

邓桥江, 曹凑贵, 李成芳. 不同再生稻栽培模式对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1373–1380.

DENG Qiao-jiang, CAO Cou-gui, LI Cheng-fang. Effects of different ratooning cultivation modes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1373–1380.

不同再生稻栽培模式对稻田温室气体排放和产量的影响

邓桥江¹, 曹凑贵^{1,2}, 李成芳^{1,2*}

(1. 农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室/华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 2. 长江大学/长江大学主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434023)

摘要:为研究再生稻对稻田温室气体排放和产量的影响,于2017年在潜江广华农场,设置常规栽培与优化栽培两种再生稻种植模式,研究其对稻田 N_2O 与 CH_4 排放、头季与再生季水稻产量的影响。结果表明,栽培模式显著影响 N_2O 排放、 CH_4 排放和全球增温潜势(GWP)。与常规栽培模式相比,优化栽培模式 N_2O 累计排放量在头季、再生季和全生育期分别显著增加了82.0%、45.3%和64.0%, CH_4 累计排放量分别降低了55.0%、260.0%和34.9%,GWP分别降低了52.7%、218.6%和31.9%。同时,与常规栽培模式相比,优化栽培模式头季产量、再生季产量和总产分别提高了23.8%、30.0%和25.4%。研究表明,优化栽培模式相对于常规栽培模式在降低全球增温潜势的同时还能提高头季与再生季水稻产量,是一项低碳高产的再生稻栽培模式,值得在湖北省稻区推广。

关键词: CH_4 ; N_2O ; 产量; 全球增温潜势; 再生稻

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)06-1373-08 doi:10.11654/jaes.2018-1400

Effects of different ratooning cultivation modes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields

DENG Qiao-jiang¹, CAO Cou-gui^{1,2}, LI Cheng-fang^{1,2*}

(1. MARA Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River / College of Plant Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: Rice ratooning can be an effective way to enhance the multiple-cropping index of paddy fields, grain yield per unit, and economic benefits. Thus, it has become an important rice cropping pattern in China. However, the effects of ratooning rice on greenhouse gas emissions remain unknown. Therefore, this study investigated the effect of different cultivation modes (traditional and optimized cultivation) on greenhouse gas emissions and grain yields from ratooning rice fields of Guanghua Farm, Qianjiang City, in 2017. The soil N_2O and CH_4 emissions were determined by a static closed-steel method, and the soil N_2O and CH_4 fluxes were measured at 7~10 d intervals. The results of this study indicated that there were peaks in N_2O fluxes immediately after each N application and after field drainage. Moreover, other peaks in N_2O fluxes were found at the heading stages of first rice crops and rice ratooning. The N_2O fluxes under the traditional cultivation model ranged from $-15.70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ to $536.24 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in the first rice season, and from $18.04 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ to $168.38 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in the ratooning rice season. For the optimized cultivation mode, the fluxes varied from $9.53 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ to $1\,031.99 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in the first rice season, and from $16.54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ to $338.90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in the ratooning rice season. Compared with the traditional cultivation model, the optimized cultivation mode significantly increased contents of soil NH_4^+-N , NO_3^--N , and dissolved organic C by 78.7%, 31.8%, and 25.3%, respectively. Cultivation patterns had significant effects on cumulative N_2O and CH_4 emissions. Compared with traditional cultivation mode, the optimized cultivation mode significantly enhanced cumulative N_2O emissions by 82.0%, 45.3%, and 64.0%, but decreased cumulative

收稿日期: 2018-11-07 录用日期: 2019-01-14

作者简介: 邓桥江(1992—),男,江西高安人,硕士研究生,从事稻田生态研究。E-mail: 839200093@qq.com

*通信作者: 李成芳 E-mail: lichengfang@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300907, 2017YFD0301403); 国家自然科学基金项目(31671637); 湖北省自然科学基金项目(2018CFB608)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0300907, 2017YFD0301403); The Natural Science Foundation of China(31671637); The Natural Science Foundation of Hubei Province(2018CFB608)

