

成 臣, 杨秀霞, 汪建军, 等. 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.
CHENG Chen, YANG Xiu-xia, WANG Jian-jun, et al. Effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions under crop residue incorporation in double rice-cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 186–195.

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

成 臣, 杨秀霞, 汪建军, 程慧煌, 罗 亢, 曾勇军, 石庆华, 商庆银*

(江西农业大学双季稻现代化生产协同创新中心/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 南昌 330045)

摘 要:为研究秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻生长及稻田温室气体排放的影响,以双季稻为对象,通过连续3年田间定位试验,系统分析了秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻生长和稻田综合温室效应的影响。试验设置持续淹水(F)、中期烤田(F-D-F)和间歇灌溉(F-D-F-M)共3种处理。结果表明:与F处理相比,F-D-F和F-D-F-M处理早稻平均产量分别增加9.8%和2.7%,晚稻平均产量分别增加4.8%和2.0%,其中F-D-F早稻产量显著高于F-D-F-M处理。与F处理相比,F-D-F和F-D-F-M处理早稻平均每穗粒数分别增加12.5%和5.7%,晚稻平均每穗粒数分别增加9.7%和3.1%。在双季稻系统3年轮作周期中,F、F-D-F和F-D-F-M处理 CH_4 周年累积排放量范围分别为678.2~988.4、322.6~661.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和208.3~520.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, N_2O 周年累积排放量分别为5.86~12.64、4.25~11.24 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和9.14~14.91 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。与F处理相比,F-D-F和F-D-F-M处理全球增温潜势分别显著降低31.5%~44.9%和38.2%~53.4%,温室气体排放强度分别显著降低36.2%~48.7%和38.8%~54.6%。因此,在南方双季稻区,与持续淹水处理相比,秸秆还田条件下中期烤田和间歇灌溉处理都可以实现水稻高产和稻田温室气体减排的目标。

关键词:双季稻;秸秆还田;灌溉方式;温室气体;产量

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)01-0186-10 doi:10.11654/jaes.2017-0893

Effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions under crop residue incorporation in double rice-cropping systems

CHENG Chen, YANG Xiu-xia, WANG Jian-jun, CHENG Hui-huang, LUO Kang, ZENG Yong-jun, SHI Qing-hua, SHANG Qing-yin*
(Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Nanchang 330045, China)

Abstract: As the main by-product of crop production, crop straw contains abundant organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium, and other nutrients. As a popular management practice in double rice-cropping systems of China, straw incorporation can increase crop yield by improving soil physical and chemical properties and promoting soil quality and nutrient cycling. However, straw incorporation would increase greenhouse gas emissions from rice paddies; therefore, a feasible management practice should be sought to mitigate the global warming potential from CH_4 and N_2O emissions. Appropriate water management is an effective way to reduce greenhouse gas emissions, but the effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions under crop residue incorporation is still unclear. A field ex-

收稿日期:2017-06-22 录用日期:2017-09-01

作者简介:成 臣(1990—),男,江西德安人,博士研究生,从事水稻高产理论与技术研究。E-mail:chengchenxm@163.com

*通信作者:商庆银 E-mail:sqyt@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31460540,31601833);江西省教育厅青年科学基金项目(GJJ14306)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31460540, 31601833); Jiangxi Provincial Education Department Youth Science Fund Project(GJJ14306)

periment was conducted in 2013—2015 to determine the effect of water regimes on rice yield and greenhouse effect under crop residue incorporation in typical double rice-cropping systems. The three irrigation methods included continuous flooding (F), flooding-midseason drainage-reflooding (F-D-F), and flooding-midseason drainage-reflooding-moist intermittent irrigation (F-D-F-M) in the rice growing seasons. Rice straw was simultaneously chopped into 5 cm pieces by using a combine harvester. The results showed that, compared with that of the F plots, the grain yield in the F-D-F and F-D-F-M plots was increased by 9.8% and 2.7% in the early-rice season and by 4.8% and 2.0% in the late-rice season, respectively. The grain yield in the F-D-F plots was significantly higher than that in the F-D-F-M plots in the early-rice season. Compared with that of the F plots, the average spikelet number per panicle in the F-D-F and F-D-F-M plots was increased by 12.5% and 5.7% in the early-rice season and by 9.7% and 3.1% in the late-rice season, respectively. Across the three-year rotation cycle in the double rice-cropping system, the annual range of CH_4 emission in the F, F-D-F, and F-D-F-M plots was 678.2~988.4, 322.6~661.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and 208.3~520.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and that of N_2O emissions of the F, F-D-F, and F-D-F-M plots was 5.86~12.64, 4.25~11.24 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and 9.14~14.91 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. Compared with that of the F plots, the global warming potential in the F-D-F and F-D-F-M plots was remarkably reduced by 31.5%~44.9% and 38.2%~53.4%, respectively. The greenhouse gas emission intensity in the F-D-F and F-D-F-M plots was remarkably reduced by 36.2%~48.7% and 38.8%~54.6%, respectively. Therefore, compared with continuous waterlogging, both of midseason drainage and intermittent irrigation can increase rice yield and mitigate greenhouse gas emissions under crop residue incorporation in the double rice-cropping system.

