拌种均匀撒播;马铃薯种植密度为 73 000 株·hm⁻²。所有冬季作物秸秆均在水稻移栽前 15 d 翻压还田。冬季作物秸秆还田量:CRR(CK)、CRI 处理的紫云英还田量均为 $4.3 \times 10^4 \pm 3.7 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;RRR、RRI 处理的油菜秸秆鲜重均为 $2.8 \times 10^4 \pm 2.5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;PRR 处理的马铃薯秸秆鲜重为 $2.0 \times 10^4 \pm 2.3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

化肥种类及用量参照当地常规施肥:所有作物施用化肥均为尿素(N 46%),钙镁磷肥(P₂O₅ 12%),氯化钾(K₂O 60%)。水稻当地施肥常规用量为 N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻²。N 肥按基肥:分蘖肥:穗肥=3:4:3 施用;P 肥全部作基肥,一次性施入;K 肥按分蘖肥:穗肥=7:3 施用。N、P 基肥在插秧前 1 d 施入并与土壤混合均匀,分蘖肥在水稻移栽后 5~7 d 时施用,穗肥在主茎幼穗长 1~2 cm 时施用。其他田间管理措施同一般大田栽培。大豆当地施肥常规用量为 N 150 kg·hm⁻²、P₂O₅ 375 kg·hm⁻²、K₂O 150 kg·hm⁻²。N 肥和 P 肥按基肥:花肥=2:3 施用;K 肥按基肥:花肥=1:1 施用。甘薯当地施肥常规用量为 N 80 kg·hm⁻²、P₂O₅ 375 kg·hm⁻²、K₂O 80 kg·hm⁻²,其中 P、K 肥作为基肥一次性施入,N 肥按基

肥:追肥 = 1:2 施用。其他田间管理措施同一般大田栽培。

紫云英播种时间为 2016 年 10 月 2 日,油菜播种时间为 2016 年 11 月 12 日,马铃薯播种时间为 2016 年 11 月 28 日,所有冬作物均在 4 月 13 日收获并秸秆翻压还田。早稻播种时间为 2017 年 3 月 27 日,4 月 28 日移栽,7 月 22 日收获。晚稻于 2017 年 6 月 27 日播种,7 月 29 日移栽,10 月 29 日收获;甘薯,大豆种植时间为 8 月 1 日,11 月 1 日收获。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 作物测产 于水稻成熟期,各小区普查 50 蔸作为有效穗计算的依据,用平均法在各小区随机选取有代表性的水稻植株 5 蔸,风干后作为考种材料。用清水漂洗,去空秕粒晾干后,用百分之一分析天平测千粒重,考种项目包括有效穗数、穗长、每穗粒数、千粒重。水稻、旱作物每小区实收作为实际产量,其中油菜、马铃薯、甘薯、大豆产量按所形成的经济产量,以原粮折算标准计算产量进行比较分析。

1.4.2 温室气体采集与测定 采用静态暗箱-气相色谱法测定田间小区温室气体排放。静态箱底横截面积为 0.5 m×0.5 m,采样箱体由 304 不锈钢材质制成,箱体高度随水稻高度而增加(拔节期前放置一层 0.5 m,拔节期后放置两层共 1 m)。采样箱箱内安有一小电扇用于混匀箱内气体,箱子顶部设有 3 个松紧阀,分别为风扇电池接口、温度计插口、采气孔,外部包有白色海绵绵罩,防止太阳照射导致箱内温度变化过大。采样时间为上午 9:00-11:00,采样前将采样箱体置于事先埋好的底座上,采样时用 100 mL 注射器来回抽 5~10 次以混匀气体,随后抽取 50 mL 气体样品到气袋中,4 个连续样品分别在箱体密闭后 0、10、20 和 30 min 采集,3 d 内利用 A7890b 安捷伦气相色谱(美国安捷伦科技有限公司)完成 CH₄、N₂O 浓度测定,其中,CH₄ 检测器 FID 检测温度为 250℃,柱温 60℃;N₂O 检测器 ECD 检测温度为 300℃,柱温 60℃。

1.5 计算方法与数据分析

1.5.1 计算方法

按照公式计算温室气体排放通量(F,单位 kg·m⁻²·h⁻¹):

$$F = \rho \times H \times \Delta C / \Delta t \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中, ρ :标准状态下温室气体的密度,kg·m⁻³;H:密闭箱高度,m; $\Delta C / \Delta t$:单位时间(h)密闭箱内温室气体浓度的变化率;T:密闭箱内平均温度,℃^[17]。

全球增温效应:采用 IPCC 推荐的综合增温潜势计算 CH₄ 和 N₂O 在 100 a 尺度的综合增温效应,CH₄

和 N₂O 排放量分别乘以 25 和 298,得到 CO₂ 排放当量 f_{CH₄}、f_{N₂O},相加即为 2 种气体的全球增温潜势(GWP),其计算公式如下^[18]:

$$GWP = f_{CH_4} \times 25 + f_{N_2O} \times 298 \quad (2)$$

按照公式计算 CH₄ 和 N₂O 排放强度(GHGI,单位为 CO₂ kg·kg⁻¹)^[19]:

$$GHGI = GWP / Y \quad (3)$$

式中,Y:该处理单位面积平均产量,kg·hm⁻²。

1.5.2 数据分析 采用 Microsoft Excel 2016 处理数据;Origin 8.0 作图;SPSS 20.0 软件进行数据处理和统计分析;LSD 进行样本平均数的差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 水稻产量及产量构成要素