CH₄ emissions by 55.0%, 260.0%, and 34.9%, and reduced global warming potential by 52.7%, 218.6%, and 31.9% in the first, ratooning, and whole rice seasons, respectively. The contribution of CH₄ to the global warming potential was 80.7%~98.3%, which was obviously higher than that of N₂O (1.7%~19.3%). Moreover, cultivation patterns also significantly affected rice grain yields. Optimized cultivation mode resulted in 23.8%, 30.0%, and 25.4% higher grain yields in the first, ratooning, and whole rice seasons relative to traditional cultivation mode. Together, our results suggest that the optimized cultivation mode is a sustainable ratooning cultivation mode with great global warming mitigation potential and increased grain yields from first and ratooning rice in paddy fields. Thus, it is worth to popularize this cultivation mode in rice planting areas of Hubei Province.

Keywords: CH₄; N₂O; yield; global warming potential; ratooning rice

甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是影响全球变暖的重要的两种温室气体^[1]。稻田是大气CH₄的重要排放源。稻田CH₄年排放量约占全球CH₄总排放量的6%^[2]。研究指出,由于氮肥施用与灌溉,我国稻田每年产生50 Gg N的N₂O^[3]。因此完善稻田温室气体减排措施对于稻田可持续利用和缓解全球变暖具有重要的意义。

再生稻是在水稻收获第一季后,开发头季腋芽再次种植收获的一季水稻^[4]。在种植一季稻热量有余,而种植双季稻热量不足的地区及双季稻只种植一季中稻的稻田发展再生稻,是提高复种指数,增加稻田生产面积、稻谷产量和经济收入的有效措施之一^[5-6]。由于我国经济的快速发展,使得南方主要稻作区劳动力向沿海发达地区转移,出现劳动力紧张现象。南方双季稻区再生稻的播、栽期安排在早稻与中稻之间,可以缓解双季稻区“双抢”季节劳动力紧张的矛盾,降低劳动力成本^[5]。同时,与双季稻作和水旱轮作相比,再生稻具有节水节肥、稻谷品质优和经济效益高等优点^[7],已逐渐发展成为我国重要的水稻种植制度。当前,国内外从栽培的角度研究了不同农艺措施对再生稻的光合特性、生长规律与产量构成、肥料利用率和品种的影响^[5,7-10]。再生稻是在头季收割后稻桩再生芽的萌发再生、成穗,其肥料、水分等管理措施不同于一季稻^[5],其稻田温室气体的排放特征势必有别于传统的水稻栽培稻田。然而,当前对于再生稻稻田温室气体排放的研究尚少^[11-12]。Firous等^[11]通过生命周期评估法(Life cycle assessment)探讨了单季稻模式与中稻-再生稻模式稻田温室气体排放的差异,指出中稻-再生稻模式N₂O和CH₄排放量均明显低于单季稻模式。Lindau等^[12]比较了不同品种再生稻稻田CH₄排放特征,发现不同品种再生稻CH₄排放的差异来自于穗茎发育、根系分泌和根凋零物的差异。上述研究只是分析了不同耕作制度或不同再生稻品种下

稻田N₂O和CH₄排放的差异,但未能对不同再生稻栽培模式稻田N₂O和CH₄排放特征及其差异进行研究。因此,本文研究了不同再生稻栽培模式对稻田N₂O与CH₄排放和头季与再生季水稻产量的影响,旨在探究再生稻稻田温室气体排放规律,这对于推广再生稻及发展低碳稻作具有重要的理论意义。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

选取湖北省沙洋广华农工贸有限公司二分场进行试验。该农场位于长江中游稻区(112°43' E, 30°23' N),亚热带季风气候,年均温16.1℃,年降雨量1100 mm,潮土性水稻土,为河流冲积物发育。试验地初始耕层土壤基本理化性状为:容重1.05 g·cm⁻³、pH 7.44、铵态氮2.39 mg·kg⁻¹、硝态氮5.22 mg·kg⁻¹、有机碳20.63 g·kg⁻¹、全氮1.86 g·kg⁻¹、全磷0.58 g·kg⁻¹。试验田从2015年开始中稻(*Oryza sativa* L.)-再生稻-油菜(*Brassica napus* L.)复种,本文选取2017年4月至11月上旬进行试验研究。试验使用水稻品种为天两优616。