Keywords: double rice-cropping systems; straw return; irrigation methods; greenhouse gases; grain yield

近百年来,全球气候正在发生以变暖为主要特征的显著变化,人类社会生产生活引起的温室气体排放是全球气候变暖的主要原因^[1]。农田作为陆地的主要组成部分,它是温室气体重要排放源。据估计,全球每年农业温室气体排放量为 5.1~6.1 Pg CO_2 -equivalents (CO_2 -eq),其中农业 CH_4 和 N_2O 排放量分别占全球排放总量的 60%和 50%^[2]。因此,如何减缓农田温室气体排放受到各国政府和农业环境科学家的广泛关注。秸秆还田可以改善农田土壤理化性状,提高土壤质量和养分循环利用效率,增加作物产量,对我国农业可持续发展具有重要作用^[3]。然而诸多研究表明,在淹水条件下秸秆还田会导致稻田 CH_4 大量排放,而稻田 CH_4 和 N_2O 排放又存在互为消长的关系^[4-6]。为此,在评价秸秆还田生产效益的同时,不仅需要考虑如何实现稻田温室气体减排,还需综合评估各种温室气体所产生的综合温室效应。

南方稻区是我国最重要的粮食主产区之一,对保障我国粮食安全起着不可替代的作用。双季稻种植是我国南方稻区重要的农业生产模式,秸秆资源丰富且相对集中。近年来,以秸秆还田为核心内容的保护性耕作技术在南方稻区被广泛推广应用^[7]。但在秸秆利用过程中存在一系列的问题,通过何种方式合理利用秸秆资源,降低秸秆还田对作物生长和温室效应的负面影响,是目前南方双季稻生产最重要问题之一。在秸秆还田过程中,不同利用方式对秸秆腐解、稻田温室气体排放及水稻生产发育的影响不同^[4]。大量研究表明秸秆配施化肥^[8]、腐解剂^[9]、石灰^[10]、生物炭^[11]等可

以改善秸秆利用。不同灌溉方式是影响稻田 CH_4 排放和水稻产量的又一重要农田管理措施^[12],同时我国还是水资源严重短缺的国家,因此,在双季稻生产中如何优化灌溉方式将对我国南方稻区秸秆及水资源合理利用具有重要意义。然而目前在秸秆还田条件下开展的灌溉方式研究并不多,能否通过改变灌溉方式同步实现水稻高产与温室气体减排还不够明确。为此,本研究以双季稻为对象,通过田间定位试验,系统分析了秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻产量、稻田 CH_4 和 N_2O 排放以及综合温室效应的影响,以期采取适宜灌溉措施,减缓稻田温室气体排放提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验地点位于江西省进贤县温圳镇杨溪村(116°5'28"E, 28°20'10"N)。供试土壤为第四纪红色粘土发育的潴育型水稻土,属酸性简育水耕人为土。年均温度为 17.5℃,全年 1 月平均温度最低,为 5℃;7 月平均温度最高,为 29℃;日照时数平均为 1900~2000 h;年均降雨量为 1587 mm,水资源丰富。试验前耕层土壤(0~20 cm)有机碳含量为 21.8 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮为 3.74 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为 98.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷为 24.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 pH 值为 5.31。

1.2 试验设计

试验时间为 2013 年 3 月至 2016 年 3 月。试验设 3 种灌溉方式:①持续淹水(F),插秧后田间一直保持

淹水状态,在收获前1~2周排水落干;②中期烤田(F-D-F),插秧后淹水,在分蘖末期烤田,复水后保持淹水状态至收获前1~2周;③间歇灌溉(F-D-F-M),插秧后淹水,在分蘖末期烤田,复水后采用干湿交替的灌溉方式至收获前1~2周。每个处理分别设3个小区,各小区面积均为54 m²,所有小区随机区组排列。各处理水层深度实际情况见图1(以2014年为例)。本试验每年种植制度为早稻-晚稻-紫云英,早稻和晚稻移栽前分别采用旋耕机耕地4遍,冬季采用免耕种植方式。其他管理措施采用当地常规种植方式。

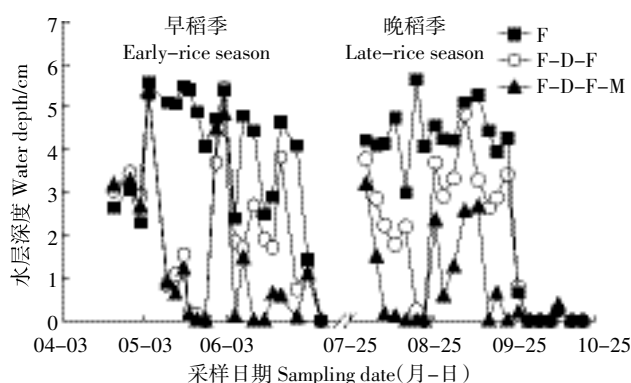


图1 2014年水稻生长季田间水层深度变化

Figure 1 Temporal variation of water depth during the double rice-growing seasons in 2014

所有小区均采用双季稻秸秆全量还田和冬种紫云英的保护性耕作制度。早稻和晚稻供试品种分别为中嘉早17和五丰优T025。紫云英在晚稻收割前25 d播种,播种量为30~37.5 kg·hm⁻²。秸秆采用全量还田方式,水稻秸秆由久保田半喂入式联合收割机在收割水稻时同步进行粉碎,其切割长度为5 cm左右。晚稻收获后,各小区水稻秸秆粉碎施入相应小区表层作为紫云英的覆盖物,次年紫云英鲜草按三等分与晚稻秸秆共同耕翻至相应小区,作早稻基肥。早稻收获后,将各小区水稻秸秆粉碎施入相应小区中,作晚稻基肥。本试验施用氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾,分别以N、P₂O₅和K₂O计,早稻季三者用量分别为150、75 kg·hm⁻²和135 kg·hm⁻²,其中氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=5:2:3施用,磷肥作基肥一次性施用,钾肥按基肥:穗肥=7:3施用。晚稻季用量分别为180、75 kg·hm⁻²和150 kg·hm⁻²,其中氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=4:2:4施用,磷肥和钾肥施肥比例同早稻。

1.3 样品获取与测定

1.3.1 产量及其构成因素

在成熟期每处理调查3个重复,每重复调查100蔸水稻的有效穗数。按平均有效穗选取考种样,每小区分别取样5蔸,调查每穗粒数、结实率及千粒重。每小区选取6 m²进行实际测产。