水稻产量受有效穗数、穗长、每穗粒数、结实率和千粒重等因素的影响。由表 2 可知,CRR(CK)、CRI 处理的有效穗、千粒重均高于其他处理,且差异显著($P < 0.05$);各处理的穗长、结实率均无显著性差异($P > 0.05$);CRI 处理的每穗粒数最高,且与 RRR、PRR 处理差异显著($P < 0.05$),但与处理 CRR、RRI 无显著性差异($P > 0.05$)。CRI 处理的实际产量最高,CRR 处理次之,CRI 处理的产量较 CRR、RRR、RRI、PRR 处理分别高 1.73%、12.08%、7.48%、10.95%,且与 RRR、RRI、PRR 均差异显著($P < 0.05$)。结果表明,冬种紫云英相较于冬种油菜、马铃薯能够增加早稻有效穗数、每穗粒数、千粒重,进而提升早稻产量。

由图 1 可知,晚稻季,将 CRI 和 RRI 处理旱作物产量折算成稻谷产量后发现,CRI 和 RRI 处理间无显著性差异($P > 0.05$),但 RRI 与其余 3 个处理水稻产量均差异显著($P < 0.05$),RRI 处理较 CRR、CRI、RRR、PRR 处理产量分别高 22.54%、5.70%、29.83%、27.24%。从水稻两季总产方面分析,除 CRI 处理外,RRI 与其他处理之间差异显著($P < 0.05$),RRI 处理的总产量最高,较 CRR、CRI、RRR、PRR 处理分别高 9.36%、1.43%、18.01%、16.19%。结果表明,冬种紫云英对早稻有一定的增产效果,但对晚稻产量基本无影响,水旱轮作较双季稻处理在晚稻季可以获得更高的产量。

2.2 稻田 CH₄ 排放通量动态变化

由图 2 可知,各处理稻田 CH₄ 排放通量动态变化基本一致,且早、晚稻季水稻田均出现 3 个峰值。冬季绿肥生长季 CH₄ 排放通量远低于水稻季的排放水平,晚稻季旱地 CH₄ 排放通量远低于水稻季的排放水平,

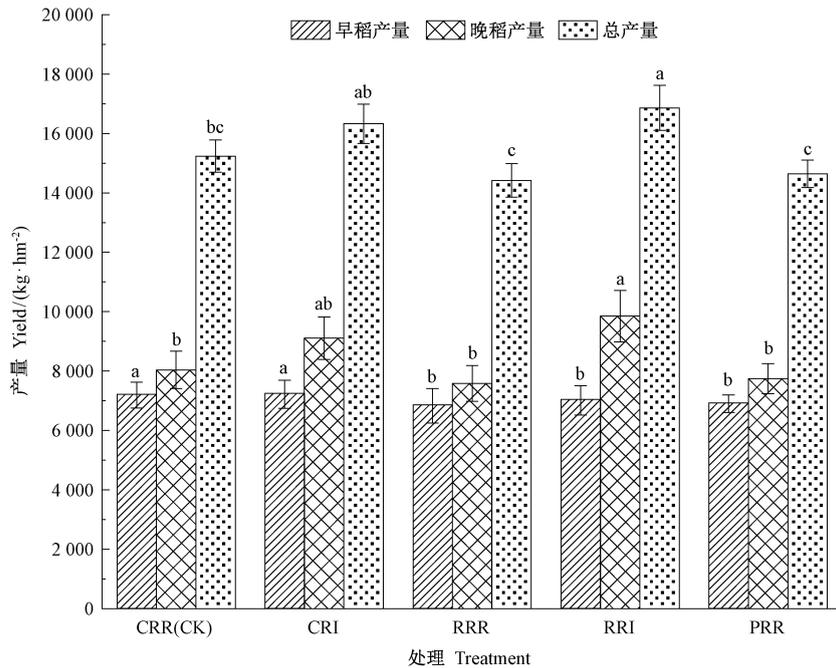
表 2 各处理下早稻产量及产量构成要素

Table 2 Rice yield and its components under different treatments

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number /(10^4 clump \cdot hm $^{-2}$)	穗长 Panicle length /cm	每穗粒数 Grain number per Spike/(No. \cdot panicle $^{-1}$)	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000 grain weight/g	实际产量 Actual production /(kg \cdot hm $^{-2}$)
CRR(CK)	236.10 \pm 1.51a	19.43 \pm 0.21a	162.27 \pm 1.65ab	76.81 \pm 1.54a	25.55 \pm 0.32a	7 196.50 \pm 434.64a
CRI	234.93 \pm 7.05a	20.17 \pm 0.32a	172.37 \pm 2.68a	77.95 \pm 1.53a	25.57 \pm 0.17a	7 321.70 \pm 472.35a
RRR	216.20 \pm 6.63b	19.33 \pm 0.11a	155.27 \pm 2.64b	77.88 \pm 0.70a	24.57 \pm 0.17b	6 532.30 \pm 581.55b
RRI	215.30 \pm 4.30b	19.37 \pm 0.36a	162.30 \pm 4.83ab	78.30 \pm 0.97a	24.89 \pm 0.03b	6 811.86 \pm 405.18b
PRR	213.83 \pm 2.83b	19.90 \pm 0.29a	150.50 \pm 4.74b	77.89 \pm 2.44a	24.75 \pm 0.10b	6 598.93 \pm 298.47b

注:数据为 3 个重复试验的平均值 \pm 标准误;同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: The data is the average \pm standard error of three repetitions. Different small letters in the same column mean significant difference among treatment at 0.05 level. The same as following.