1.2 试验设计与田间管理

试验采用完全随机区组设计,设常规栽培与优化栽培两个模式,每个模式面积40 m×60 m,重复3次。对于所有栽培模式,头季稻肥料用量均为180 kg N·hm⁻²、90 kg P₂O₅·hm⁻²与150 kg K₂O·hm⁻²,再生季稻肥料用量为120 kg N·hm⁻²、60 kg P₂O₅·hm⁻²与120 kg K₂O·hm⁻²。4月19日采用洋马VP6插秧机(常州洋马动力机械有限公司)插秧,行、株距分别为30、20 cm,每穴3株;8月10日头季收获,11月8日再生季收获。

对于常规栽培模式,头季稻氮肥按基肥(4月18日):分蘖肥(5月14日)为6:4施用,磷、钾肥全作基肥一次性施用;再生季氮肥在8月6日头季收割留桩后7 d配合灌溉作为促苗肥一次性施用,磷、钾肥也同时一次性施用。头季与再生季均采用久保田收割机

收获,其中头季留20 cm稻桩,两季收获的秸秆整体覆盖在稻桩行间。再生稻收获后冬季稻田休闲。除分蘖盛期(5月30日)与收获前2周(7月25日)排水晒干外,头季与再生季稻田均保持3~5 cm水层。

优化栽培模式相对于常规栽培模式主要从肥料运筹、头季稻茬留桩高度、水分管理、秸秆管理、冬季绿肥管理等方面进行优化。与常规栽培模式相同,头季稻氮肥按基肥:分蘖肥为6:4施用,磷、钾肥全作基肥一次性施用;而对于再生季,在头季稻齐穗后15 d和头季收割留桩后7 d氮肥按7.5:2.5、磷肥按6:4、钾肥按7.5:2.5施用催芽肥(8月1日)和促苗肥。头季稻成熟后采用华中农业大学设计的再生稻割穗机^[13]收割,留35 cm稻桩,秸秆粉碎覆盖还田。头季秧苗移栽4~6 d后,采用普航手扶PH-KG开沟机(山东普航机械有限公司)在田间每隔10 m开一排水沟,沟深15~20 cm,沟宽20~25 cm,要求成沟明显、排灌通畅;稻季采用间歇灌溉的水分管理方式^[14]。在再生稻收割前7 d,以撒播方式套种油菜,播种量为15 kg·hm⁻²,转年4月油菜就地粉碎作为绿肥还田。

1.3 温室气体测定和全球增温潜势计算

采用静态箱-气相色谱法测定稻田CH₄和N₂O通量^[15]。采样箱由不锈钢制成,半径0.38 m,高1 m,外面包裹保温膜,箱体顶部装有一个采样孔,连接一个带有三通阀的注射器。在采样箱内顶部安置4个小风扇以充分混合箱内气体,并安装一个电子温度计用以测定箱内温度。水稻插秧后每7 d采样一次,直至再生稻收获。每日上午8:00—11:00进行采样,采样时间分别为闭箱后0、10、20、30 min,采集混合气体25 mL注入到预先抽真空的玻璃瓶中,带回室内测定。CH₄和N₂O浓度、通量和累计排放量的具体测定与计算方法见文献[16]。

在过去100年尺度上,CH₄和N₂O相对于CO₂的增温系数分别为30和268^[1],因此不同栽培模式的全球增温潜势(Global warming potential, GWP)计算如下:

$$GWP = N_2O \times 268 + CH_4 \times 30$$

1.4 样品采集与测定

头季稻与再生稻收获后,在每个模式用内径5 cm取土钻随机取18点0~20 cm土层的土壤,混合过2 mm筛,去除根系、植物残体以及其他杂质,用于土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N与可溶性有机碳(DOC)含量测定。

头季稻和再生稻成熟时,在每个模式中央处留0.067 hm²作为测产区,收割计产。稻谷晒干后测定其质量和含水量,按标准含水量13.5%折算水稻产量。

采用KCl浸提-FIAstar5000连续流动注射分析仪测定土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N^[17],采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法测定DOC^[18]。

