

秸秆覆盖旱作对稻田甲烷排放和水稻产量的影响

李大明^{1,2}, 成艳红^{1,2}, 刘满强¹, 秦江涛³, 焦加国¹, 李辉信¹, 胡 锋^{1*}

(1.南京农业大学资源与环境科学学院土壤生态实验室, 南京 210095; 2.国家红壤改良工程技术研究中心, 江西省红壤研究所, 南昌 331717; 3.中科院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:为较全面评价秸秆覆盖旱作水稻栽培模式的生态意义,采用田间试验研究了常规淹水(F)、秸秆覆盖旱作(NF-M)和无覆盖旱作(NF-ZM) 3种栽培模式稻田甲烷排放、水稻产量及土壤养分的变化规律。结果表明:3种水稻栽培模式的甲烷排放均集中在水稻生育期的前20 d;在水稻生育期内,秸秆覆盖旱作稻田甲烷的排放总量为 $11.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,显著高于常规淹水稻田的 $7.78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和无覆盖旱作稻田的 $4.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。秸秆覆盖旱作稻田的水稻产量为 $8.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,与常规淹水处理没有显著差异,但二者均显著高于无秸秆覆盖旱作处理的 $6.78 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;与常规淹水处理相比,秸秆覆盖旱作还可以提高水稻单株生物量10 g以上。秸秆覆盖旱作还可以显著提高稻田表层土壤有机质含量,维持和改善表层土壤养分状况,对实现农业可持续性有重要意义。因此,在水资源缺乏地区,秸秆覆盖旱作是一种值得考虑的替代传统淹水栽培的水稻栽培模式,同时秸秆覆盖旱作还田也是一种值得推广的稻田秸秆管理技术。

关键词:水稻旱作;秸秆覆盖;甲烷排放;水稻产量;土壤养分

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)10-2053-07

Effects of Non-flooded with Straw Mulching Management on Methane Emission and Rice Yield in Paddy Field

LI Da-ming^{1,2}, CHENG Yan-hong^{1,2}, LIU Man-qiang¹, QIN Jiang-tao³, JIAO Jia-guo¹, LI Hui-xin¹, HU Feng^{1*}

(1.Soil Ecology Lab, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331717, China; 3.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Conventional rice cultivation not only consumes plentiful of water but also emits much methane from paddy field under flooded conditions. It is important to explore an alternative rice cultivation which could maintain high rice yield but reduce water consumption and methane emission. A field experiment was conducted to study the changes of methane emission, rice yield and soil nutrient under three rice cultivation styles, including conventional flooded (F), non-flooded with (NF-M) and without (NF-ZM) straw mulching. The results showed that methane flux peaked 2 weeks after transplanting and maintained at low rate till another small peak 50 days after transplanting in all the treatments. The accumulated methane emission of NF-M, F and NF-ZM during the growing period were $11.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $7.78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and $4.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The NF-ZM reduced seasonal CH_4 emissions by 46% while the NF-M increased seasonal CH_4 emissions by 43% compared to the F. For the non-flooded treatment, the accumulated methane emission in treatment with straw mulching was 2.63 times higher than that of treatment without straw mulching. The rice yield of NF-M was almost equivalent with F, but NF-ZM was significantly lower than that of the F. The primary reasons of lower crop yield in non-flooded treatments were attributed to the high spikelet sterility and low 1000 grain weight, however, the total seed number of NF-M was higher than that of the other two treatments, which kept the crop yield at a high level. Meanwhile, the NF-M increased rice biomasses 10 g per hill compared to the conventional flooded treatment. The NF-M also increased soil organic matter content and improved or maintained nutrient status of surface soil (0~15 cm). Thus, non-flooded with straw mulching is highlighted as a promising alternative rice cultivation management for reducing water consumption and utilizing rice straw for rice paddy field management.