注:不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$)。CRI、RRI 处理的晚稻产量由旱作物产量根据当季价格比折算成晚稻产量,

2017 年晚稻谷价格为 2.60 元 \cdot kg $^{-1}$,晚大豆价格为 5.00 元 \cdot kg $^{-1}$,甘薯价格为 1.4 元 \cdot kg $^{-1}$ 。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The late rice production of CRI、RRI treatments are converted from the dry crop production into the late rice yield according to the seasonal price. The late rice price is

2.60 yuan \cdot kg $^{-1}$, late soybean price is 5.00 yuan \cdot kg $^{-1}$ and sweet potato price is 1.4 yuan \cdot kg $^{-1}$.

图 1 各处理的早晚稻产量

Fig.1 The yields of late rice or early rice for different treatments

且无明显排放峰值。

从冬季绿肥生长季来看,冬季由于温度普遍较低抑制了产甲烷细菌活动,各处理 CH $_4$ 排放通量基本维持在较低水平,在 3 月 2 日和 4 月 1 日达到排放高峰,分别为 1.58 mg \cdot m $^{-2}$ \cdot h $^{-1}$ 、1.62 mg \cdot m $^{-2}$ \cdot h $^{-1}$,且峰值均出现在 RRI 处理。

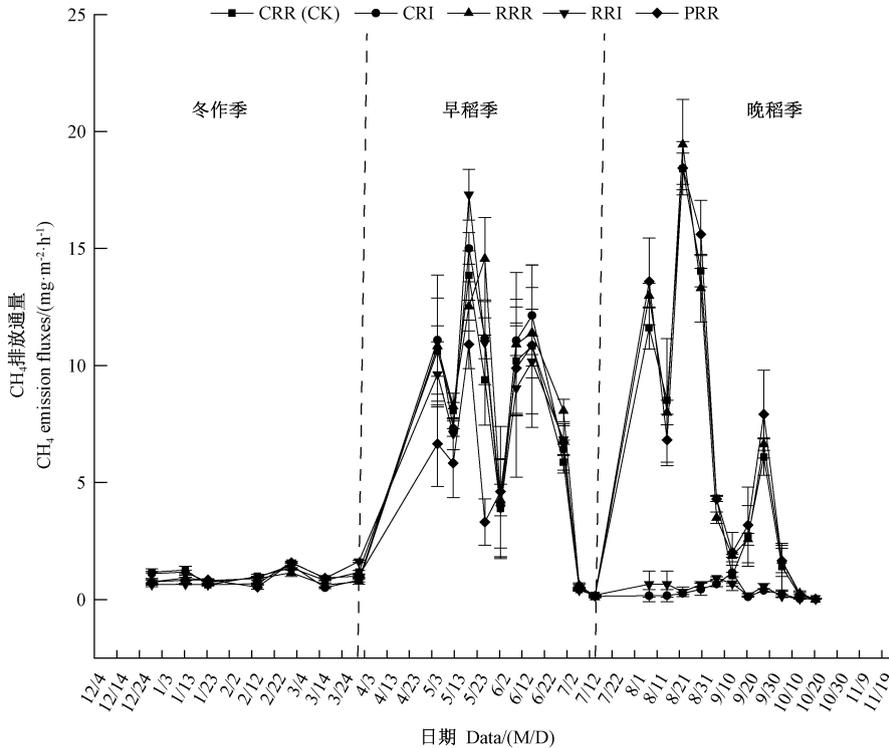
从早稻季来看,各处理在水稻移栽之后 CH $_4$ 排放

通量均不断升高,基肥的施用和冬作物秸秆的腐解为产甲烷菌提供了丰富的 C 源,使得产甲烷菌活动不断增强,在 5 月 6 日出现第 1 个排放高峰。5 月 20 日处于水稻分蘖期,该时期田间水分、温度状况良好,氮肥的施用使得 CH $_4$ 排放达到第 2 个高峰,也是早稻季各处理 CH $_4$ 排放的最高峰(17.30 mg \cdot m $^{-2}$ \cdot h $^{-1}$)。随后进行晒田、复水等田间管理,CH $_4$ 排放量先减后增,出现

第 3 个排放高峰。

从晚稻季来看, CRR、RRR、PRR 处理的变化趋势基本一致, CRI 和 RRI 变化基本一致。CRR、RRR、PRR 种植晚水稻的变化趋势与早稻基本一致, 分别在 8 月 3 日、8 月 16 日、9 月 21 日达到排放高峰, 峰值分

别为 13.59、19.44、7.9 mg·m⁻²·h⁻¹。CRI、RRI 种植旱作物(甘薯||晚大豆)的 CH₄ 排放一直处于较低水平, 排放的范围为 0.02~0.91 mg·m⁻²·h⁻¹, 这可能是由于旱作物采取开沟起垄的方法种植作物, 土壤一直保持较为干燥, 不利于甲烷菌的活动, 导致排放量较低。



注: 数据为 2016 年冬种起至 2017 年晚稻收获后。下同。

Note: The data is between winter crop in 2016 and harvest of the late rice in 2017. The same as following.