1.5 数据统计与分析

所有数据采用Excel 2013进行整理和绘图,采用SPSS 17.0软件t检验程序进行两个模式均值的显著性差异分析。试验结果均以每次测得的3次重复的平均值与标准差来表示。

2 结果与分析

2.1 N₂O和CH₄排放通量的季节性变化

不同模式稻田N₂O通量的季节性变化基本一致(图1),即在每次氮肥施用后出现峰值;同时,在稻田排干期和水稻生长旺盛的齐穗期也出现排放峰值。常规栽培模式头季稻N₂O通量为-15.70~536.24 μg·m⁻²·h⁻¹,再生季稻为18.04~168.38 μg·m⁻²·h⁻¹。优化栽培模式头季稻N₂O通量为9.53~1 031.99 μg·m⁻²·h⁻¹,再生季稻为16.54~338.90 μg·m⁻²·h⁻¹。常规栽培模式头季稻和再生季稻N₂O平均通量分别为102.31

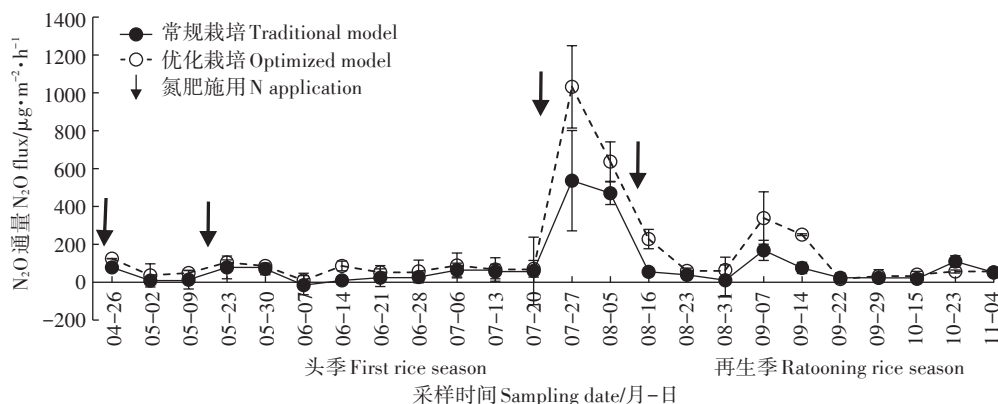


图1 不同再生稻栽培模式稻田N₂O通量的季节性变化

Figure 1 Seasonal changes in N₂O fluxes from different ratooning rice cultivation models

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $57.62\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 是优化栽培模式的 56.2% 和 56.9%。

如图2所示,各模式均在头季水稻分蘖期、齐穗期与再生季齐穗期出现CH₄排放峰值。常规栽培模式头季稻CH₄通量为3.07~88.36 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,再生季稻为0.83~42.42 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。优化栽培模式头季稻CH₄通量为2.53~44.30 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,再生季稻为0.91~15.56 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。常规栽培模式头季稻和再生季稻CH₄平均通量分别为30.06 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和4.20 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,是优化栽培模式的1.54倍和1.80倍。

栽培模式显著影响头季、再生季和全生育期N₂O排放、CH₄排放和GWP(表1)。与常规栽培模式相比,优化栽培模式N₂O累积排放量在头季、再生季和全生育期分别显著增加了82.0%、45.3%和64.0%,而CH₄累积排放量分别降低了55.0%、260.0%和34.9%,GWP分别降低了52.7%、218.6%和31.9%。CH₄对GWP的贡献为80.7%~98.3%,N₂O则为1.7%~19.3%,CH₄对GWP的贡献大于N₂O。

2.2 土壤无机氮与可溶性碳

由表2可知,栽培模式显著影响头季稻和再生稻收获后土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和DOC含量。与常规栽

培模式相比,优化栽培模式头季稻收获后土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和DOC含量分别提高了73.1%、23.1%和36.2%,再生稻收获后土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和DOC含量分别提高了78.7%、31.8%和25.3%。