1.3.2 干物质生产

抽穗期和成熟期按照平均有效穗法取样,每小区取5蔸,将水稻植株根减除、清洗,置于烘箱内105℃杀青15 min后,将烘箱温度调至80℃至样品恒重。

1.3.3 CH₄和N₂O的采集与测定

CH₄和N₂O采用静态箱法采集。静态箱采用不锈钢板制成,规格为50 cm×50 cm×50 cm(当水稻生长高度超过50 cm时增加一个同规格双向开口的箱体,即高度变为100 cm)。每小区固定采样底座1个,底座上部有5 cm深的凹槽,测定时加水密封。水稻生长季(早稻和晚稻)采样间隔为3~4 d,紫云英生长季(冬季)一般为15 d。采气时间为上午9:00—11:00,CH₄和N₂O气体浓度采用Agilent 7890b气相色谱测定,CH₄检测器为FID,N₂O检测器为ECD。CH₄和N₂O采集和测定方法参考文献[13]。CH₄和N₂O气体排放通量计算公式为:

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

式中: F 为气体排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹或μg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为标准状态下气体的密度,kg·m⁻³; h 为采样箱的净高度,m; dc/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化,10⁻⁶ mol·mol⁻¹·min⁻¹或10⁻⁹ mol·mol⁻¹·min⁻¹; T 为采样过程中采样箱内的平均温度,℃。

1.4 数据计算与统计方法

1.4.1 稻田CH₄和N₂O周年累积排放量计算公式为:

$$T_n = \sum_{i=1}^n F_i \times D_i \quad (2)$$

式中: T_n 为CH₄或N₂O周年累积排放量,kg·hm⁻²或kg N·hm⁻²; F_i 为两次采样间CH₄、N₂O日排放通量平均值,mg·m⁻²·h⁻¹或μg·m⁻²·h⁻¹; D_i 为两次采样间隔天数,d。

1.4.2 全球增温潜势和温室气体强度的计算

本研究估算了2013—2015年3个处理的CH₄和N₂O排放的全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)和温室气体排放强度(Greenhouse Gas Intensity, GHGI)。GWP是将气体和相同质量CO₂相比较下,造成全球暖化的相对能力,其中100年CH₄的GWP为25,N₂O的GWP为298^[14]。GWP(kg CO₂-eq·hm⁻²·a⁻¹)计算公式如下:

$$GWP = 25 \times CH_4 + 298 \times N_2O \quad (3)$$

GHGI 表示农业中生产单位产量的粮食对气候的潜在影响($\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

$$\text{GHGI}=\text{GWP}/Y \quad (4)$$

式中: Y 为周年产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.4.3 结实率及收获指数

结实率是指禾谷类作物饱满谷粒占颖花总数的百分率。

收获指数是作物收获时经济产量(籽粒、果实等)与生物产量之比,又名经济系数。就水稻的收获指数而言,其为水稻产量与成熟期总干物质的比值。

1.4.4 数据处理

试验数据均采用 Microsoft excel 2010 和 DPS 7.05 软件进行分析和处理,制图采用 Origin 9.0 软件,用 LSD 法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 产量及温室气体排放的年际差异分析

方差分析(表 1)表明,周年产量、周年 CH_4 排放、周年 N_2O 排放、全球增温潜势和温室气体强度在不同年份和不同灌溉处理间均呈极显著差异,在年份与灌溉方式互作上均表现为差异不显著。

2.2 产量及其构成因素

从双季稻周年产量年际变化来看,F、F-D-F 和 F-D-F-M 处理 2014 年周年产量比 2013 年分别增加 5.8%、5.2%和 4.5%,而 2015 年周年产量与 2014 年相比变化波动较小。其中产量呈增加趋势的主要原因来自晚稻产量的逐渐增加。与 F 处理相比,2013—2015 年 F-D-F 和 F-D-F-M 处理早稻平均产量分别增加 9.8%和 2.7%,晚稻平均产量分别增加 4.8%和 2.0%,其中 F-D-F 早晚和晚稻产量均显著增加(2013 年晚稻除外),而 F 和 F-D-F-M 之间早稻和晚稻产量差异均未达到显著水平(2015 年晚稻除外)(表 2)。

与 F 处理相比,2013—2015 年 F-D-F 处理早稻

每穗平均粒数增加 12.5%,二者差异显著(2014 年除外);F-D-F-M 处理每穗平均粒数也增加 5.7%,显著高于 F 处理(2013 年除外)。与 F 处理相比,2013—2015 年 F-D-F 和 F-D-F-M 处理晚稻每穗平均粒数分别增加 9.7%和 3.1%,其中 F-D-F 处理显著高于 F 处理(2013 年除外)。不同灌溉方式有效穗数、结实率和千粒重变化规律不明显(表 2)。

2.3 干物质生产

与 F 处理相比,F-D-F 处理早稻抽穗期干物质质量增加 3.3%~8.5%,而成熟期干物质质量降低 1.0%~2.4%;与 F 处理相比,F-D-F-M 处理抽穗期和成熟期干物质质量分别降低 1.8%~2.5%和 5.4%~8.5%(表 3)。除 2014 年抽穗期外,与 F 处理相比,F-D-F 处理晚稻抽穗期和成熟期干物质质量分别降低 8.8%~11.0%和 0.7%~2.9%;与 F 处理相比,F-D-F-M 处理抽穗期和成熟期干物质质量也分别降低 6.9%~15.0%和 1.3%~7.7%。方差分析表明,不同灌溉方式在不同年份、不同季节间抽穗期和成熟期干物质质量均无显著性差异。

2.4 收获指数

不同灌溉方式对收获指数具有显著影响(图 2),不同年份和季节各处理间变化趋势一致。与 F 处理相比,F-D-F 和 F-D-F-M 处理收获指数分别增加 3.6%~13.2%和 2.4%~10.9%,其中早稻 F-D-F 和 F-D-F-M 处理收获指数显著高于 F 处理。

2.5 CH_4 和 N_2O 周年累积排放量

在双季稻系统 3 年轮作周期中,F、F-D-F 和 F-D-F-M 处理 CH_4 周年累积排放量分别为 678.2~988.4、322.6~661.7、208.3~520.6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中各处理 CH_4 周年累积排放量随定位年限均呈增加趋势(图 3A)。与 F 处理相比,F-D-F 和 F-D-F-M 处理 CH_4 周年累积排放量分别降低 33.1%~52.4%和 46.3%~69.3%。方差分析表明,与 F 处理相比,F-D-F 和 F-D-F-M 处理 CH_4 周年累积排放量均显著降低,