图 2 各处理 CH₄ 排放通量动态变化

Fig.2 Dynamic changes of CH₄ emission flux for different treatments

2.3 稻田 N₂O 排放通量动态变化

稻田土壤微生物的硝化和反硝化作用是稻田 N₂O 排放的主要来源, 水分、温度是影响这 2 个生物过程的重要因素。由图 3 可知, 全年稻田 N₂O 排放通量均处于较低水平, 冬季出现 1 个排放峰值, 早、晚稻季水稻田均出现 2 个峰值, 晚稻季旱地出现 3 个排放峰值。

从冬季作物生长季来看, 冬季稻田田间持水量低, 加之温度较低, 抑制了硝化细菌和反硝化细菌的活性, 因而整个冬季 N₂O 均处于较低水平的排放量 (29.39~209.54 μg·m⁻²·h⁻¹)。1 月 24 日, 各处理 N₂O 排放达到最高峰, 峰值出现在 RRI 处理 (209.54 μg·m⁻²·h⁻¹), 这是由于连续几天下雨, 导致采气当天土壤湿度较大, 硝化细菌的活动增强, 促进了 N₂O 的排放。

从早稻季来看, 各处理的 N₂O 排放通量变化整体

趋势一致, 且均无显著性差异 ($P>0.05$)。从整个早稻生长季来看, 前期稻田一直处于淹水状态, 由于 N₂O 产生的最适环境是处于干湿交替的环境, 因此前期 N₂O 排放通量较低, 在 6 月 3 日各处理均达到当季最高排放量, 这是由于该段时期处于晒田期, 稻田土壤干湿交替给了硝化细菌最合适的活动环境, N₂O 排放升高, 之后随着稻田复水, N₂O 又回到排放的低水平; 水稻成熟期稻田持水降低, 硝化细菌活动又再次增强, 在 7 月 1 日达到第 2 个小高峰, 但低于第 1 个高峰的排放通量, 这可能是温度太高抑制了硝化细菌的活动。

从晚稻季来看, 旱作物处理出现 3 个 N₂O 排放高峰, 究其原因在于, 8 月 21 日第 1 个高峰是施氮肥促进了 N₂O 排放; 9 月 1 日第 2 个高峰, 前天下雨和施肥导致 N₂O 排放达到最高峰; 10 月 6 日第 3 个高峰可能是由于温度较为适宜硝化细菌的活动。晚稻季水稻

