

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

田卡^{1,2}, 张丽³, 钟旭华^{1,2*}, 黄农荣^{1,2}, 张卫建³, 潘俊峰^{1,2}

(1.广东省农业科学院水稻研究所, 广州 510640; 2.广东省水稻育种新技术重点实验室, 广州 510640; 3.南京农业大学应用生态研究所, 南京 210095)

摘要:以常规稻合丰占为材料, 开展田间裂区试验, 主因素设稻草不还田和全部稻草还田 2 种处理, 副因素设冬闲和冬种绿肥并全部还田 2 种处理, 研究稻草还田和冬种绿肥及其互作对华南双季稻产量和稻田 CH₄ 排放的影响, 以期为华南双季稻低碳高产栽培提供指导。结果表明: 稻草全量还田显著提高水稻产量, 平均增产 4.8%, 主要原因是稻草还田促进水稻的干物质积累, 增加了每穗粒数, 但稻草还田极显著增加稻田 CH₄ 排放量, 平均增幅为 41.8%; 冬种紫云英绿肥显著提高水稻产量, 平均增产 3.6%, 同时稻田 CH₄ 排放量也增加, 但差异没有达到显著水平。无论是对水稻产量还是稻田 CH₄ 排放, 稻草还田和冬种绿肥处理之间的互作效应均不显著, 表明二者的作用是相互独立的。综合考虑水稻产量和 CH₄ 排放的表现, 冬种紫云英绿肥可作为华南双季稻低碳高产栽培的重要措施。

关键词: 水稻; 稻草还田; 冬种绿肥; 产量; 甲烷排放

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)03-0592-07 doi:10.11654/jaes.2015.03.024

Effects of Rice Straw and Winter Green Manure Incorporations on Grain Yields and Methane Emissions of Double-Season Rice (*Oryza sativa*) Field in South China

TIAN Ka^{1,2}, ZHANG Li³, ZHONG Xu-hua^{1,2*}, HUANG Nong-rong^{1,2}, ZHANG Wei-jian³, PAN Jun-feng^{1,2}

(1. Rice Research Institute of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Key Laboratory of New Technology for Rice Breeding, Guangzhou 510640, China; 3. Institute of Applied Ecology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Rice straw and winter green manure incorporations are two common practices to improve soil fertility and increase grain yields in rice farming systems in South China. However, they may also enhance CH₄ emissions from the paddy fields due to carbon inputs. This experiment was designed to investigate the effects of rice straw and winter green manure additions on grain yields and methane emissions of paddy fields with double-season rice in South China. Compared to zero-straw treatment, incorporating whole rice straw significantly enhanced both dry matter production and spikelets per panicle, and thus the yield of rice grains by 4.8%. Meanwhile, straw incorporation significantly stimulated CH₄ emissions, which was 41.8% higher than in zero-straw treatments. Applying winter green manure significantly increased grain yield by 3.6%, but did not significantly affect CH₄ emissions, compared to the no green manure control. There were no significant interactions between straw incorporation and green manure. Our results suggest that winter green manure would be a promising practice for low-carbon emission and high-yield rice production in South China.

Keywords: rice; straw incorporation; winter green manure; grain yield; methane emission

收稿日期: 2014-10-23

基金项目: 广东省科技攻关项目(2012A020200012); 广东省发改委低碳发展专项(2011-047); 农业部公益性行业(农业)科研专项(201103003)

作者简介: 田卡(1981—), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事作物养分资源综合管理研究。E-mail: tianka428@163.com

* 通信作者: 钟旭华 E-mail: xzhong8@163.com

我国稻草资源丰富,2009年稻草资源总量达1.84亿t,占全国秸秆总量的21%^[1]。一些农民为省工省力,往往直接在田间焚烧稻草,不仅造成土壤有机质投入减少和资源浪费,还造成环境污染,严重影响农业的可持续发展。随着水稻机械收割技术的发展,稻草直接还田已经作为可持续的秸秆资源利用方式被广为提倡。目前,关于稻草还田对水稻产量的影响报道较多,有研究认为稻草还田可以显著提高晚稻产量^[2],也有报道认为稻草还田有利于提高早稻产量,但对晚稻产量无影响^[3],还有研究表明不管是早稻还是晚稻,稻草还田均能增加水稻产量^[4]。众多的研究一致指出稻草还田增加稻田CH₄的排放量^[5-10]。总体上看,稻草还田对水稻产量和稻田CH₄排放均有较大影响。绿肥具有固定氮素、改善土壤物理性状、提高土壤养分含量等效果,对稻田培肥有着重要作用。我国南方稻区利用冬闲田种植绿肥是传统的生产方式之一。紫云英是我国南方稻区重要的冬种绿肥,研究表明,绿肥紫云英回田不仅能够提高水稻产量^[11-12],而且可以降低稻田CH₄的排放^[13]。