表 1 南方双季稻田温室气体排放和产量在不同年份和灌溉方式的方差分析(F 值)

Table 1 A two-way ANOVA for the effects of different irrigation methods and year on greenhouse gas emissions and grain yields in double rice-cropping systems(F -value)

变异来源 Source of variation	自由度 df	周年产量 Annual yield	周年 CH_4 排放 Annual CH_4 emissions	周年 N_2O 排放 Annual N_2O emissions	GWP	GHGI	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
年份 Year	2	22.56**	42.55**	58.83**	25.07**	17.01**	3.638	6.23
灌溉 Irrigation	2	33.35**	85.20**	18.19**	72.76**	76.68**	3.638	6.23
年份×灌溉方式 Year × Irrigation	4	0.56ns	0.28ns	1.20ns	0.47ns	0.61ns	3.01	4.77

注:** 表示在 0.01 水平上差异显著,ns 表示差异不显著。

Note: ** indicates significant difference at the 0.01 level. ns: No significance.

表 2 秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻产量及其构成因素的影响

Table 2 The influence of different irrigation methods on the grain yield and its components under crop residue incorporated in double rice-cropping systems

季节 Season	年份 Years	处理 Treatment	有效穗数 Productive panicle number/ 10 ⁴ hm ⁻²	每穗粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed setting rate/ %	千粒重 1000-grain weight/ g	产量 Actual yield/ t·hm ⁻²
早稻 Early-rice	2013	F	315.8±7.1a	124.5±5.3b	78.4±0.6c	25.8±0.1a	7.76±0.36b
		F-D-F	293.3±8.4b	151.0±7.7a	81.4±0.6b	25.0±0.2b	8.68±0.35a
		F-D-F-M	309.7±6.2a	126.6±8.3b	84.8±1.0a	25.3±0.3b	8.02±0.28ab
	2014	F	315.0±10.4a	109.6±4.0b	79.9±1.9b	27.3±0.2b	7.37±0.11b
		F-D-F	332.1±14.5a	113.8±3.1ab	82.9±1.3a	27.1±0.3b	8.03±0.07a
		F-D-F-M	320.2±11.0a	118.4±3.8a	78.3±1.1b	27.8±0.3a	7.46±0.30b
	2015	F	311.0±7.5a	114.5±3.1b	85.7±1.0a	26.1±0.3a	7.44±0.17b
		F-D-F	326.3±7.2a	127.3±5.7a	81.1±1.5a	25.9±0.1a	8.07±0.19a
		F-D-F-M	315.8±3.6a	123.4±3.3a	82.2±3.5a	25.8±0.1a	7.71±0.15b
晚稻 Late-rice	2013	F	382.3±9.4a	128.6±4.1a	74.3±2.3b	24.1±0.2b	7.95±0.16a
		F-D-F	358.3±1.6b	130.3±4.7a	79.9±1.2a	24.7±0.1a	8.18±0.12a
		F-D-F-M	378.7±8.7a	127.3±5.1a	77.0±0.7ab	24.6±0.3a	8.03±0.21a
	2014	F	333.4±13.4a	155.2±8.1b	82.7±1.6ab	24.7±0.4a	9.24±0.18b
		F-D-F	320.5±6.6a	181.6±3.6a	80.3±1.1b	24.1±0.1b	9.70±0.08a
		F-D-F-M	327.8±18.5a	158.3±5.4b	83.0±0.9a	24.8±0.2a	9.31±0.14b
	2015	F	330.2±11.0a	157.7±7.4b	77.5±2.4b	23.6±0.1a	8.98±0.26b
		F-D-F	308.8±7.7b	172.6±3.3a	80.2±2.1ab	23.7±0.1a	9.54±0.10a
		F-D-F-M	305.2±9.5b	169.5±8.2ab	82.8±1.7a	23.5±0.1b	9.36±0.15a

注:表中数据均为“平均值±标准差”;同列不同小写字母表示同一季节不同处理差异达 5%显著水平。下同。

Note: The chart data were "Mean±standard deviation", different lowercase letters in the same column indicate significantly different treatment of the same year at 5%. The same below.

表 3 秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻干物质生产的影响(t·hm⁻²)Table 3 The effect of different irrigation methods on the biomass and harvest indexes in double rice-cropping systems(t·hm⁻²)

季节 Season	处理 Treatment	抽穗期 Heading stage			成熟期 Mature period		
		2013	2014	2015	2013	2014	2015
早稻 Early-rice	F	6.63±0.39a	6.61±0.27a	6.41±0.15a	12.96±0.57a	13.14±0.57a	11.91±0.86a
	F-D-F	7.09±0.80a	7.17±0.11a	6.62±0.31a	12.80±0.57a	13.01±0.42a	11.62±0.70a
	F-D-F-M	6.51±0.06a	6.48±0.32a	6.25±0.17a	11.86±0.37a	12.43±0.57a	11.10±0.40a
晚稻 Late-rice	F	11.40±0.24a	8.45±0.93a	10.69±0.37a	17.34±0.05a	15.02±1.72a	16.36±0.66a
	F-D-F	10.40±0.31a	8.79±0.60a	9.51±0.61a	17.21±1.39a	14.64±1.02a	15.89±0.92a
	F-D-F-M	10.26±1.61a	7.87±0.18a	9.09±0.56a	17.11±0.63a	13.87±0.69a	15.37±0.26a

而 F-D-F 和 F-D-F-M 处理之间无显著性差异。

不同灌溉制度 N₂O 周年累积排放量年际间无明显变化规律,但各处理间趋势一致(图 3B)。在双季稻系统 3 年轮作周期中,F、F-D-F 和 F-D-F-M 处理 N₂O 周年累积排放量分别为 5.86~12.64、4.25~11.24、9.14~14.91 kg N·hm⁻²·a⁻¹。与 F 处理相比,F-D-F 处理 N₂O 周年累积排放量降低 11.1%~27.5%,而 F-D-F-M 处理 N₂O 周年累积排放量增加 10.2%~60.9%。