2.3 产量

栽培模式显著影响水稻产量(表3)。与常规栽培模式相比,优化栽培模式头季产量、再生季产量和总产量分别提高了23.8%、30.0%与25.4%。

2.4 相关分析

由表4可知,常规栽培与优化栽培模式头季与再生季土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和DOC均与N₂O累积排放量呈显著正相关,但与CH₄累积排放量不相关。

3 讨论

3.1 N₂O和CH₄排放

氮肥施用后的短期内即出现N₂O排放峰值(图1),这可能是氮肥施用提高了土壤无机氮含量(表2),从而为土壤硝化与反硝化作用提供了更多的反应底物^[9]。在水稻分蘖盛期和收获前2周的排水过程中也出现了N₂O排放峰值(图1),其原因可能是排干稻田改善土壤通气性,增加土壤的有效氧,促进土壤

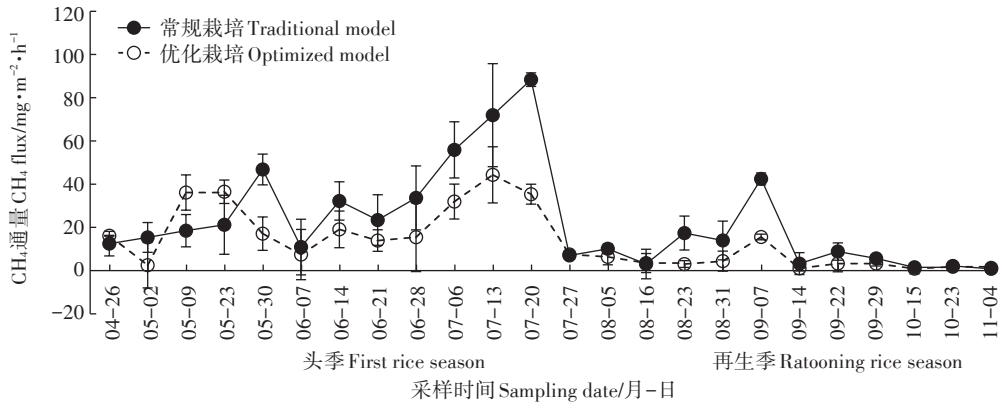


图2 不同再生稻栽培模式稻田CH₄通量的季节性变化

Figure 2 Seasonal changes in CH₄ fluxes from different ratooning rice cultivation models

表1 不同再生稻栽培模式头季与再生季稻田温室气体累积排放量与GWP的变化

Table 1 Cumulative emissions of N₂O and CH₄ and global warming potential from different ratooning rice cultivation models

项目 Items	头季 First rice season		再生季 Ratooning rice season		全生育期 Total	
	常规栽培 Traditional model	优化栽培 Optimized model	常规栽培 Traditional model	优化栽培 Optimized model	常规栽培 Traditional model	优化栽培 Optimized model
N ₂ O 累积排放量/kg·hm ⁻²	1.67±0.52b	3.04±1.19a	1.61±0.09b	2.34±0.63a	3.28±0.43b	5.38±0.73a
CH ₄ 累积排放量/kg·hm ⁻²	882±14a	397±53b	60±2b	216±71a	942±33a	613±32b
GWP/kg CO ₂ eq·hm ⁻²	26 908±187a	12 724±964b	2231±25b	7107±1396a	29 139±698a	19 831±571b

注:同一行不同字母表示不同栽培模式间在5%水平上差异显著。
Note: Different letters in a line mean significant differences at the 5% level between traditional model and optimized model.

表2 不同再生稻栽培模式头季稻与再生稻收获后土壤无机氮与可溶性碳含量的变化($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 Changes in soil inorganic N and dissolved organic C contents under different ratooning rice cultivation models at first and ratooning rice harvest($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目 Items	常规栽培 Traditional model		优化栽培 Optimized model	
	头季 First rice season	再生季 Ratoon rice season	头季 First rice season	再生季 Ratoon rice season
$\text{NH}_4\text{-N}$	2.34±0.33b	2.39±0.31b	4.05±0.40a	4.27±0.36a
$\text{NO}_3\text{-N}$	14.96±0.75b	14.90±1.73b	18.42±2.01a	19.64±2.54a
可溶性碳 Dissolved organic C	371.5±19.5c	448.5±16.4b	506.0±68.1ab	562.0±20.0a

注:同一行不同字母表示在5%水平上差异显著。

Note: Different letters in a line mean significant differences at the 5% level.