2 个 N_2O 排放高峰,原因可能是,9 月 7 日第 1 个高峰,该时间段处于晒田期,土壤处于干湿交替的环境利

于 N_2O 产生;9 月 21 日达到第 2 个高峰,原因是水稻趋于成熟稻田持水排干。

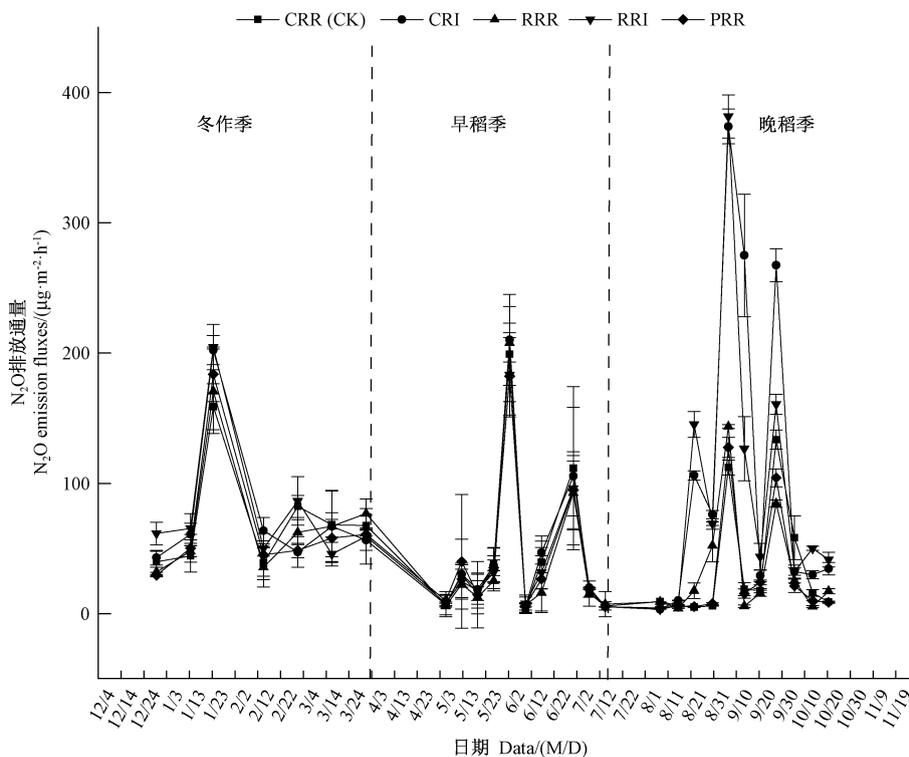


图 3 各处理 N_2O 排放通量动态变化

Fig.3 Dynamic changes of N_2O emission flux for different treatments

2.4 稻田 CH_4 和 N_2O 累积排放量

不同种植模式条件下稻田 CH_4 和 N_2O 每季及周年累积排放量如表 2 所示。结果表明,稻田 CH_4 排放占主导地位,晚稻季旱作物 N_2O 排放量大,但仍低于 CH_4 排放。从 CH_4 累积排放量看,冬种季,PRR 处理的 CH_4 累积排放量最高,且与其他处理差异显著 ($P < 0.05$);早稻季,PRR 处理的 CH_4 累积排放量最低,且与其他处理之间差异显著 ($P < 0.05$);晚稻季,CRI 与 RRI 种植旱作物,其他处理种植水稻,旱地 CH_4 排放量远低于水田, CH_4 排放量最高的 PRR 处理较 CRI 高 17.81 倍,CRI、RRI 处理的 CH_4 排放量显著低于其他处理 ($P < 0.05$);综合 3 季 CH_4 的累积排放量来看,排放最高的为种植双季稻处理 RRR,较水稻接茬种植旱作物的处理 CRI、RRI 分别高 82.91%、88.77%,说明种植水稻后接茬种植旱作物能显著降低 CH_4 排放。

从 N_2O 累积排放量来看,冬种季, N_2O 排放处于极低水平,累积排放量最高的为 RRI 处理,较最低的处理 PRR 高 25.00%,RRI 处理与 CRR、RRR、PRR 处理间均差异显著 ($P < 0.05$)。在冬季相同的环境及同样的田间管理措施下,种植冬季绿肥种类不同对 N_2O

排放具有一定影响;早稻季所有处理均种植水稻,表现为 CRI 处理的 N_2O 累积排放量最高,其次为 CRR (CK),且 CRR、CRI 显著高于其他处理 ($P < 0.05$),这可能是由于冬季所种植的不同绿肥翻压入田所致。晚稻季种植旱作物的处理 N_2O 累积排放量变化与 CH_4 相反,其 N_2O 累积排放量远高于种植水稻的其他处理,其中 CRI 最高,较 PRR 高 11.43 倍,且与 CRR、RRR、PRR 均差异显著 ($P < 0.05$),但同为旱作物的 CRI 与 RRI 间无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.5 稻田 CH_4 和 N_2O 综合增温潜势及排放强度

由表 3 可知,在 100 a 尺度下,RRI 处理的 CH_4 全球增温潜势最低,较 CRR、CRI、RRR、PRR 处理分别低 43.33%、3.10%、47.03%、39.92%,且除 CRI 处理外,与其他处理之间均差异显著 ($P < 0.05$)。PRR 处理的 N_2O 全球增温潜势较 CRR、CRI、RRR、PRI 处理分别低 10.53%、81.85%、3.90%、71.42%,PRR 与 CRI、RRI 处理均差异显著 ($P < 0.05$)。RRI 处理的综合增温潜势最低,较 CRR、CRI、RRR、PRR 处理分别低 15.88%、5.08%、20.65%、10.49%,且与 CRR、RRR 处理差异显著 ($P < 0.05$)。 CH_4 和 N_2O 对稻田全球增温

表 2 各处理 CH₄ 和 N₂O 累积排放量Table 2 Cumulative emissions of CH₄ and N₂O during the annual for different treatments / (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	CH ₄ 累积排放量 Cumulative CH ₄ emission				N ₂ O 累积排放量 Cumulative N ₂ O emission			
	冬种季	早稻季	晚稻季	总计	冬种季	早稻季	晚稻季	总计
CRR(CK)	0.19±0.003b	116.40±6.66a	110.34±5.82a	226.92±12.48ab	0.017±0.001bc	0.77±0.02a	0.63±0.03b	1.42±0.04b
CRI	0.21±0.003b	125.89±1.36a	6.62±0.24b	132.72±1.12c	0.019±0.000ab	0.81±0.02a	6.17±0.07a	7.00±0.17a
RRR	0.20±0.001b	130.18±4.49a	112.38±1.80a	242.76±5.93a	0.017±0.001bc	0.68±0.01b	0.62±0.03b	1.32±0.02b
RRI	0.21±0.006b	121.10±5.72a	7.29±1.20b	128.60±6.91c	0.020±0.000a	0.70±0.01b	5.72±0.09a	6.42±0.70a
PRR	0.27±0.010a	95.86±4.57b	117.91±3.30a	217.05±6.04b	0.016±0.001c	0.71±0.02b	0.54±0.01b	1.27±0.02b

潜势的贡献率差距较大,冬季绿肥-双季稻的模式, CH₄ 对全球增温潜势的贡献率达到 93.06%~93.91%,而 N₂O 的贡献率仅为 6.09%~6.94%,冬季绿肥-水稻-旱作物的模式 CH₄ 对全球增温潜势的贡献率为 60%左右, N₂O 的贡献率约为 40%,表明稻田

CH₄ 排放量高于 N₂O 排放量。从综合排放强度来看, RRI 处理的温室气体排放强度最低,较 CRR、CRI、RRR、PRR 处理分别低 32.51%、18.18%、30.77%、20.59%,且与其他处理均差异显著($P<0.05$)。