2.6 全球增温潜势

在双季稻系统 3 年轮作周期中,F、F-D-F 和 F-D-F-M 处理 GWP 分别为 20.7~27.2、11.4~18.7 和 9.7~15.7 t CO₂-eq·hm⁻²·a⁻¹(图 4A)。不同灌溉方式各处理 GWP 均呈增加趋势,其中 F、F-D-F 和 F-D-F-M 处理 2015 年 GWP 比 2013 年分别增加 31.2%、63.0%和 63.1%。方差分析表明,不同水分管理对 GWP 具有显著影响,且不同年份表现规律一致。其

中,F-D-F和F-D-F-M处理GWP分别显著低于F处理31.5%~44.9%和38.2%~53.4%,而F-D-F和F-D-F-M处理之间GWP没有显著差异。

在双季稻系统中,不同灌溉方式稻田GWP的主要贡献来源于CH₄排放,F、F-D-F和F-D-F-M处理CH₄排放贡献率分别为81.5%~92.3%、70.6%~91.4%和53.2%~82.7%(图4B)。与F处理相比,F-D-F和F-D-F-M处理CH₄贡献率分别降低1.0%~13.4%和7.0%~24.6%,其中F-D-F-M处理CH₄贡献率显著低于F处理。

2.7 温室气体排放强度

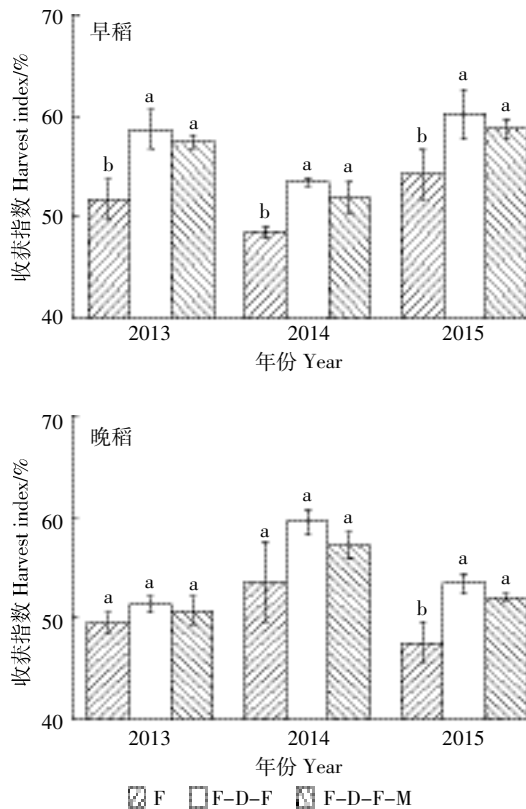
在双季稻系统3年轮作周期中,F、F-D-F和F-D-F-M处理GHGI分别为1.32~1.66、0.68~1.06、0.60~0.92 kg CO₂-eq·kg⁻¹。2013—2015年,不同灌溉方式的GHGI均呈增加趋势,F、F-D-F和F-D-F-M处理分别增加了25.4%、55.8%和53.6%(图5)。与F

处理相比,F-D-F和F-D-F-M处理GHGI分别降低36.2%~48.7%和38.8%~54.6%。方差分析表明,与F处理相比,F-D-F和F-D-F-M处理GHGI均显著降低,而F-D-F和F-D-F-M处理之间没有显著差异。

3 讨论

3.1 秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻产量的影响

在水稻生长发育过程中,灌溉方式通过改变稻田水层深度、土壤温湿度等水稻生长环境,直接或者间接影响水稻生长发育和产量^[15]。本研究表明,与F处理相比,2013—2015年F-D-F和F-D-F-M处理早稻平均产量分别增加9.8%和2.7%,晚稻平均产量分别增加4.8%和2.0%。与F处理相比,F-D-F和F-D-F-M处理有效穗数和总干物质质量没有显著差异,因此每穗粒数增多和收获指数增加是这两种灌溉方式高产的主要原因。这与一些研究结果相似,张彬等^[16]研究表明,不同水分管理间水稻总干物质质量和有效穗



图中不同小写字母表示同一季节不同处理间差异达5%显著水平。下同

Different lowercase letters indicate significantly different treatment of the same year at 5%. The same below

图2 秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻收获指数的影响

Figure 2 The influence of different irrigation methods on the harvest index under crop residue incorporated in double rice-cropping systems

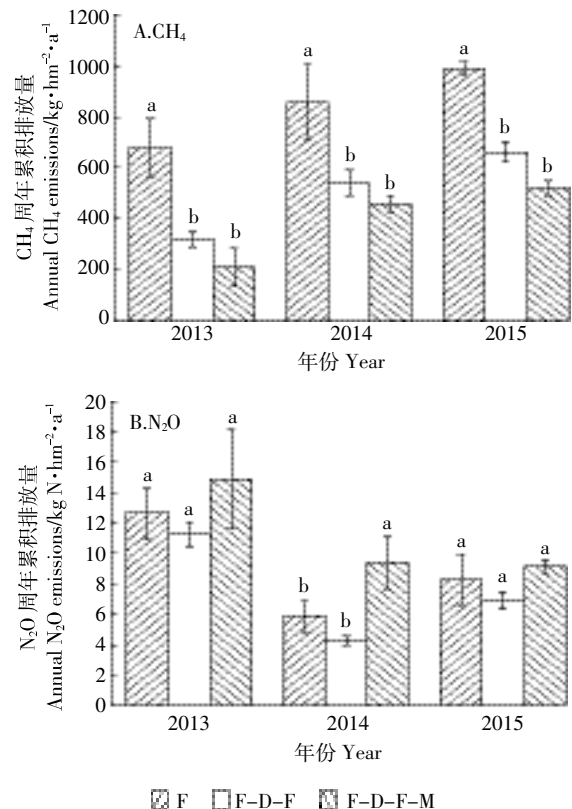


图3 秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻田CH₄和N₂O周年累积排放量的影响

Figure 3 Annual CH₄ and N₂O emissions of different irrigation methods under crop residue incorporated in double rice-cropping systems