在华南双季稻区,由于农村劳动力的大量转移,水稻生产中有机肥的施用日趋减少,稻草还田和冬种绿肥成为维持地力的重要途径。由于稻草还田和绿肥对水稻产量及CH₄排放的影响都是分开研究的,关于稻草还田和冬种绿肥对水稻产量和稻田CH₄排放的共同影响及交互作用还未见报道,本文通过两年的田间试验,研究了稻草还田和冬种紫云英及其互作对华南双季稻产量和稻田CH₄排放的影响,旨在为华南双季稻高产低碳生产技术研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为常规稻合丰占,试验田位于广州市白云区钟落潭镇(23°17'N,113°23'E)的广东省农业科学院白云试验基地,土壤类型为砂质壤土,成土

母质为河流冲积物和宽谷冲积物,有机质21.4g·kg⁻¹,全氮1.13g·kg⁻¹,铵态氮69.4mg·kg⁻¹,有效磷65.6mg·kg⁻¹,速效钾67.2mg·kg⁻¹。2011年早季稻3月4日播种,4月10日移栽,晚季稻7月21日播种,8月7日移栽。2012年早季3月2日播种,4月4日移栽,晚季7月26日播种,8月12日移栽。株行距20cm×20cm,每穴插植3苗。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主因素为稻草处理,设稻草不还田和稻草全量还田2个水平,副因素为冬种绿肥处理,设冬闲和冬种紫云英2个水平,共4个处理:冬闲-稻草不还田(T1)、冬绿肥-稻草不还田(T2)、冬闲-稻草全量还田(T3)、冬绿肥-稻草全量还田(T4),每个处理重复4次,小区面积40m²,小区间筑埂包膜以防肥料渗漏。各处理施肥量见表1。双季稻氮肥(尿素)均按照基肥40%、分蘖肥20%、穗肥30%和粒肥10%的比例分配,磷肥(过磷酸钙)全部做基肥施用,稻草不还田处理(T1和T2)的钾肥(氯化钾)在分蘖中期和穗分化始期各施一半,稻草还田处理(T3和T4)的钾肥(氯化钾)在穗分化始期施用(为减少稻草还田带来的各处理钾素营养差异,稻草还田处理化学钾肥的量较稻草不还田处理减少一半)。早稻收割后将稻草全部切碎回田,平均还田量为5290kg·hm⁻²,晚稻收割后稻草不切碎全部直接覆盖还田,平均还田量为5493kg·hm⁻²。双季稻全生育期水分等按常规高产栽培管理,严格防治病虫害。2011年冬种紫云英(T2和T4)仅施磷肥,全部在紫云英播种后30d施用,2012年冬种紫云英(T2和T4)除在紫云英播种后30d施用磷肥外,至60d施用氮肥。2011年和2012年紫云英产量分别为10900、14467kg·hm⁻²,全部于早稻移栽前15d翻沤还田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 CH₄气样采集与测定

用静态暗箱-气相色谱法采集CH₄气体。采样箱

表1 2011年和2012年早稻、晚稻及冬种绿肥的化肥施用量(kg·hm⁻²)

Table 1 Chemical fertilizer inputs for early and late season rice and winter green manure in 2011 and 2012(kg·hm⁻²)

处理	冬作施肥量						早季施肥量			晚季施肥量		
	2011年			2012年			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O						
T1	0	0	0	0	0	0	120	45	90	180	27	108
T2	0	27	0	35	27	0	120	45	90	180	27	108
T3	0	0	0	0	0	0	120	45	45	180	27	54
T4	0	27	0	35	27	0	120	45	45	180	27	54