表 3 各处理 CH₄ 和 N₂O 全球增温潜势及排放强度Table 3 GWP and greenhouse gas intensity of CH₄ and N₂O for different treatments / (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	全球增温潜势 GWP/(CO ₂ kg·hm ⁻²)			贡献率 Contribution rate/%		Y /(kg·hm ⁻²)	温室气体排放强度 GHGI /(CO ₂ kg·kg ⁻¹)
	CH ₄	N ₂ O	GWP	CH ₄	N ₂ O		
	CRR(CK)	5 673.10±311.95ab	422.93±12.43b	6 096.03±322.78b	93.06	6.94	15 235.09±562.87c
CRI	3 317.90±28.07c	2 084.98±51.85a	5 402.88±31.11c	61.41	38.59	16 426.82±792.89b	0.33±0.01b
RRR	6 068.94±148.14a	393.74±5.74b	6 462.68±151.82a	93.91	6.09	16 502.26±562.95b	0.39±0.02a
RRI	3 215.02±172.87c	1 913.16±212.47a	5 128.18±287.23c	62.69	37.31	18 819.37±754.41a	0.27±0.01c
PRR	5 351.18±150.93b	378.38±5.28b	5 729.55±149.25bc	93.40	6.60	17 286.07±566.45ab	0.34±0.02b

注: Y; 3 季作物经济产量折算成水稻的产量的总和。折算方法同上。

Note: Y is the sum of the economic output of 3 crops converted to rice. The conversion method is same as above.

3 讨论

3.1 不同种植模式对水稻产量的影响

绿肥可以提高土壤肥力,提升作物产量^[20],但不同绿肥对水稻的增产效果存在一定的差异。杨滨娟等^[21]研究表明,冬种紫云英相较于冬闲水稻增产 10.48%,且增产效果明显优于冬种油菜、黑麦草等绿肥。田卡等^[22]通过研究稻草还田和冬种绿肥的互作效应,发现稻草还田和冬种紫云英的处理组合的增产效果最为明显。这与本研究结果基本一致。本研究中, CRR、CRI(冬种紫云英)处理的早稻产量明显高于其他处理,其原因可能是紫云英还田可以促进早稻有效穗数、每穗粒数及千粒重等经济学性状的形成,进而提高早稻产量^[23]。本研究还发现 CRR、RRR、PRR 处

理间的晚稻产量无显著性差异,但与 CRI、RRI 处理均差异显著,表明冬种绿肥对晚稻季水稻产量影响较小,而早稻后茬种植旱作物可以有效提高作物经济产量,这可能是由于早稻后茬种植旱作物可以均衡利用土壤养分,且水旱轮作可以改善土壤生态环境和促进有机质分解,进而提高了旱作物的产量。这与孙丹平^[16]和武际^[24]的研究结果一致。

3.2 不同种植模式对 CH₄ 和 N₂O 排放特征及累积排放的影响

稻田 CH₄ 的排放受施肥、田间水分管理、种植模式等因素影响^[25]。白小琳等^[26]研究表明,冬季休闲期稻田 CH₄ 排放仅为早晚稻季排放量的 1%;李大明等^[27]研究秸秆覆盖旱作对稻田甲烷排放影响,发现秸秆覆盖可以保持土壤水分,并供给土壤有机质,降低土壤氧化还原电位,进而使得 CH₄ 排放量上升。这与本

研究结果一致。本研究结果表明,5种不同种植模式冬季 CH_4 排放量均处于极低水平,而PRR处理冬季累积排放量最低,且与其他处理差异显著。这可能与种植马铃薯采用秸秆覆盖有关。本研究还发现5种模式早、晚稻季水稻 CH_4 排放的趋势基本一致,均呈先升高后下降的趋势。这与胡安永等^[17]的研究结果一致。究其原因,可能与5种植植模式均采用了相同的田间水分管理措施有关。早稻季PRR处理 CH_4 排放量最低。可能是由于PRR处理冬季所种植的马铃薯作为绿肥所提供的有机质最少,碳源少导致 CH_4 排放量最低,这与Hou^[28]和Tang等^[10]的研究结论一致。从周年 CH_4 的累积排放量来看,RRI处理的排放量最低,这是由于水旱轮作大幅度降低了 CH_4 的排放。这与张岳芳等^[29]的研究结论一致。

稻田 N_2O 排放同样受作物种类、田间水分管理、施肥措施等因素的制约^[30]。唐海明等^[31]研究表明,冬季作物种类不同,土壤 N_2O 的排放量也不尽相同。本研究中,冬季各处理 N_2O 累积排放量依次为RRI>CRI>RRR>CRR>PRR,且RRI与PRR处理之间差异显著,表明 N_2O 排放与冬季作物种类有关。胡安永等^[17]研究太湖地区不同轮作模式对稻田温室气体排放的影响,发现整个稻季各轮作模式均有4个较明显的 N_2O 排放峰。这与本研究结果不一致。本研究中,早稻季有4个排放峰,晚稻除CRI处理有4个排放峰外,其他处理均为3个排放峰值。这可能是由于晚稻季作物生长后期, N_2O 排放处于极低水平,试验误差导致错过了最后一个排放峰值。谢义琴等^[32]和柳文丽等^[33]研究表明,施用氮肥可以有效增加 N_2O 的排放。本研究中,早稻CRR、CRI的 N_2O 排放量显著高于其他处理,说明相比其他种类绿肥,紫云英具有固氮功能可以替代部分氮肥^[8],进而促进了 N_2O 的排放。本研究还发现CRI、RRI处理全年 N_2O 累积排放量远高于其他处理,其原因可能是CRI、RRI晚稻季种植旱作物,旱作物灌溉、下雨等易造成土壤干湿交替,促进 N_2O 排放^[34],说明水旱轮作可以降低 CH_4 的排放量,但同时也会增加 N_2O 排放量。