数没有显著差异,在物质转运、成穗率和结实率等方面差异达到显著水平,干湿交替处理产量较淹灌和畦灌处理分别增加 9.2%和 5.4%。赵黎明等^[17]的研究也表明,干湿交替和持续淹水处理都具有较高的总干物

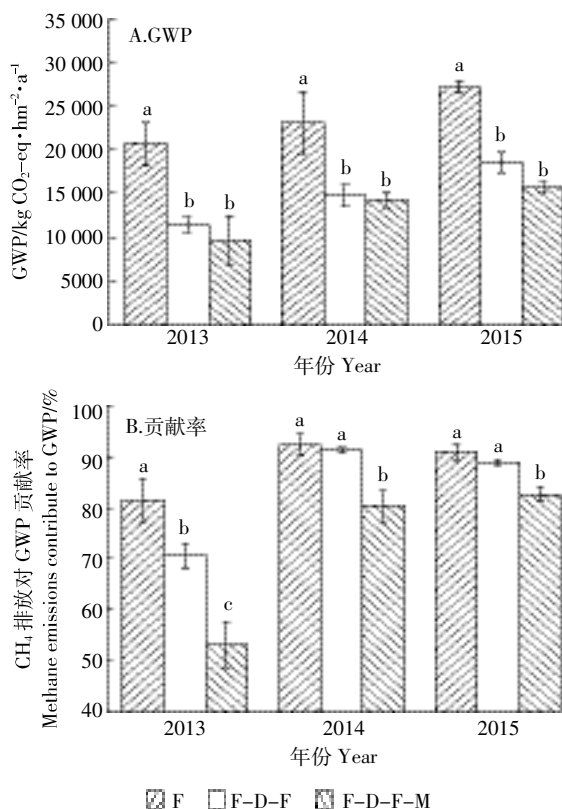


图4 秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻田 GWP 及 CH₄ 排放对其贡献率的影响

Figure 4 The effect of different irrigation methods on the GWP and CH₄ to the contribution rate under crop residue incorporated in double rice-cropping systems

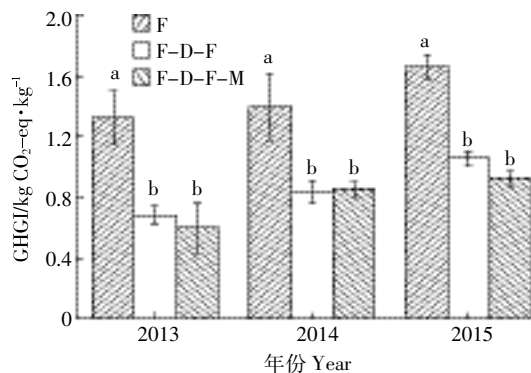


图5 秸秆还田条件下不同灌溉方式对双季稻田 GHGI 的影响

Figure 5 The effect of different irrigation methods on the greenhouse gas emissions intensity (GHGI) under crop residue incorporated in double rice-cropping systems

质量,但节水灌溉处理形成高质量群体,生育后期群体光合生产和物质运转能力强,收获指数提高,从而增加水稻籽粒产量。究其原因,徐芬芬等^[18]研究认为,与常规淹灌相比,间歇灌溉处理水稻根系活力高、生育后期干物质生产能力和氮素吸收与利用能力强,从而产量显著提高。张自常等^[19]研究表明,与习惯水层淹灌相比,干湿交替灌溉和畦沟灌溉提高分蘖成穗率和倒3叶的叶面积比率,剑叶光合速率、根量和根系活力得到提升,增加抽穗期至成熟阶段的干物质积累量,从而显著改善群体质量,增加水稻产量。这些研究说明中期烤田和间歇灌溉等节水灌溉方式加强了干物质积累与转运能力,有效协调“源”的积累和“库”的形成,是其水稻高产主要原因。

本研究还发现,F-D-F-M 处理产量低于 F-D-F 处理。可能是在生育后期土壤干湿交替过程中灌溉的土壤水势较低,严重影响水稻生长发育,从而降低水稻产量^[20-21]。杨生龙等^[22]研究认为,适当节水对产量影响差异不显著,但在节水过度栽培条件下会降低水稻产量。说明在干湿交替灌溉过程中,土壤落干程度的合理控制是获得高产的原因,如何把握土壤适宜干湿程度成为干湿交替灌溉的技术关键。因此,水稻后期干湿交替过程中土壤水势下限与产量的关系还有待进一步研究。

3.2 秸秆还田条件下不同灌溉方式对稻田温室效应的影响

不同灌溉方式对 CH₄ 和 N₂O 排放影响显著,不同灌溉模式能够形成不同的稻田土壤水分状况,水分状况是影响土壤硝化与反硝化过程的最重要因素之一。其中稻田土壤 N₂O 排放主要集中在水分变化剧烈的干湿交替阶段,因而直接影响稻田土壤 N₂O 排放;而稻田 CH₄ 气体排放的差异主要是由于不同灌溉方式下土壤水分含量及水层深度不同,进而使稻田 CH₄ 产生和氧化等过程发生改变^[23-25]。本试验中 F 处理 N₂O 周年累积排放量低于 F-D-F-M,但差异不显著,而 CH₄ 周年累积排放量显著高于 F-D-F 和 F-D-F-M 处理。与 N₂O 相比,尽管 CH₄ 具有较低的 GWP,但 F 处理稻田 CH₄ 累积排放量对 GWP 的贡献高达 81.5%~92.3%。与 F 处理相比,F-D-F 和 F-D-F-M 处理 CH₄ 贡献率分别降低 1.0%~13.4%和 7.0%~24.6%,从而导致 F 处理 GWP 显著高于 F-D-F 和 F-D-F-M 两个处理。本研究结果表明,在双季稻系统中,与 F 处理相比,F-D-F 和 F-D-F-M 处理 GWP 分别显著降低 31.5%~44.9%和 38.2%~53.4%。Win 等^[26]和 Ahn