表3 不同再生稻栽培模式水稻产量变化($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 3 Changes in rice grain yields under different ratooning rice cultivation models($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	头季 First rice season	再生季 Ratooning rice season	总产 Total
常规栽培 Traditional model	10.35±0.41b	3.74±0.35b	14.09±0.30b
优化栽培 Optimized model	12.81±0.31a	4.86±0.17a	17.67±0.28a

注:同一列不同字母表示在5%水平上差异显著。

Note: Different letters in a column mean significant differences at the 5% level.

表4 不同处理头季与再生季 N_2O 与 CH_4 累积排放量与土壤无机氮与可溶性碳的相关性($n=18$)Table 4 Linear correlation between cumulative N_2O and CH_4 emissions and soil inorganic N and dissolved organic C at first and ratooning rice seasons($n=18$)

项目 Items		$\text{NH}_4\text{-N}$ 与 N_2O	$\text{NO}_3\text{-N}$ 与 N_2O	DOC 与 N_2O	$\text{NH}_4\text{-N}$ 与 CH_4	$\text{NO}_3\text{-N}$ 与 CH_4	DOC 与 CH_4
常规栽培 Traditional model	头季 First rice season	0.50*	0.65**	0.59**	-0.24ns	0.29ns	0.15ns
	再生季 Ratooning rice season	0.55*	0.62**	0.51*	-0.20ns	0.27ns	0.11ns
优化栽培 Optimized model	头季 First rice season	0.52*	0.56*	0.55*	-0.38ns	0.10ns	0.11ns
	再生季 Ratooning rice season	0.57*	0.66**	0.52*	-0.33ns	0.21ns	0.09ns

注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; ns, 差异不显著。

Notes: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; ns, not significant.

硝化作用^[20],因此导致大量 N_2O 产生。此外,头季和再生季齐穗期也观测到 N_2O 排放峰值(图1),原因可能在于头季稻与再生季稻齐穗期再生芽的萌发与伸长、籽粒灌浆,水稻对肥料吸收旺盛,根系生长旺盛^[5],分泌物增加,导致大量 N_2O 产生。

在头季稻分蘖盛期、齐穗期与再生季稻齐穗期均观察到 CH_4 排放峰值(图1)。在头季稻分蘖期,水稻植株生长旺盛,呼吸作用强烈,大量 CH_4 通过植株排放^[20]。在头季与再生季稻齐穗期,根系生长旺盛^[5],分泌物增加,这为产甲烷菌提供了更多的基质,促进了 CH_4 产生。

本研究表明,优化栽培相对于常规栽培提高了稻田 N_2O 排放(表1),其原因有几方面:第一,本研究结果(表4)指出,土壤无机氮和 DOC 与土壤 N_2O 排放呈显著正相关,表明二者是影响 N_2O 排放的重要因素。

N_2O 是土壤硝化与反硝化作用的中间产物^[2],无机氮与 DOC 为土壤硝化与反硝化作用提供了反应底物,因此促进了 N_2O 排放。优化栽培模式冬季种植的绿肥还田,提高土壤无机氮和 DOC 含量(表2),增加土壤硝化与反硝化的作用底物,促进 N_2O 排放。第二,优化栽培模式的间歇灌溉改善土壤通气性,促进土壤硝化作用^[21-22]。 N_2O 的排放不仅受土壤氧有效性和无机氮含量的影响,还受到其在土壤中迁移扩散的影响^[20,23]。常规栽培模式的淹水水分管理措施虽然能提高土壤反硝化速率,但延长 N_2O 的扩散时间,增加 N_2O 被还原为 N_2 的几率,降低 N_2O 的排放。第三,本课题组前期的研究指出,与常规淹灌相比,间歇灌溉能促进根系的良好发育和生长及养分的吸收,促使叶片早生快发,为水稻生长提供了更大叶面积,提高了水稻产量^[24]。本研究中优化栽培相较于常规栽培有