分为顶箱、中段箱和底座三部分,顶箱和中段箱由 4 mm 厚 PVC 板制成,规格为 60 cm×60 cm×60 cm,外部包有海绵和锡箔,用来反射太阳光及限制采样箱壁温度和箱内气温升高,保持取样时段箱内外温度的相对一致。底座由 6 mm 厚 PVC 板制成,上端有密封水槽。水稻移栽后在各处理小区安装静态箱底座,底座入土 10 cm,其中有 9 株水稻。水稻移栽后的第 3 d 开始进行气体采集,以后每隔 7 d 采集 1 次。每次采样时间为上午 9:00—11:00,取样时将采样箱垂直安放在底座凹槽内并用水密封,保证箱内气体与大气不进行气体交换。顶箱顶壁装有 1 个 12 V 的小电风扇,采样前将箱内风扇打开,使箱内气体混合均匀。于盖箱之后 0、5、10、15 min 采样,每次抽样 70 mL 放入真空玻璃瓶中备测。

采用经改装的气相色谱(Agilent 7890A,安捷伦科技有限公司,美国)测定 CH₄,检测器是火焰离子检测器(FID),温度 250 ℃,色谱柱温度为 50 ℃。标准气体购于北京兆格气体科技有限公司。

1.3.2 产量及其构成

成熟期调查有效穗数,每小区取样 12 穴考种,测定每穗粒数、结实率和千粒重。各小区实收 5 m²,脱粒,晒干扬净,称重,测水分,换算为含水量为 14% 的稻谷产量。

1.4 数据处理

稻田 CH₄ 排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho \times h \times [273 / (273 + T)] \times dC / dt$$

式中: F 为气体排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为 CH₄ 在标准状态下的密度,0.714 kg·m⁻³; h 为采样箱顶部距离稻田水面的实际高度,m; dC/dt 为采样过程中采样箱内 CH₄ 的浓度变化率; T 为采样过程中采样箱内的平均温度,℃。

根据气样浓度与时间的关系曲线计算 CH₄ 气体的排放通量,然后估算其排放量(平均通量值与整个作物生长期总小时数的乘积)。CH₄ 的排放强度为 CH₄ 的排放量与水稻产量的比值。

数据处理及作图使用 Excel 2007,统计分析采用 Statistix 8.0 软件进行,将年份、季节、冬作、稻草还田作为试验因子,分析各因子的主效应及互作效应,并比较差异显著性。

2 结果与分析

2.1 处理效应的方差分析

方差分析表明(表 2),水稻产量在不同稻草处

理、不同季节、不同冬作处理间存在显著或极显著差异,不同年份间差异不显著,年份×季节的互作效应显著,其余的互作效应均不显著。CH₄ 排放量和 CH₄ 排放强度在不同稻草处理间分别存在极显著和显著差异,在不同年份间、不同季节间也存在极显著差异,在不同冬作处理间无显著差异,除年份×季节×稻草的互作效应显著外,其余的互作效应均不显著。

表 2 产量、CH₄ 排放量和 CH₄ 排放强度在年度间、季节间及稻草还田、冬种绿肥处理间的方差分析(F 值)

Table 2 Analysis-of-variance(F -Values) for grain yield, CH₄ emissions and CH₄ emission intensity between years, seasons, and straw incorporation and winter green manure treatments

变异来源	产量	CH ₄ 排放量	CH ₄ 排放强度
年份(Y)	0.30ns	18.5**	12.0**
季节(S)	190.6**	14.2**	25.0**
稻草处理(A)	9.79**	11.1**	6.35*
冬作(B)	5.52*	1.11ns	0.44ns
Y×S	53.4**	0.40ns	1.55ns
Y×A	0.11ns	0.79ns	0.87ns
Y×B	0.55ns	0.01ns	0.15ns
S×A	0.06ns	0.07ns	0.11ns
S×B	1.22ns	0.01ns	0.00ns
A×B	0.06ns	2.67ns	2.46ns
Y×S×A	0.03ns	6.41*	4.72*
Y×S×B	0.00ns	0.02ns	0.12ns
Y×A×B	0.09ns	0.01ns	0.03ns
S×A×B	1.52ns	0.11ns	0.00ns
Y×S×A×B	0.68ns	0.75ns	0.65ns

注:**和* 分别代表在 $P=0.05$ 和 $P=0.01$ 水平上差异显著;ns 表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