Keywords: non-flooded rice cultivation; straw mulching; methane emission; rice yield; soil nutrient

收稿日期:2012-05-02

基金项目:国家自然科学基金(30900210);公益性行业(农业)科研专项(200903011,201003016);江苏高校优势学科建设工程(PAPD)

作者简介:李大明(1984—),男,江苏宿迁人,博士,主要从事农田碳循环、农业废弃物循环利用和植物营养方面的研究。E-mail:lid_2005@126.com

* 通信作者:胡 锋 E-mail:fenghu@njau.edu.cn

水稻是我国主要的粮食作物,其播种面积和总产量分别占全国粮食作物的30%和45%。但传统的水稻淹水栽培耗水量惊人,每公顷可达6000~9000 m³,稻作区灌溉用水量占农业用水总量的65%以上^[1-2]。因此,发展水稻的节水栽培技术,特别是水稻旱作技术,对于发展节水农业,促进农业可持续发展,具有重要意义。近年来,水稻旱作技术,尤其是覆盖旱作技术发展很快。大部分研究者认为:覆盖旱作可以有效地减少水分的损失,提高水分的利用率,维持水稻的生长和保持较高的产量^[1,3-4]。众多研究指出,作物秸秆覆盖是覆盖旱作技术中最为方便和经济的一种,其效果也最好^[3-4]。

淹水稻田是甲烷排放的主要生物源之一,控制稻田甲烷的排放也是当前研究者关注的热点。秸秆作为一种有机碳源,施入后会显著提高稻田土壤的有机质含量,是目前提升水稻土有机质含量的主要措施,但是秸秆还田也将大幅度增加稻田甲烷的排放,影响环境质量^[5-7]。因此,控制秸秆还田后稻田的甲烷排放也日益成为农业科研工作者关心的问题。研究表明:间歇性干旱和控灌可有效减少稻田甲烷的排放量^[8-10]。水稻旱作很有可能大幅度减少施加秸秆稻田的甲烷排放量,但目前尚缺乏秸秆覆盖旱作稻田的甲烷排放规律。本文旨在通过田间试验揭示秸秆覆盖旱作稻田甲烷排放规律,并结合水稻产量以及土壤养分状况的变化特征对秸秆覆盖旱作水稻栽培模式的综合生态效应进行比较,为探索高效的水稻节水栽培模式及合理的稻田秸秆管理技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2003年起在江西省余江县(N28°15',

E116°55')邓家埠水稻原种场进行。余江县多年年均气温为17.6℃,年均降雨量和蒸发量分别为1752.1 mm和1359 mm。虽然总降水量丰沛,但该地区存在严重的季节性干旱(图1)。早稻生长期(4月下旬至7月中旬)降雨量可达750 mm左右,且该时段气温较低,蒸发不强烈;而晚稻生长期(7月下旬至10月底)3个多月的降雨总量只有281 mm,同期的潜在腾发量(结合地表植被蒸腾和具饱和含水量的裸露土表蒸发,依据Penman-Monteith方程计算得出,比单纯的蒸发量更能表征作物的受胁迫程度)却高达540 mm,水稻生长受到很大影响,因此水稻旱作试验在晚稻生育期内进行。2009年晚稻生育期日平均温度和降雨量见图2。

试验地土壤属于河流冲积土发育而成的潜育型水稻土,耕层土壤(0~15 cm)有机质含量25.5 g·kg⁻¹,全氮1.54 g·kg⁻¹,有效氮95.1 mg·kg⁻¹,有效磷16.1 mg·kg⁻¹,速效钾34.2 mg·kg⁻¹,pH 5.5。

1.2 试验设计

试验共设3个处理:常规淹水处理(F),秸秆覆盖旱作处理(NF-M)和无覆盖旱作处理(NF-ZM)。每个处理均为3次重复,小区面积60 m²(6 m×10 m)。不同处理田块周围埋置双层塑料薄膜防止水分侧渗,相同处理的小区灌溉水量相同。覆盖旱作中稻草覆盖量为5000 kg·hm⁻²(风干重),移栽后均匀覆盖于土表。旱作处理在全生育期内(返青期除外)不建立水层,在田间持水量低于80%(FDR中子仪田间原位测定)时向小区灌水,同时保证所灌水量在几小时后水层消失。常规淹水处理在生育期(烤田期除外)内田面均保持2 cm以上的水层。

整田后施用基肥,基肥由尿素、过磷酸钙和氯化钾混合组成,施用量为纯N 11.25 g·m⁻²,P₂O₅ 9 g·m⁻²,K₂O 7.5 g·m⁻²。在分蘖和抽穗期以前两次施用追肥,用