更高的水稻产量(表3),意味着优化栽培模式有更好的水稻根系生长和随后更强的根际泌氧^[25],因此其促进了 N_2O 的释放。

与 N_2O 排放相反,优化栽培较常规栽培降低稻田 CH_4 排放(表1)。本研究指出,土壤DOC与稻田 CH_4 排放不相关(表4),其原因可能是稻田土壤 CH_4 排放主要来自于土壤原有机质的分解,外源有机物质可能主要对土壤微生物活性及代谢途径有影响^[26]。因此,虽然优化栽培模式头季秸秆粉碎还田相对于常规栽培模式秸秆整体行间还田导致秸秆降解速率增加,促使土壤DOC含量提高(表2),但是正如之前所述,优化栽培模式更好的水稻根系生长和随后更强的根际泌氧,势必增强甲烷氧化菌活性,进而抑制了 CH_4 排放。同时,优化栽培模式间歇灌溉实行的浅水层和无水层管理,明显改善土壤通气性,提高土壤氧有效性,抑制产甲烷菌活性^[27],也可降低稻田 CH_4 排放。

本研究再生稻栽培模式GWP为19 831~29 139 $\text{kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$,大于本课题组在湖北省同一纬度带的单季稻^[9]的16 245~23 151 $\text{kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和双季稻^[28]的15 720 $\text{kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这可能与本试验点土壤有机碳(20.63 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)高于其他两个点(单季稻点10.95 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,双季稻点16.89 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)有关。本研究中 CH_4 对GWP的贡献(80.7%~98.3%)远大于 N_2O 的贡献,表明发展稻田 CH_4 减排的农艺措施对于稻田的可持续生产具有重要意义。本研究还表明,与常规栽培模式相比,优化栽培模式 CH_4 排放减少34.9%,GWP降低31.9%,进一步说明了减少稻田 CH_4 排放对于稻田生产的可持续发展的作用。有研究表明,作物生产中农艺投入与操作(例如农药、化肥使用,机械整地与收获等),对农田温室效应具有很大的贡献^[29],然而本文未对此进行研究,因此今后应加强此方面研究,这对于综合评估稻田的生态效益和发展可持续稻田生产意义重大。

3.2 水稻产量

本研究表明,与常规栽培模式相比,优化栽培模式提高了头季与再生季水稻产量,最终使总产增幅达25.4%(表3),这可能与绿肥、肥料运筹、水分管理与稻桩留桩高度等方面的优化有关。第一,有报道指出,种植绿肥具有固氮、改善土壤物理性状、提高土壤速效养分供应等作用^[30],因此提高了水稻产量。第二,优化栽培模式优化了肥料运筹,在头季齐穗期多施用一次促芽肥。有研究指出,促芽肥是使再生稻高产的关键措施之一,合理的施用促芽肥能使水稻腋

芽再生旺盛^[5]。同时,头季根系对再生稻的生长发育起主导作用^[31],依据水稻养分需求特点进行施用肥料,促进再生季根系的生长^[5],因此提高再生稻产量。第三,先前的研究指出,间歇灌溉较常规淹灌能促进根系的良好发育和生长、养分的吸收,促使叶片早生快发,为水稻生长提供了更大叶面积,提高了水稻产量。林文雄等^[5]的研究也指出,头季稻在灌浆时进行间歇灌溉和促芽肥后进行轻烤田能保证头季稻后期根系不早衰,提高活力,最终提高再生稻休眠芽的萌发和再生苗的生长。第四,留桩高度与再生稻休眠芽萌发数量密切相关^[6]。相对于常规留低稻桩(20 cm),优化栽培模式的高留桩(35 cm)使再生稻容易再生,不易受到田间不利环境影响,尽可能保住可再生的节位,促进再生芽多发和高位芽再生;同时,有更多稻桩营养可利用,并且可多利用头季留下的叶片成为再生稻的功能叶^[5]。