2.2 稻草还田和冬种绿肥对水稻产量及其构成因素的影响

从表 3 可以看出,不同年份之间,产量无显著差异;产量构成因素中,有效穗数($F=17.7$ **, $P<0.01$)、每穗粒数($F=40.0$ **, $P<0.01$)和收获指数($F=19.0$ **, $P<0.01$)存在极显著差异,有效穗数和收获指数是 2011 年高于 2012 年,每穗粒数则是 2012 年高于 2011 年。不同季节之间,晚季产量高于早季,达极显著水平($F=190.6$ **, $P<0.01$);产量构成因素中有效穗数($F=20.4$ **, $P<0.01$)、结实率($F=54.3$ **, $P<0.01$)和千粒重($F=55.2$ **, $P<0.01$)都存在极显著差异,且均是晚季高于早季,每穗粒数差异则不显著。不同稻草处理之间产量存在极显著差异($F=9.79$ **, $P<0.01$),2 年 4 季平均,稻草还田处理较稻草不还田处理增产

4.8%。稻草还田对每穗粒数($F=35.0^{**}$, $P<0.01$)和干物质积累量($F=26.4^{**}$, $P<0.01$)有极显著影响,稻草还田处理比稻草不还田处理分别提高7.2%和7.6%,而对有效穗数、结实率、千粒重和收获指数均无显著影响。冬种绿肥对水稻产量有显著影响($F=5.52^*$, $P<0.05$),2年4季平均,冬种绿肥处理较冬闲处理增产3.6%;在产量构成因素中,有效穗数($F=24.7^{**}$, $P<0.01$)和干物质积累量($F=13.4^{**}$, $P<0.01$)存在极显著差异,冬种绿肥处理比冬闲处理分别提高8.6%和5.3%,而每穗粒数、结实率、千粒重和收获指数均无显著差异。

2.3 稻田CH₄的排放动态

各处理稻田CH₄排放通量的季节性变化如图1所示。2年4季稻田CH₄排放规律相似,各处理稻田CH₄排放通量都在水稻幼穗分化前达到峰值,在水稻幼穗分化后呈现排放低值,但2012年早季抽穗后的排放通量也较高。稻草还田处理提高了水稻幼穗分化前稻田CH₄的排放通量,冬种绿肥对稻田CH₄的排放通量影响不大。

2.4 稻草还田和冬种绿肥对稻田CH₄排放量和排放强度的影响

由表4可知,在不同年份、季节和稻草还田处理

表3 不同处理的水稻产量及其构成因素

Table 3 Yield and its components of rice grains in different treatments

因素	年份	产量/kg·hm ⁻²	有效穗数/穗·m ⁻²	每穗粒数	结实率/%	千粒重/g	总干物质积累量/kg·hm ⁻²	收获指数
年份	2011	6369	215.8**	208.1	77.1	19.6	11 304	0.523**
	2012	6317	201.3	224.2**	76.2	19.5	11 594	0.505
季节	早季	5686	200.8	218.2	72.9	19.1	10 770	0.494
	晚季	7000**	216.4**	214.1	80.3**	19.9**	12 128**	0.534**
稻草	不还田	6194	209.3	208.6	76.6	19.5	11 031	0.517
	还田	6492**	207.8	223.7**	76.6	19.5	11 866**	0.511
冬作	冬闲	6231	200.0	218.0	77.2	19.6	11 151	0.516
	冬种绿肥	6455*	217.1**	214.3	76.1	19.5	11 746**	0.512