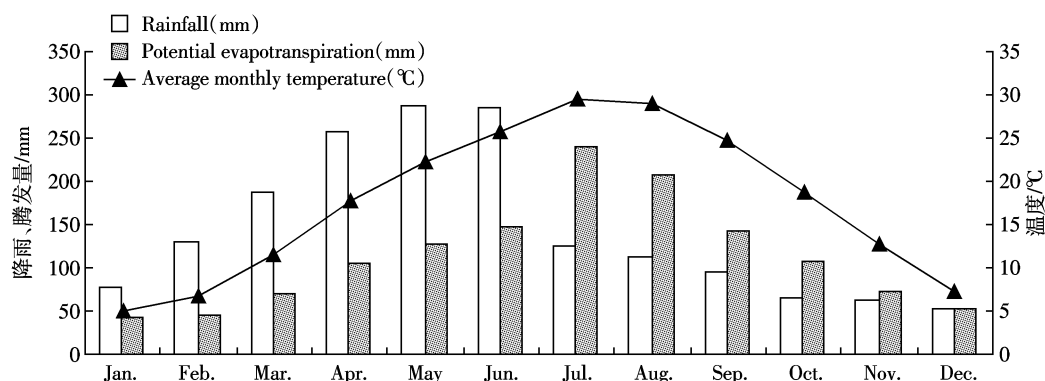


图1 1954—2009年余江县月均温,月降雨量及潜在腾发量

Figure 1 Average monthly temperature, rainfall and potential evapotranspiration recorded at Yujiang County during the period of 1954—2009

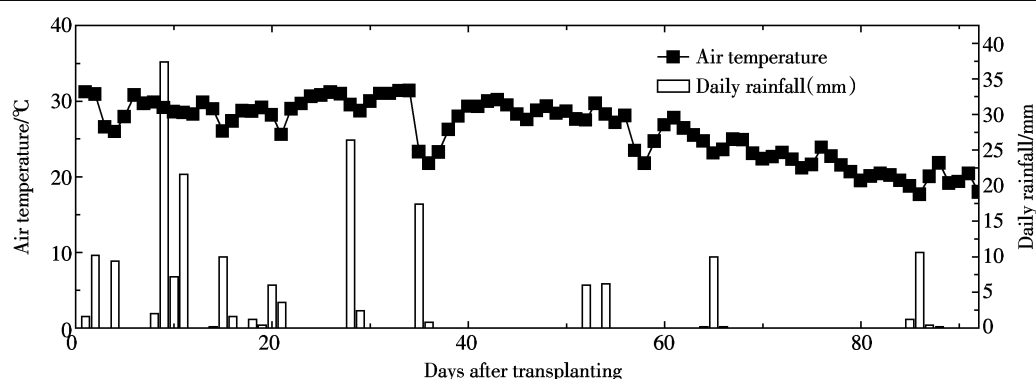


图 2 晚稻生育期日平均温度和日降雨量变化图

Figure 2 The dynamic of air temperature and daily rainfall during the rice growing period

量分别为纯 N 4.5、6.75 g·m⁻²。生育期内施用除草剂和有机磷农药去除杂草和控制病虫害,旱作处理辅以人工除草。水稻品种为中选 10 号,移栽密度 18 穴·m⁻²,每穴 2~3 株。

1.3 测定指标与方法

本研究的主要测定指标均在 2009 年晚稻生长季进行,测定指标及方法如下。

1.3.1 稻田甲烷排放量的测定

采用密闭箱-气相色谱法测定稻田甲烷排放通量。采样箱由 PVC 材料制成,规格 50 cm × 50 cm × 50 cm (水稻生长后期用 50 cm × 50 cm × 110 cm 箱体),于水稻栽插前将 PVC 底座(60 cm × 60 cm × 15 cm)固定于土壤中,测定时注水入底槽加以密封,箱体顶部安置小风扇以充分混合箱内气体。根据试验小区处理的重复设置,采用 3 箱体平行采样,采样时间分别为关箱后的 0、5、10、15 min,每次抽样 20 mL,并记录密闭箱内的温度。所有气体采集均在 9:00—11:00 之间完成^[5]。