3.3 不同种植模式对稻田 CH_4 和 N_2O 综合增温潜势及排放强度的影响

本研究中, CH_4 和 N_2O 对稻田综合增温潜势的贡献率不同,其中CRR、RRR、PRR这3种冬种-双季稻模式 CH_4 排放对GWP的贡献率达90%以上,而 N_2O 贡献率不足10%。这与董艳芳等^[18]的研究结论相似。CRI、RRI冬种-水旱轮作模式 CH_4 排放贡献率降至

60%左右,而 N_2O 贡献率极大提升。这与张岳芳等^[29]的研究结果相似。同为冬种-双季稻模式,种植不同种类的冬季作物对GWP和GHGI均会造成影响,其中RRR(冬种油菜)对GWP和GHGI的增加尤为明显。这与邓丽萍^[35]的研究结果一致。黄太庆等^[36]研究表明,稻田旱作季 CH_4 排放较低,这与本研究结果相同。本研究发现水旱轮作可以显著降低 CH_4 的排放,进而降低稻田GWP与GHGI。RRR(油菜-双季稻)的周年GWP和GHGI最高,而RRI(油菜-早稻-甘薯||晚大豆)的周年GWP和GHGI最低,这可能是由于油菜秸秆还田对 CH_4 的排放影响较大,而水旱轮作模式旱作季 N_2O 排放量剧增, CH_4 排放量低^[29],周年 CH_4 排放的GWP贡献比较低,加之冬种油菜可获得部分经济产量,导致处理RRI周年GWP和GHGI均为最低,其在5种模式的温室气体减排方面表现最好。

4 结论

不同种植模式对水稻产量和 CH_4 、 N_2O 的排放均会产生影响。绿肥能提高早稻的产量,但对晚稻产量基本无影响,其中紫云英对早稻产量增效最好;水旱轮作处理相较于双季稻处理可以获得更高的产量(旱作物产量折算成水稻产量比较),从两季水稻产量来看处理CRI、RRI表现较好,而处理RRI在减少温室气体排放方面在5种模式中表现最好,说明油菜-早稻-甘薯||晚大豆模式在产量、温室气体减排方面较优。

参考文献:

- [1] 祁乐,高明,郭晓敏,牛海东,李婷,孙涛,曹群玲,汤稼豪.生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J].环境科学,2018,39(5):2351-2359
- [2] 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
- [3] IPCC. Climate change 2013 the physical science basis [R]. New York: Cambridge University Press, 2013:27
- [4] 周贝贝,王一鸣,林先贵.不同处理方式的粪肥对水稻生长和温室气体排放的影响[J].应用与环境生物学报,2016,22(3):430-436
- [5] Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007, 118(1):6-28
- [6] 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
- [7] 杨滨娟,黄国勤,陈洪俊,兰延.利于水稻氮素吸收的绿肥翻压量