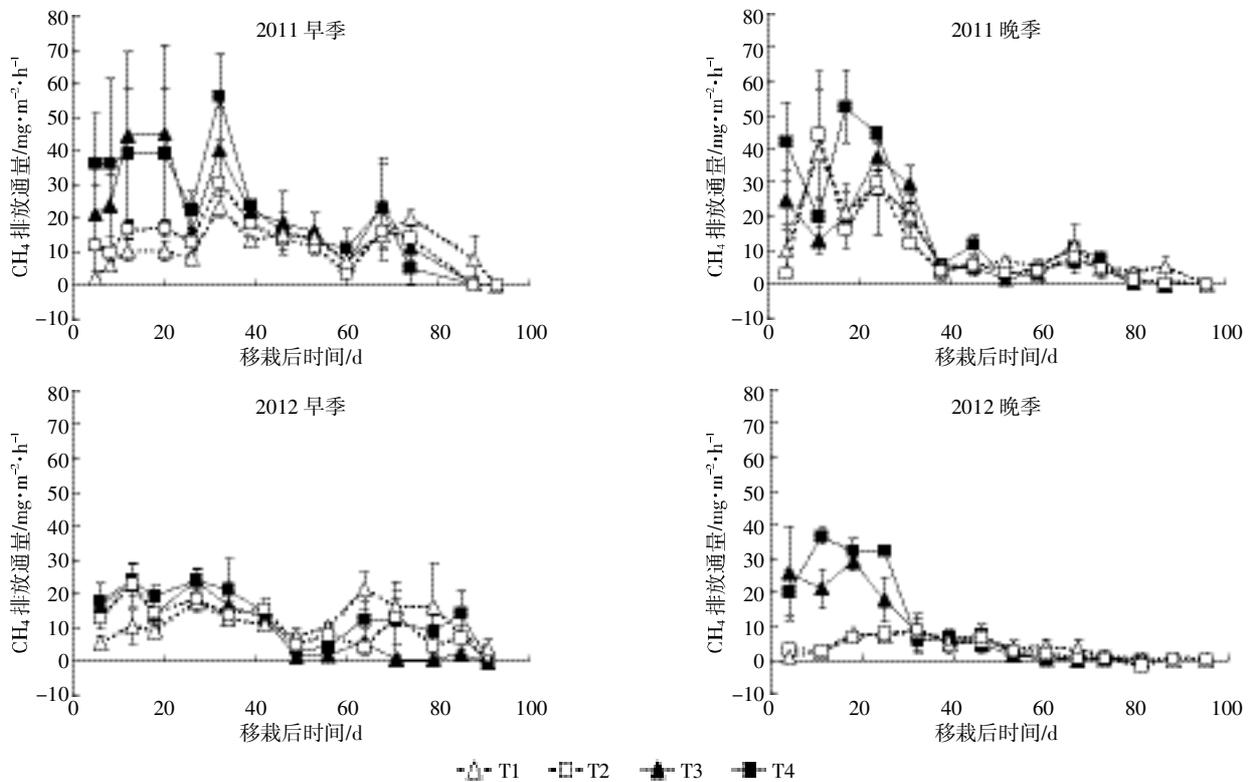


图1 稻草还田和冬种绿肥对稻田CH₄排放动态的影响

Figure 1 Effects of rice straw and winter green manure incorporations on seasonal variations of CH₄ emissions from paddy field

之间,稻田 CH_4 排放量存在极显著差异。2011 年高于 2012 年 ($F=18.5^{**}, P<0.01$), 早季高于晚季 ($F=14.2^{**}, P<0.01$)。稻草还田处理的稻田 CH_4 排放量比稻草不还田处理提高 41.8% ($F=11.1^{**}, P<0.01$)。冬种绿肥处理的稻田 CH_4 排放量比冬闲处理略有提高,增幅为 11.3%,但差异未达显著水平。 CH_4 排放强度与 CH_4 排放量趋势一致,2011 年高于 2012 年 ($F=12.0^{**}, P<0.01$), 早季高于晚季 ($F=25.0^{**}, P<0.01$)。稻草还田处理高于稻草不还田处理 ($F=6.35^*, P<0.05$), 提高幅度为 32.9%。冬种绿肥处理的稻田 CH_4 排放强度比冬闲处理提高 7.6%,但差异未达显著水平。

表 4 不同处理的稻田 CH_4 排放量和 CH_4 排放强度

Table 4 Quantity and intensity of CH_4 emissions in different treatments

因素		CH_4 排放量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	CH_4 排放强度/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
年份	2011	30.7**	48.6**
	2012	19.6	32.9
季节	早季	30.0**	52.1**
	晚季	20.3	29.4
稻草	不还田	20.8	35.0
	还田	29.5**	46.5*
冬作	冬闲	23.8	39.3
	冬种绿肥	26.5	42.3

3 讨论

3.1 稻草还田对水稻产量和稻田 CH_4 排放的影响

许多研究发现稻草还田可提高水稻产量^[2-4, 14-16]。本研究认为,在化学氮、磷养分相同、化学钾肥减半的情况下,稻草全量还田具有极显著的增产作用,其主要原因是每穗粒数增加,干物质积累量提高,与周江明等^[17]和陈万明等^[18]结论一致。然而,彭英湘等^[4]认为稻草还田增产的主要原因是增加了有效穗数,而何虎等^[14]报道稻草全量还田配施适量的氮肥,水稻增产 8.8%,产量构成因子中有效穗数、结实率和千粒重均显著提高,与本研究的结果不同。我们的前期研究表明,稻草还田显著促进水稻幼穗分化期间的氮素吸收,可能是稻草还田处理每穗粒数增加的主要原因^[19]。