采用 Agilent 7890D 气相色谱仪分析田间采集的气体样品 CH₄ 排放通量。

CH₄ 的排放通量 F 的计算式为:

$$F = 60H \frac{16 \times 1.013}{8.314 \times (273 + T)} \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为 CH₄ 的排放通量(mg·m⁻²·h⁻¹);常数 60 为时间换算,将分转换为小时; H 为采样箱的有效高度(m); T 为采样时箱内平均气温(°C); dC/dt 为 CH₄ 排放速率(μL·L⁻¹·min⁻¹)^[11]。

1.3.2 水稻产量和生物量的测定

水稻产量在收获前每个小区随机采取 10 株进行考种,小区单打单收,待晒干后称量,得实际产量。

水稻生物量在水稻收获时每个小区随机采取 5

株水稻,分为根、茎鞘、叶和穗 4 部分,105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘至恒重,测定生物量干重。

1.3.3 土壤养分含量的测定

土壤养分含量测定参照鲍士旦编著的《土壤农化分析》^[12]。

1.4 数据分析与统计

数据分析采用 SPSS16.0,采用 Origin8.0 绘制图形,采用 Micro Excel 2003 绘制表格。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖旱作对稻田甲烷排放的影响

3 个处理甲烷排放峰值均出现在水稻移栽后的两到 3 周以内,其中旱作处理的峰值稍偏后(图 3)。出现峰值后稻田甲烷的排放速率迅速下降,并保持在一个较低的水平,直到移栽后的 50 d 以后有个较小的峰值出现,这个峰值远小于移栽后出现的第一个峰值(图 3)。在水稻生育期内,秸秆覆盖旱作稻田甲烷的排放量为 11.12 g·m⁻²,显著高于常规淹水稻田的 7.78 g·m⁻² 和无覆盖旱作稻田的 4.23 g·m⁻²(表 1)。

本研究中,无论是甲烷的平均排放速率、最大排放速率还是生育期的总排放量,秸秆覆盖旱作都显著高于常规淹水,而常规淹水又显著高于无覆盖旱作(图 3,表 1)。这种差异和以前的研究结果基本一致,但本研究中旱作条件下秸秆覆盖还田的甲烷排放量明显低于以往报道的淹水稻田施加秸秆 18.5 g·m⁻² 的最低排放量^[6-7]。无覆盖旱作稻田甲烷的排放量大程度减少,这与以前的研究结果一致^[9-10,13-14]。

2.2 秸秆覆盖旱作对水稻产量、构成因素及生物量累积的影响

如表 2 所示,常规淹水处理的产量最高,为 8.75 t·hm⁻²;其次是秸秆覆盖旱作处理,为 8.60 t·hm⁻²;无

覆盖旱作处理的水稻产量最低,为 $6.78 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。但是覆盖旱作的产量与常规淹水处理没有显著性差异,而二者均显著高于无覆盖旱作处理,这一结果与本试验地连续几年得到的结果一致^[15-16]。造成水稻产量差异的主要构成因子是水稻的干瘪率和千粒重。旱作处理的水稻干瘪率增加,其中无覆盖旱作的空瘪率达 9.88%,显著高于其他两个处理;而旱作处理的水稻千粒重则低于常规淹水处理,其中无覆盖旱作的差异达到显著性,平均低 1.36 g。