等^[27]研究也表明,不同灌溉方式对稻田 GWP 影响不同,其中非充分灌溉能显著降低稻田 GWP。此外本研究还表明,江西双季稻区 GWP 与 Chen 等^[28]在湖南双季稻区开展的施氮量对稻田 GWP 影响的研究结果相似($13.5\sim 18.7\text{ t CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),但高于王斌等^[29]在湖北双季稻区开展的外施控释肥和添加剂对稻田 GWP 影响的研究结果($2.8\sim 5.1\text{ t CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),而本研究得到双季稻区 GWP 的范围也与谢立勇等^[30]研究结果较为一致。

在水稻生产过程中既要考虑稻田温室气体排放也要兼顾水稻产量。本试验中,江西双季稻区 GHGI 与 Chen 等^[28]和孔宪旺等^[31]在湖南双季稻区研究结果相似(GHGI 分别为 $0.99\sim 1.26\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.97\sim 1.89\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$),但高于王斌等^[29]在湖北双季稻区开展外施控释肥和添加剂对稻田 GHGI 影响的研究结果($0.12\sim 0.33\text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$)。本试验不同灌溉方式 GHGI 结果表明,与 F 处理相比,双季稻田 F-D-F 和 F-D-F-M 处理 GHGI 分别显著降低 36.2%~48.7%和 38.8%~54.6%。灌溉方式通过影响作物产量和稻田 GWP 的方式对 GHGI 产生影响^[24]。F-D-F 和 F-D-F-M 处理在水稻增产的同时通过有效降低稻田 CH_4 排放使 GWP 显著降低,从而使稻田 GHGI 显著下降。这与秦晓波^[32]、Cook 等^[33]和 Zschornack 等^[34]研究结果相一致。因此,中期烤田和间歇灌溉处理能在保证双季稻高产的基础上,显著降低稻田温室气体排放,是南方双季稻区秸秆还田条件下比较适宜的灌溉方式。

此外本研究还发现,秸秆还田条件下不同灌溉方式各处理 CH_4 周年累积排放量和综合温室效应随定位年限均呈增加趋势。可能原因是外施秸秆和紫云英等有机物质,其分解的累积效应及后效使土壤有机碳含量增加,从而使稻田综合温室效应逐年增加^[30,35-36]。至于其长期效果还有待研究。

4 结论

(1)在南方双季稻区,不同灌溉方式干物质积累没有显著差异,与持续淹水处理相比,中期烤田和间歇灌溉处理收获指数分别增加 3.6%~13.2%和 2.4%~10.9%,同时每穗粒数也均呈增加趋势,从而提高了水稻产量。

(2) CH_4 是双季稻田综合温室效应的主要贡献者。与持续淹水处理相比,中期烤田和间歇灌溉处理均能显著降低 CH_4 周年累积排放量。与持续淹水相

比,中期烤田和间歇灌溉处理可显著降低双季稻田全球增温潜势和温室气体排放强度。

因此,在南方双季稻区实施秸秆还田,采用中期烤田和间歇灌溉的水分管理方式都可以实现水稻高产和温室气体减排的双赢。

参考文献:

- [1] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966-975.
- [2] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 118(1/2/3/4): 6-28.
- [3] 余 坤, 冯 浩, 王增丽, 等. 氮化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 165-173.
YU Kun, FENG Hao, WANG Zeng-li, et al. Ammoniated straw improving soil structure and winter wheat yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 165-173.
- [4] Yang X X, Shang Q Y, Wu P P, et al. Methane emissions from double rice agriculture under long-term fertilizing systems in Hunan, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(3): 308-316.
- [5] Vibol S, Towprayoon S. Estimation of methane and nitrous oxide emissions from rice field with rice straw management in Cambodia[J]. *Environ Monit Assess*, 2010, 161(1): 301-313.
- [6] Ly P, Duong Vu Q, Jensen L S, et al. Effects of rice straw, biochar and mineral fertiliser on methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions from rice (*Oryza sativa* L.) grown in a rain-fed lowland rice soil of Cambodia: A pot experiment[J]. *Paddy and Water Environment*, 2015, 13(4): 465-475.
- [7] 刁伟伟, 郑桂萍, 赵凤亮, 等. 水稻节水保护性耕作的土壤理化性状及产量效应研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2007, 19(6): 14-17.
DIAO Wei-wei, ZHENG Gui-ping, ZHAO Feng-liang, et al. Research on soil traits and yield of rice under water-saving protective tillage[J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2007, 19(6): 14-17.
- [8] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 150-157.
YANG Bin-juan, HUANG Guo-qin, QIAN Hai-yan. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 150-157.
- [9] 刘 刚, 庄义庆, 杨敬辉, 等. 腐秆剂与秸秆配施对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 736-741.
LIU Gang, ZHUANG Yi-qing, YANG Jing-hui, et al. Effects of incorporation of straw treated with straw decomposing microbial inoculants on