众多研究指出稻草还田增加了稻田 CH_4 排放量。江淮地区研究报道,湿润直播稻和移栽稻草还田显著提高稻田 CH_4 排放量,而旱直播稻中稻草还田对稻田 CH_4 排放量影响不显著^[5]。南京的研究指出,稻草不还田减少稻田 59.0%的 CH_4 排放量^[6]。据伍芬琳等^[7]

报道,在翻耕的情况下,稻草还田主要增大晚稻生长季和冬闲季节的 CH_4 排放,对早稻生长季的影响较小。Naser 等^[8]指出,稻草还田显著提高稻田 CH_4 排放量,并且稻田 CH_4 排放量随着还田稻草量的增加而增加。陈苇等^[9]研究指出,稻草无论翻施或表施均显著提高稻田 CH_4 排放量,但稻草表施明显降低水稻分蘖期的 CH_4 排放速率,使稻田 CH_4 总排放量降低 11.3%。Yagi 等^[10]的研究也发现,稻草还田提高了稻田 CH_4 排放速率。本研究 2 年 4 季综合分析表明,稻草还田极显著增加稻田 CH_4 排放量,增幅达 41.8%,与前人的研究结论一致。

稻草还田一方面提高了水稻产量,另一方面却增加了稻田 CH_4 排放量。如何缓解这两方面的矛盾,实现高产低碳生产,还需要进一步研究。以往的研究表明,稻草覆盖还田和免耕还田可减少稻田 CH_4 的排放^[20-22],改进水分管理可显著减少 CH_4 排放^[23]。在稻草还田情况下,如何改进水分管理、减少 CH_4 排放,值得进一步探讨。

3.2 冬种绿肥对水稻产量和稻田 CH_4 排放的影响

冬种绿肥促进水稻增产^[11-12]。黄庆裕^[24]在广西的研究结果表明,紫云英适宜压青量为 15 000~22 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可使早稻增产 7.1%~10.4%,晚稻增产 2.6%~4.5%。刘英等^[25]在安徽的试验指出,配施 22 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 紫云英绿肥,水稻产量最高,而继续增施紫云英水稻产量反而下降。本试验 2 年紫云英的产量分别为 10 900、14 467 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,全部回田,双季稻平均产量比冬闲处理提高 3.6%,与前人的研究结果基本一致。紫云英回田增加了早季水稻的产量,增产的主要原因是增加了有效穗数,与他人的研究结果一致^[25-26],这可能与紫云英前期腐解较快,增加了水稻分蘖期氮素供应,从而促进了水稻分蘖发育有关^[27-28]。

以往关于种植绿肥对稻田 CH_4 排放影响的报道结论不尽一致。荣湘民等^[13]对比研究了 4 种稻作制,结果显示:稻-稻-绿肥(紫云英) CH_4 的排放量最小,明显低于稻-稻-冬闲的耕作制。而 Van der Gon^[29]在菲律宾的研究则表明,施用绿肥(田菁)增加了稻田 CH_4 的排放。本研究结果显示,冬种绿肥(紫云英)处理的稻田 CH_4 排放量比冬闲处理增加了 10.2%,差异不显著。化肥生产是中国能源消耗和温室气体排放的重要组成部分^[30]。紫云英是典型的固氮植物,冬种紫云英回田可以替代部分化学氮肥,从而减少水稻化学氮肥用量和化学氮肥生产过程中的温室气体排放。综合考虑绿肥的增产、固氮、减排和土壤培肥等效应,冬

种紫云英可作为华南双季稻区低碳高产栽培的有效技术措施之一。

3.3 稻草还田和冬种绿肥的互作效应

以往关于稻草还田与冬种绿肥互作方面的研究鲜有报道。本研究中,稻草还田×冬种绿肥的互作效应不显著,说明稻草还田和冬种绿肥对水稻产量和稻田CH₄排放的作用是彼此独立的,最佳稻草处理与最佳冬种处理的组合是最优的处理组合。从增产效果来看,稻草还田和冬种紫云英的处理组合是最优的,但其稻田CH₄排放也是最多的。在稻草还田结合冬种紫云英的条件下如何减少稻田CH₄排放,是水稻低碳高产栽培中亟待解决的问题。