秸秆覆盖旱作稻田水稻的生物量在收获时高于常规淹水处理和无覆盖旱作处理,平均单株高 10 g 以上。

2.3 秸秆覆盖旱作对土壤养分的影响

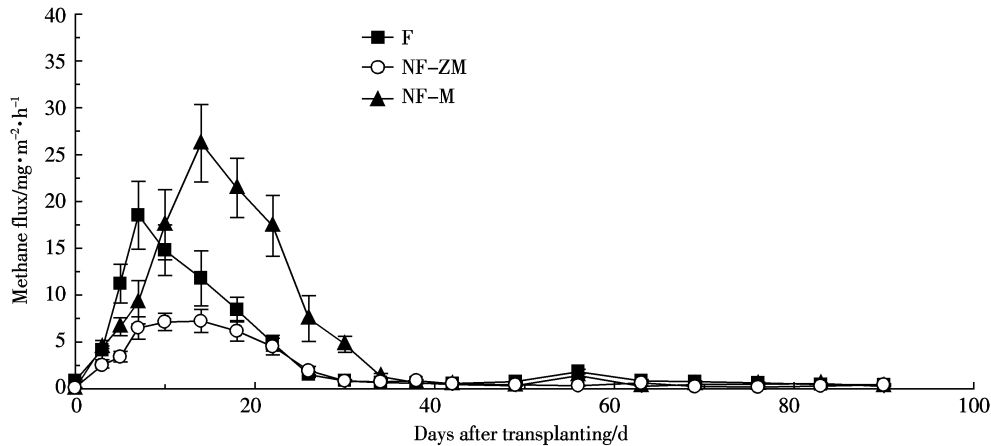
与常规淹水处理相比,秸秆覆盖旱作显著提高了土壤有机质、全氮和速效钾的含量(表 3),这一结果与以往的报道一致^[17]。同时,覆盖旱作土壤的碱解氮和速效磷也高于常规淹水处理,但是差异不显著。与无覆盖旱作相比,覆盖旱作显著提高了土壤的有机质、全氮、碱解氮、速效磷和全钾的含量。秸秆覆盖旱

作与常规淹水栽培模式稻田土壤在有机质和养分含量上所表现出的差异,与薛琳等研究的结果一致^[18],即长期连续覆盖作物秸秆的旱作较常规水作能提高土壤肥力。这表明秸秆覆盖旱作可以提高土壤的有机质及养分含量,对维持土壤的养分平衡,实现农业的可持续性有重要作用。

3 讨论

3.1 秸秆覆盖旱作稻田甲烷排放规律

本研究中 3 个处理稻田甲烷排放峰值均出现在水稻移栽后的两到 3 周以内,其中旱作处理的峰值稍偏后;在达到峰值后稻田甲烷的排放速率迅速下降,并持续保持在一个较低的水平。造成这一现象的原因可能是:(1) 水稻移栽前的耕翻和移栽等扰动过程加速了土壤中有机质的分解转化,为甲烷的产生提供了充足的底物。(2)移栽时的淹水环境使土壤的氧化还原电位迅速下降,而较低的氧化还原电位也有利于甲烷的产生^[19]。(3)稻田中的甲烷产生菌在合适的环境中迅速恢复活性,加速了甲烷的产生^[20]。(4)土壤中的



The vertical bars represent the standard deviation of the means(n=3)

图 3 不同水管理稻田甲烷排放速率季节变化图

Figure 3 The dynamic of methane emission rate of different water management treatment

表 1 不同处理甲烷排放参数

Table 1 Methane emission parameters of different treatments

指标 Parameters	常规淹水(F)	无覆盖旱作(NF-ZM)	秸秆覆盖旱作(NF-M)
甲烷平均排放速率 Mean methane emission rate/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	$3.04 \pm 1.25\text{b}$	$1.87 \pm 0.58\text{c}$	$4.35 \pm 1.81\text{a}$
最大甲烷排放速率 Maximum methane emission rate/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	$18.41 \pm 5.64\text{b}$	$12.49 \pm 5.50\text{c}$	$26.44 \pm 7.29\text{a}$
生育期甲烷排放总量 Total methane emission/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	$7.78 \pm 3.56\text{b}$	$4.23 \pm 1.86\text{c}$	$11.12 \pm 3.73\text{a}$
处理效应(以 F 为对照)Treatment effect(compared to F)		-46%	+43%

注:不同字母代表不同处理间差异达到显著性($P < 0.05$),下同。

Note: Different letters indicate statistical significance among different treatments at the $P = 0.05$ level (Duncan's method), value: Mean $\pm$ S.E, the same below.