- 和施氮水平研究[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1187-1195
- [8] 张颖睿,杨滨娟,黄国勤.紫云英翻压量与不同施氮量对水稻生长和氮素吸收利用的影响[J].生态学杂志,2018,37(2):430-437
- [9] Zhu B, Yi L X, Hu Y G, Zeng Z H, Tang H M, Yang G L, Xiao X P. Effects of Chinese Milk Vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue incorporation on CH₄ and N₂O emission from a double-rice paddy soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(9):1537-1544
- [10] Tang H, Xiao P X, Tang W G, Wang K, Sun J M, Li W Y, Yang G L. Effects of winter covering crop residue incorporation on CH₄, and N₂O emission from double-cropped paddy fields in southern China[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22(16):12689-12698
- [11] 张岳芳,周炜,陈留根,王子臣,朱普平,盛婧,郑建初.太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究[J].中国生态农业学报,2013,21(3):290-296
- [12] 卢维盛,张建国,廖宗文,蔡祖聪.不同水分管理及耕作制度对广州地区稻田 CH₄ 排放的影响[J].华南农业大学学报,1997,18(3):57-61
- [13] 陈书涛,黄耀,郑循华,陈玉泉.轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J].中国农业科学,2005,38(10):2053-2060
- [14] 江长胜,王跃思,郑循华,朱波,黄耀.耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J].环境科学,2006,27(2):207-213
- [15] Van Groenigen J W, Velthof G L, Oenema O, Van Groenigen K J, Kessel C V. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 61(6):903-913
- [16] 孙丹平.稻田水旱复种轮作对作物生长、资源利用及土壤生态环境的影响[D].南昌:江西农业大学,2016
- [17] 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
- [18] 董艳芳,黄景,李伏生,王楷,方泽涛,刘靖雯,黄忠华,罗维钢.不同灌溉模式和施氮处理下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):578-588
- [19] 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
- [20] 张久东,包兴国,王婷,胡志桥,曹卫东,杨文玉,舒秋萍,李全福,王健.增施绿肥与降低氮肥对小麦产量和土壤肥力的影响[J].核农学报,2011,25(5):998-1003
- [21] 杨滨娟,黄国勤,王超,林青,徐宁.稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(10):1209-1216
- [22] 田卡,张丽,钟旭华,黄农荣,张卫建,潘俊峰.稻草还田和冬种绿肥对华南双季稻产量及稻田 CH₄ 排放的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(3):592-598
- [23] 马艳芹,钱晨晨,邓丽萍,黄国勤.紫云英配施氮肥对双季稻产量、干物质质量及氮素吸收利用的影响[J].核农学报,2017,31(12):2399-2407
- [24] 武际.水旱轮作条件下秸秆还田的培肥和增产效应[D].武汉:华中农业大学,2012
- [25] 刘威.冬种绿肥和稻草还田对水稻生长、土壤性质及周年温室气体排放影响的研究[D].武汉:华中农业大学,2015
- [26] 小白琳,张海林,陈阜,孙国峰,胡清,李永.耕作措施对双季稻田 CH₄ 与 N₂O 排放的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):282-289
- [27] 李大明,成艳红,刘满强,秦江涛,焦加国,李辉信,胡锋.秸秆覆盖旱作对稻田甲烷排放和水稻产量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(10):2053-2059
- [28] Hou P. Methane emission from rice fields as affected by straw continuous returning mode in the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Biomedical Signal Processing & Control, 2012, 7(1):79-87
- [29] 张岳芳,郑建初,陈留根,朱普平,盛婧,王子臣.水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J].生态环境学报,2012,21(9):1521-1526
- [30] 邵美红,孙加焱,阮关海.稻田温室气体排放与减排措施研究综述[J].浙江农业学报,2011,23(1):181-187
- [31] 唐海明,肖小平,孙继民,汤文光,汪柯,李微艳,杨光立.种植不同冬季作物对稻田甲烷、氧化亚氮排放和土壤微生物的影响[J].生态环境学报,2014,23(5):736-742
- [32] 谢义琴,张建峰,姜慧敏,杨俊诚,邓仕槐,李先,郭俊梅,李玲玲,刘晓,周贵宇.不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(3):578-584
- [33] 柳文丽,李锡鹏,沈茜,朱波.施肥方式对冬小麦季紫色土 N₂O 排放特征的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1029-1037
- [34] 欧阳扬,李叙勇.干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响[J].生态学报,2013,33(4):1251-1259
- [35] 邓丽萍.稻田复种轮作对作物产量、土壤肥力及农田温室气体排放的影响[D].南昌:江西农业大学,2017
- [36] 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 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J].生态与农村环境学报,2010,26(6):519-523

Effect of Paddy-upland Rotation With Different Winter Corps on Rice Yield and CH₄ and N₂O Emissions in Paddy Fields

ZHONG Chuan YANG Binjuan ZHANG Peng LI Ping HUANG Guoqin*

(Research Center on Ecological Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045)

Abstract: In order to explore the effects of different winter crops and paddy-upland rotation on rice paddy yield and greenhouse gas emission reduction, cropping patterns were set up as Chinese milk vetch - early rice - late rice (CRR), Chinese milk vetch - rice - sweet potato || soybean (CRI), rape - late early rice - late rice (RRR), rape - rice - sweet potato || soybean (RRI), and potato - early rice - late rice (PRR). Based on the effects of different water-and-dry crop rotation patterns of different crops in winter on rice yield, global warming potential (GWP) and greenhouse gas emission intensity (GHGI), the annual emission flux of CH₄ and N₂O in paddy fields was determined by static dark box-gas chromatography. The results showed that different crops in winter could increase the early rice yield, but they had little effect on the late rice yield, among which Chinese milk vetch had the best effect on early rice yield. And CRI treatment was 1.73%, 12.08%, and 7.48% higher than other treatments, respectively. The yield of water and drought rotation treatment was higher than double-season rice treatment, and late rice yield of RRI treatment was 5.37%, 22.54%, 29.83% and 27.24% higher than other treatments, respectively. Different crops in winter had no significant effect on CH₄ and N₂O emissions ($P > 0.05$), however, the paddy-upland rotation significantly increased N₂O emissions and reduced CH₄ emissions ($P < 0.05$). Among the 5 planting models, RRI treatment had the lowest GWP, and was 25.54%, 29.76%, and 20.78% lower than CRR, RRR, and PRR treatments, respectively ($P < 0.05$). The GHGI of RRI treatment was the lowest, which was 32.51%, 18.18%, 30.77%, and 20.59% lower than other treatments ($P < 0.05$), respectively. In summary, the effect of RRI treatment on increasing crop yields and reducing greenhouse gas emissions from rice fields was the best. The results provided a theoretical basis for high yield and greenhouse gas reduction in the double-crop rice paddy area in the Middle Reaches of the Yangtze River.

Keywords: paddy-upland rotation, methane, nitrous oxide, global warming potential, greenhouse gas emissions intensity