4 结论

(1)与稻草不还田相比,稻草全量还田显著提高水稻产量,增产幅度为4.8%。稻草还田极显著增加稻田CH₄排放量和CH₄排放强度,增幅分别为41.8%和32.9%。

(2)与冬闲处理相比,冬种紫云英绿肥处理的水稻产量提高3.6%,增产达到显著水平;稻田CH₄排放量和CH₄排放强度提高,增幅分别为11.3%和7.6%,但差异均未达到显著水平。综合考虑水稻产量和CH₄排放等方面的表现,冬种紫云英可作为华南双季稻区低碳高产栽培的有效技术措施之一。

(3)稻草还田和冬种绿肥之间不存在显著的互作效应。

参考文献:

- [1] 毕于运,王红彦,王道龙,等. 中国稻草资源量估算及其开发利用[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15):137-143.
BI Yu-yun, WANG Hong-yan, WANG Dao-long, et al. Estimation and utilization of rice straw resources in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15):137-143.
- [2] 张水清,钟旭华,黄农荣,等. 稻草覆盖还田对华南双季晚稻物质生产和产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(3):284-290.
ZHANG Shui-qing, ZHONG Xu-hua, HUANG Nong-rong, et al. Effects of straw mulching on dry matter production and grain yield of double cropping late-season rice (*Oryza sativa*) in South China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(3):284-290.
- [3] 吴建富,曾研华,潘晓华,等. 机械化稻草全量还田对水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(5):835-839, 879.
WU Jian-fu, ZENG Yan-hua, PAN Xiao-hua, et al. Effect of rice straw incorporation on rice yield and carbon pool management index under the application of farm mechanization[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(5):835-839, 879.
- [4] 彭英湘,王凯荣,谢小立,等. 水肥条件与稻草还田对土壤供氮及水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007(4):40-43, 48.
PENG Ying-xiang, WANG Kai-rong, XIE Xiao-li, et al. Effects of rice straw incorporation on soil nitrogen supply and rice yield under different irrigation and fertilizer regimes[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(4):40-43, 48.
- [5] Hang X N, Zhang X, Song C L, et al. Differences in rice yield and CH₄ and N₂O emissions among mechanical planting methods with straw incorporation in Jianghuai area, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 144:205-210.
- [6] Wang J Y, Zhang X L, Xiong Z Q, et al. Methane emissions from a rice agroecosystem in South China: Effects of water regime, straw incorporation and nitrogen fertilizer[J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2012, 93(1):103-112.
- [7] 伍芬琳,张海林,李琳,等. 保护性耕作下双季稻农田甲烷排放特征及温室效应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9):2703-2709.
WU Fen-lin, ZHANG Hai-lin, LI Lin, et al. Characteristics of CH₄ emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9):2703-2709.
- [8] Naser H M, Nagata O, Tamura S, et al. Methane emissions from five paddy field with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(1):95-101.
- [9] 陈苇,卢婉芳,段彬伍,等. 稻草还田对晚稻稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(2):170-176.
CHEN Wei, LU Wan-fang, DUAN Bin-wu, et al. Effect of rice straw manure on methane emission in late rice paddy fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2):170-176.
- [10] Yagi K, Minami K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36(4):599-610.
- [11] 高菊生,徐明岗,董春华,等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2):343-349.
GAO Ju-sheng, XU Ming-gang, DONG Chun-hua, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2):343-349.
- [12] 易镇邪,刘书波,陈冬林,等. 不同复种制下秸秆还田对水稻生产能力的影 响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(6):565-569.
YI Zhen-xie, LIU Shu-bo, CHEN Dong-lin, et al. Effect of straw returning to field on rice productivity in different cropping systems[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2013, 39(6):565-569.
- [13] 荣湘民,袁正平,胡瑞芝,等. 稻作制有机肥地下水位对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(6):394-397.
RONG Xiang-min, YUAN Zheng-ping, HU Rui-zhi, et al. Effects of rice-based cropping system, organic manure and groundwater level on methane emission from rice fields[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(6):394-397.
- [14] 何虎,吴建富,曾研华,等. 稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量及其氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014,