表 2 覆盖旱作对水稻产量及构成因素的影响

Table 2 Effect of different treatments on rice yield and their components

指标 Parameter	常规淹水(F)	无覆盖旱作(NF-ZM)	秸秆覆盖旱作(NF-M)
总粒数 Total seed number/hill ⁻¹	2456.09±80.88b	2466.27±89.18b	2653.27±110.04a
空瘪率 Spikelet sterility/%	5.61±0.57b	9.88±0.86a	6.54±0.78b
千粒重 1000 grain weight/g	25.24±0.13a	23.88±0.29b	24.86±0.31a
穗长 Panicle length/cm	20.99±0.12b	21.64±0.26a	21.65±0.23a
有效穗 Effective panicle/m ⁻²	233±19a	220±19a	246±23a
产量 Yield/t·hm ⁻²	8.75±0.46a	6.78±0.68b	8.60±0.17a
生物量 Biomass/g·hill ⁻¹	112.87±8.25a	112.52±6.05a	123.48±7.25a

表 3 晚稻收获后不同处理土壤有机质和养分含量的比较

Table 3 Comparison of soil organic matter and nutrient contents of different treatments after rice harvest

处理 Treatments	土壤有机质 SOM/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	碱解氮 AH-N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Olsen-P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹
常规淹水 F	28.64±0.11b	1.54±0.01b	149.14±8.43a	20.95±2.37ab	32.63±1.92b
无覆盖旱作 NF-ZM	27.37±0.66c	1.52±0.01b	129.14±8.51b	19.63±0.49b	32.03±0.83b
秸秆覆盖旱作 NF-M	29.49±0.20a	1.60±0.03a	155.86±1.01a	25.73±2.64a	37.83±2.97a

易利用的有机质在水稻生长前期被迅速利用和分解,造成甲烷产生的底物减少,造成甲烷的产生量降低,在水稻的生长中甲烷的排放速率较低,而后期大量的根系分泌物和新鲜植株残体,为甲烷的产生提供了新的底物,因而使得在水稻的生长中后期有一个新的排放峰出现。

本研究中,秸秆覆盖旱作稻田的甲烷排放量显著高于常规淹水;虽然本研究没有设置淹水状况下的秸秆覆盖还田处理,无法直接比较秸秆覆盖旱作和淹水稻田秸秆覆盖条件下甲烷排放的差异,但是从 Ma 等报道的淹水稻田秸秆表层(0~10 cm)混施、秸秆开沟填埋、秸秆条带覆盖等方式的甲烷排放量(分别为:27.2、28.1 g·m⁻²和 18.5 g·m⁻²)来看,秸秆覆盖旱作稻田的甲烷排放量要低于淹水状况下的秸秆还田模式。造成这种现象的原因可能有:(1) 秸秆覆盖减少了水分的损失,保持了土壤的还原性,维持了甲烷产生的环境条件,而水分含量是影响甲烷产生的重要因素,大量的研究结果也显示秸秆覆盖可以较好的保持土壤的水分^[1,3-4]。(2)秸秆向土壤中提供了大量的新鲜有机质,这为甲烷的产生提供了充足的反应底物;有机质是甲烷产生的反应底物,因而有机质含量的增加势必会增加甲烷的产生和排放。(3)秸秆的腐解使得土壤的氧化还原电位迅速下降,造成了利于甲烷产生的环境;一般认为只有氧化还原电位低于-220 mV 时才会有甲烷的产生,因而秸秆腐解对氧化还原电位的降低也为甲烷的迅速产生提供了条件^[9]。(4)旱作使稻田表层土壤的通气性增强水分含量下降,氧化还原电

位上升不利于甲烷的产生,使得后期的甲烷排放速率下降,排放量减少^[21]。(5)秸秆的直接表层覆盖,使得秸秆直接暴露于更多的阳光之下,在光照和自生光能微生物的生长限制了甲烷的产生^[6]。Ma 等的研究表明,直接的秸秆表层覆盖还田比其他的秸秆还田方式甲烷排放量明显降低^[6-7]。

综合上面的原因可知,覆盖旱作虽比常规淹水稻田的甲烷排放量增加,但是明显低于淹水模式下秸秆还田的甲烷排放量^[5-7]。

3.2 秸秆覆盖旱作稻田水稻产量效应

本研究中,旱作处理的水稻干瘪率高于淹水处理,而千粒重则低于常规淹水处理,其中无覆盖旱作处理的差异均达到显著性。这也是造成旱作产量低于淹水耕作的主要原因。有报道认为水稻生长后期缺水将严重影响水稻籽粒的发育,容易造成瘪粒增加,千粒重下降等现象^[22]。因而在水稻的生长后期合理管理水分,可能会减轻旱作水稻带来的减产影响。覆盖旱作的水稻总粒数显著高于常规淹水处理和无覆盖旱作处理,同时也可以减轻缺水对千粒重和干瘪率的影响,这也是导致其最终产量与常规淹水处理基本一致的主要原因。覆盖旱作在水稻生长后期对生物量累积的促进作用,使得植株有更多的养分和能量用来进行生殖生长,因而水稻的总粒数增加,弥补了产量在千粒重和干瘪率方面的损失。因此,秸秆覆盖旱作在节水的同时,也可减轻缺水对水稻生长的影响^[1,3-4]。