- nitrous oxide emission from paddy field[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3):736-741.
- [10] 侯文峰, 李小坤, 王思潮, 等. 石灰与秸秆配施对冷浸田水稻产量与土壤特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(5):58-62.
HOU Wen-feng, LI Xiao-kun, WANG Si-chao, et al. Effects of combined application of lime and straw on rice yield and soil properties in cold waterlogged paddy field[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2015, 34(5):58-62.
- [11] 张 星, 刘杏认, 张晴雯, 等. 生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10):1943-1950.
ZHANG Xing, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, et al. Effects of biochar and straw direct return on soil microbial biomass during maize growth season in North China plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10):1943-1950.
- [12] 王孟雪, 张忠学, 吕纯波, 等. 不同灌溉模式下寒地稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2):95-100.
WANG Meng-xue, ZHANG Zhong-xue, LÜ Chun-bo, et al. CH_4 and N_2O emissions from rice paddy field and their GWPs research in different irrigation modes in cold region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2):95-100.
- [13] 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 等. 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(增刊2):128-134.
MA Yan-qin, QIAN Chen-chen, SUN Dan-ping, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions from soil in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):128-134.
- [14] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. 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]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [15] 姚 林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 33(5):1381-1387.
YAO Lin, ZHENG Hua-bin, LIU Jian-xia, et al. Current situation and prospect of rice water-saving irrigation technology in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5):1381-1387.
- [16] 张 彬, 黄 庆, 刘怀珍, 等. 不同水分管理模式下华南双季超级稻群体生长及物质生产特征[J]. 中国稻米, 2013, 19(4):30-34.
ZHANG Bin, HUANG Qing, LIU Huai-zhen, et al. Double cropping super rice growth and matter production characteristics of different water management mode in Southern China[J]. *China Rice*, 2013, 19(4):30-34.
- [17] 赵黎明, 李 明, 郑殿峰, 等. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6):159-169.
ZHAO Li-ming, LI Ming, ZHENG Dian-feng, et al. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6):159-169.
- [18] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华, 等. 不同灌溉方式对水稻生长与产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(5):653-658.
XU Fen-fen, ZENG Xiao-chun, SHI Qing-hua, et al. Effects of irrigation patterns on growth and yield of rice varieties[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2005, 27(5):653-658.
- [19] 张自常, 徐云姬, 褚 光, 等. 不同灌溉方式下的水稻群体质量[J]. 作物学报, 2011, 37(11):2011-2019.
ZHANG Zi-chang, XU Yun-ji, CHU Guang, et al. Population quality of rice under different irrigation regimes[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(11):2011-2019.
- [20] 卞金龙. 干湿交替灌溉对不同水稻品种产量与品质的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2015.
BIAN Jin-long. Effects of alternate wetting and drying irrigation on the grain yield and quality of different drought resistance rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015.
- [21] 张 耗, 剧成欣, 陈婷婷, 等. 节水灌溉对节水抗旱水稻品种产量的影响及生理基础[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23):4782-4793.
ZHANG Hao, JU Cheng-xin, CHEN Ting-ting, et al. Effect of water-saving irrigation on the grain yield of water-saving and drought-resistance rice and its physiological bases[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23):4782-4793.
- [22] 杨生龙, 王兴盛, 强爱玲, 等. 不同灌溉方式对水稻产量及产量构成因子的影响[J]. 中国稻米, 2010, 16(1):49-51.
YANG Sheng-long, WANG Xing-sheng, QIANG Ai-ling, et al. Effects of different irrigation methods on rice yield and yield components[J]. *China Rice*, 2010, 16(1):49-51.
- [23] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13):121-126.
PENG Shi-zhang, HOU Hui-jing, XU Jun-zeng, et al. CH_4 and N_2O emissions response to controlled irrigation of paddy fields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(13):121-126.
- [24] Riya S, Katayama M, Takahashi E, et al. Mitigation of greenhouse gas emissions by water management in a forage rice paddy field supplemented with dry-thermophilic anaerobic digestion residue[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225(9):1-13.
- [25] Thakur A K, Mohanty R K, Patil D U, et al. Impact of water management on yield and water productivity with system of rice intensification (SRI) and conventional transplanting system in rice[J]. *Paddy and Water Environment*, 2014, 12(4):413-424.
- [26] Win K T, Nonaka R, Win A T, et al. Effects of water saving irrigation and rice variety on greenhouse gas emissions and water use efficiency in a paddy field fertilized with anaerobically digested pig slurry[J]. *Paddy Water Environ*, 2015, 13(1):51-60.
- [27] Ahn J H, Choi M Y, Kim B Y, et al. Effects of water-saving irrigation on emissions of greenhouse gases and prokaryotic communities in rice paddy soil[J]. *Microb Ecol*, 2014, 68(2):271-283.
- [28] Chen Z D, Chen F, Zhang H L, et al. Effects of nitrogen application rates on net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in double-rice cropping systems of the Southern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(24):24781-24795.
- [29] 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 Bin, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gas-emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2):314-323.
- [30] 谢立勇, 许 婧, 郭李萍, 等. 水肥管理对稻田 CH_4 排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7):958-967.
- XIE Li-yong, XU Jing, GUO Li-ping, et al. Evaluation on impact of water and fertilizer management on daily CH_4 emission from paddy field in China and global warming potential[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(7):958-967.
- [31] 孔宪旺, 刘英烈, 熊正琴, 等. 湖南地区不同集约化栽培模式下双季稻稻田 CH_4 和 N_2O 的排放规律[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9):2612-2618.
- KONG Xian-wang, LIU Ying-lie, XIONG Zheng-qin, et al. CH_4 and N_2O emissions from double-rice field under different intensified cultivation patterns in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(9):2612-2618.
- [32] 秦晓波. 减缓华中典型双季稻田温室气体排放强度措施的研究[D]. 北京:中国农业科学院研究生院, 2011.
- QIN Xiao-bo. Mitigation of greenhouse gas intensity from typical double rice field of central China[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [33] Cook B I, Puma M J, Krakauer N Y. Irrigation induced surface cooling in the context of modern and increased greenhouse gas forcing[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(7/8):1587-1600.
- [34] Zschornack T, Rosa C, Pedroso G M, et al. Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions in subtropical paddy rice under alternative irrigation systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 105(1):61-73.
- [35] Ghimire R, Norton U, Bista P, et al. Soil organic matter, greenhouse gases and net global warming potential of irrigated conventional, reduced-tillage and organic cropping systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107(1):49-62.
- [36] Warnecke S, Paulsen H M, Schulz F, et al. Greenhouse gas emissions from enteric fermentation and manure on organic and conventional dairy farms: An analysis based on farm network data[J]. *Organic Agriculture*, 2014, 4(4):285-293.