- 20(4):811-820.
- HE Hu, WU Jian-fu, ZENG Yan-hua, et al. Effects of nitrogen management on yield and nitrogen utilization of double cropping late rice under total rice straw incorporation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4):811-820.
- [15] 余冬立, 王凯荣, 谢小立, 等. 施 N 模式与稻草还田对土壤供 N 量和水稻产量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(2):16-20, 44.
- SHE Dong-li, WANG Kai-rong, XIE Xiao-li, et al. Effects of application of N fertilizer and incorporation of rice straw on soil nitrogen supply and rice yield[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(2):16-20, 44.
- [16] Tuyen T Q, Tan PS. Effects of straw management, tillage practice on soil fertility and grain yield of rice[J]. *Omonrice*, 2001, 9:74-78.
- [17] 周江明, 徐大连, 薛才余. 稻草还田综合效益研究[J]. *中国农学通报*, 2002, 18(4):7-10.
- ZHOU Jiang-ming, XU Da-lian, XUE Cai-yu. Study of comprehensive utilization efficiency of returning rice straw to field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2002, 18(4):7-10.
- [18] 陈万明, 谢胜祖, 蔡长安, 等. 稻草还田与施钾效果研究[J]. *土壤肥料*, 2004(6):7-10.
- CHEN Wan-ming, XIE Sheng-zu, CAI Chang-an, et al. Study on effects of rice straw return into field and using potassium[J]. *Soil and Fertilizer*, 2004(6):7-10.
- [19] 张水清, 钟旭华, 黄农荣, 等. 稻草覆盖还田对水稻氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3):611-616.
- ZHANG Shui-qing, ZHONG Xu-hua, HUANG Nong-rong, et al. Effect of straw-mulch-incorporation on nitrogen uptake and N fertilizer use efficiency of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):611-616.
- [20] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6):210-216.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under on-tillage conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6):210-216.
- [21] 肖小平, 伍芬琳, 黄风球, 等. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究[J]. *农业现代化研究*, 2007, 28(5):629-632.
- XIAO Xiao-ping, WU Fen-lin, HUANG Feng-qiu, et al. Greenhouse air emission under different pattern of rice-straw returned to field in double rice area[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28(5):629-632.
- [22] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11):216-224.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH₄ and N₂O emission from double rice field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11):216-224.
- [23] Sarah E J B, Olivyn R A, Maria C R A, et al. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants[J]. *Geoderma*, 2009, 149(1-2):45-53.
- [24] 黄庆裕. 紫云英压青对水稻产量的影响[J]. *土壤肥料*, 1998(2):29-31.
- HUANG Qing-yu. Effect of milk vetch application on grain yield of rice[J]. *Soil and Fertilizer*, 1998(2):29-31.
- [25] 刘英, 王允青, 张祥明, 等. 种植紫云英对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(1):98-99, 189.
- LIU Ying, WANG Yun-qing, ZHANG Xiang-ming, et al. Effect of growing milk vetch on soil fertility and rice grain yield[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2007, 13(1):98-99, 189.
- [26] 陈洪俊, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 冬种绿肥对早稻产量及稻田杂草群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(10):1976-1984.
- CHEN Hong-jun, HUANG Guo-qin, YANG Bin-juan, et al. Effects of different winter planting-green manure on the grain yield of rice and weed community of paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10):1976-1984.
- [27] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 亚热带单季稻区紫云英不同翻压量下有机碳和养分释放特征[J]. *草业学报*, 2012, 21(4):319-324.
- WANG Fei, LIN Cheng, LI Qing-hua, et al. A study on organic carbon and nutrient releasing characteristics of different astragalus sinicus manure use levels in a single cropping region of subtropical China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4):319-324.
- [28] 王允青, 曹卫东, 郭熙盛, 等. 不同还田条件下紫云英腐解特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(34):19388-19389, 19391.
- WANG Yun-qing, CAO Wei-dong, GUO Xi-sheng, et al. Study on the streptococcal debridement decompose characteristics of astragalus sinicus under different return-to-field conditions[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(34):19388-19389, 19391.
- [29] Denier Van der Gon H A C, Neue H U. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1):11-22.
- [30] 李锋. 我国小麦生产主要能耗投入品相关温室气体排放研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5):1041-1049.
- LI Feng. Greenhouse gas emissions from major energy consumption in wheat production in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):1041-1049.