本研究结果也表明:秸秆还田可以提高土壤的养分,这也将促进作物的生长^[23]。本研究中,秸秆覆盖旱

作水稻的生物量高于常规淹水和无秸秆覆盖旱作,增加了作物固碳,这也与秸秆还田可以提高植株生物量累积的报道一致^[24]。

3.3 秸秆覆盖旱作水稻栽培模式的实践意义

从以上的结果可以看出:秸秆覆盖旱作是一种值得推广的水稻栽培模式,尤其在水资源短缺的地区。主要的原因如下:(1) 秸秆覆盖旱作可以大幅减少水分的使用量,Qin 等^[4]报道认为秸秆覆盖旱作可以减少水分消耗量达 53.4%~63.5%,同时秸秆覆盖旱作也可缓解水分短缺对水稻生长的影响。(2) 秸秆覆盖旱作在减少水资源消耗的同时对水稻的产量没有明显的影响(表 2),这对当今世界粮食需求越来越多至关重要^[3-4]。(3) 秸秆覆盖旱作稻田水稻的生物量累积量显著增加,这也增加了对碳的固定量(表 2)。(4) 秸秆覆盖旱作中添加的秸秆可以作为一种有机肥料在增加土壤有机质含量的同时还可以明显提高土壤中 N 素的含量(表 3),保持土壤养分的平衡^[25-26]。(5) 秸秆覆盖旱作虽然大幅度增加了稻田甲烷的排放量(图 3,表 1),但是这种秸秆直接还田的栽培模式避免了秸秆直接焚烧带来的环境污染和营养物质的损失,有报道称:秸秆的直接焚烧在向大气中排放大量的 CO₂ 的同时也会伴随着一定量的甲烷的排放^[27-29],相比于其他的秸秆管理模式直接还田仍然是一种经济易操作的管理方式。

综合以上因素,秸秆覆盖旱作在保证水稻的产量,保持土壤中有机碳的含量,实现农业生产的可持续性方面也有一定的实际意义。水资源短缺的地区,秸秆覆盖旱作是一种值得考虑的水稻栽培模式;同时秸秆覆盖旱作还田也是一种值得推广的稻田秸秆管理技术。

4 结论

与传统淹水稻田相比,秸秆覆盖旱作在一定程度上增加了稻田甲烷的排放量;但是秸秆覆盖旱作可以维持水稻的较高产量,并能提高水稻的生物量累积。同时,秸秆覆盖旱作还可以提高土壤的有机质含量,提高或维持土壤养分,避免其他秸秆处理方式可能带来的环境危害,对实现农业的可持续性有明显的作。因此,在水资源季节性短缺的地区,秸秆覆盖旱作是一种值得重视的替代传统淹水种植的水稻栽培模式。同样,秸秆覆盖旱作还田也是一种值得推广的稻田秸秆管理技术。

参考文献:

- [1] 梁永超,胡 锋,杨茂成,等. 水稻覆膜旱作高产节水机理研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32:26-32.
LIANG Yong-chao, HU Feng, YANG Mao-cheng, et al. Mechanisms of high yield and irrigation water use efficiency of rice in plastic film mulched dryland[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 1999, 32:26-32.
- [2] 金千瑜,欧阳由南. 我国发展节水型稻的若干问题探讨[J]. 中国稻米, 1999(1):9-12.
JIN Qian-yu, OUYANG You-nan. The discussion of certain questions of the development of water-saving rice in China[J]. *Chinese Rice*, 1999(1):9-12.
- [3] Huang X Y, Xu Y C, Shen Q R, et al. Water use efficiency of rice crop cultivated under water logged and aerobic soil mulched with different materials[J]. *J Soil Water Conserv*, 2003, 17:140-143.
- [4] Qin J, Hu F, Zhang B, et al. Role of straw mulching in non-continuously flooded rice cultivation[J]. *Agric Water Manage*, 2006, 83:252-260.
- [5] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2005, 19, GB2021.
- [6] Ma J, Xu H, Yagi K, et al. Methane emission from paddy soils as affected by wheat straw returning mode[J]. *Plant Soil*, 2008, 313:167-174.
- [7] Ma J, Ma E D, Xu H, et al. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields[J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41:1022-1028.
- [8] Wassmann R, Papen H, Rennenberg H. Methane emission from rice paddies and possible mitigation strategies[J]. *Chemosphere*, 1993, 26:201-217.
- [9] Tyagi L, Kumari B, Singh S N. Water management: A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields[J]. *Sci Total Environ*, 2010, 408:1085-1090.
- [10] Li C, Qiu J, Frohling S, et al. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980-2000[J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(20):1972-1975.
- [11] 李道西. 控制灌溉稻田甲烷排放规律及其影响机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
LI Dao-xi. Regularity of methane emission from paddy fields and its influence methanism under rice controlled irrigation [D]. Nanjing: Hehai University, Nanjing, 2007.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] Adhya T K, Bharati K, Mohanty S R, et al. Methane emission from rice fields at Cuttack, India[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2000, 58:95-105.
- [14] Guo J P, Zhou C D. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142:270-277.
- [15] 秦江涛. 水稻不同栽培模式的节水效应、生产力特征及土壤微生物学性状研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.

- QIN Jiang-tao. Water use efficiency, crop productivity and soil microbial characteristics under different water-saving rice cultivation systems[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [16] 王 栋. 覆草旱作条件下稻田土壤肥力性状、碳氮动态及水稻生产力特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- WANG Dong. Soil fertility, dynamics of soil organic carbon and nitrogen, and rice productivity under non-flooded rice cultivation with straw mulching[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [17] Rasmussen P E, Collins H P. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residues on soil organic matter in temperate semi-arid regions[J]. *Advanced Agronomy*, 1991, 45: 93–134.
- [18] 薛 琳. 长期不同种植方式稻麦轮作系统中土壤养分和作物营养特性的互作研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- XUE Lin. Interaction between soil nutrient supply and crop nutritional characters in long-term different cultivation rice-barley cropping systems[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [19] Yu K, Patrick W H. Redox window with minimum global warming potential contribution from rice soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 2086–2091.
- [20] Watanabe T, Kimura M, Asakawa S. Dynamics of methanogenic archaeal communities based on rRNA analysis and their relation to methanogenic activity in Japanese paddy field soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, 39: 2877–2887.
- [21] Corton T M, Bajita F S, Grospe R R, et al. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in Central Luzon (Philippines)[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2000, 58: 37–53.
- [22] 杨建昌, 王志琴, 刘立军, 等. 旱种水稻生育特性与产量形成的研究[J]. 作物学报, 2002(28): 1–17.
- YANG Jian-chang, WANG Zhi-qin, LIU Li-jun, et al. Growth and development characteristics and yield formation of dry-cultivated rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002(28): 1–17.
- [23] Mandal K G, Misra A K, Hati K M, et al. Rice residue management options and effects on soil properties and crop productivity[J]. *Food, Agriculture & Environment*, 2004, 2(1): 224–231.
- [24] Singh Y, Singh B, Ladha J K, et al. Effects of residue decomposition on productivity and soil fertility in rice-wheat rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 854–864.
- [25] Witt C, Cassman K G, Olk D C, et al. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems[J]. *Plant Soil*, 2000, 225: 263–278.
- [26] Anthony W, Graeme B, Yothin K, et al. Managing crop residues, fertilizers and leaf litters to improve soil C, nutrient balances, and the grain yield of rice and wheat cropping systems in Thailand and Australia[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2003, 100: 251–263.
- [27] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2001, 15(4): 955–966.
- [28] Miura Y, Kanno T. Emissions of trace gases (CO₂, CO, CH₄ and N₂O) resulting from rice straw burning[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1997, 43: 849–854.
- [29] Streets D G, Yarber K F, Woo J H, et al. Biomass burning in Asia: annual and seasonal estimates and atmospheric emissions[J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 2003, 17(4): GB1099.