再生稻轻简化、效益高,在我国南方稻作区已得到大力发展^[5]。国内外众多的研究者在再生稻的生理生态和栽培技术方面已取得了较大的进展,并且在不同的生态区域形成了不尽相同的栽培技术体系^[32]。然而,当前的研究未能考虑再生稻种植对稻田温室气体排放的影响。本试验指出,优化栽培模式相对于常规栽培模式能有效降低GWP,且提高头季与再生季水稻产量,因此是一项低碳高产的再生稻栽培模式,值得推广。温室气体排放因气候与土壤等不同而具有明显的时空异质性^[33],本研究只是针对一个中稻-再生稻复种季节的研究,还缺乏多年的定点研究,因此进行长期的定点研究将有助于消除短期研究的不确定性。

4 结论

与常规再生稻栽培模式相比,优化再生稻栽培模式从绿肥种植、肥料运筹、水分管理、秸秆管理与稻桩留桩高度等方面进行了优化,使得稻田 CH_4 排放降低,从而降低GWP,同时也提高了头季与再生季水稻产量。结果表明,优化栽培模式是一项可持续发展的再生稻栽培模式,值得在湖北稻区推广。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] IPCC. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emis-

- sion from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2):GB2018.
- [4] Faruq G, Taha R M, Prodhan Z H. Rice ratoon crop: A sustainable rice production system for tropical hill agriculture[J]. *Sustainability*, 2014, 6:5785-5800.
- [5] 林文雄, 陈鸿飞, 张志兴, 等. 再生稻产量形成的生理生态特性与关键栽培技术的研究与展望[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(4):392-401.
- LIN Wen-xiong, CHEN Hong-fei, ZHANG Zhi-xing, et al. Research and prospect on physio-ecological properties of ratoon rice yield formation and its key cultivation technology[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(4):392-401.
- [6] Harrell D L, Bond J A, Blanche S. Evaluation of main-crop stubble height on ratoon rice growth and development[J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(3):396-403.
- [7] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(9):1702-1717.
- XU Fu-xian, XIONG Hong, ZHANG Lin, et al. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(9):1702-1717.
- [8] 郑景生, 林文雄, 李义珍, 等. 再生稻头季不同施氮水平的双季氮素吸收及产量效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3):78-82.
- ZHENG Jing-sheng, LIN Wen-xiong, LI Yi-zhen, et al. Nitrogen uptake and grain yield effects of double-cropping rice at different nitrogen application rates in the first crop of ratoon rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3):78-82.
- [9] Nakano H, Morita S. Effects of time of first harvest, total amount of nitrogen, and nitrogen application method on total dry matter yield in twice harvesting of rice[J]. *Field Crops Research*, 2008, 105(1/2):40-47.
- [10] Petroudi E R, Noormohammadi G, Mirhadi M J, et al. Effects of nitrogen fertilization and rice harvest height on agronomic yield indices of ratoon rice-berseem clover intercropping system[J]. *Australian Journal of Crop Sciences*, 2011, 5(5):566-574.
- [11] Firous S, Nikkha A, Aminpanah H. Rice single cropping or ratooning agro-system: Which one is more environment-friendly? [J] *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25:32246-32256.
- [12] Lindau C W, Bllich P K, DeLaune R D. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1995, 54(1/2):109-114.
- [13] 张国忠, 张翼翔, 黄见良, 等. 再生稻割穗机的设计与性能试验[J]. *华中农业大学学报*, 2016, 35(1):131-136.
- ZHANG Guo-zhong, ZHANG Yi-xiang, HUANG Jian-liang, et al. Designing and performance testing a novel head spike harvester of ratoon rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2016, 35(1):131-136.
- [14] 程建平, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10):1859-1865.
- CHENG Jian-ping, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, et al. Effects of different irrigation modes on biological characteristic and water use efficiency of paddy rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10):1859-1865.
- [15] Li C, Zhang Z, Guo L, et al. Emissions of CH₄ and CO₂ from double rice cropping systems under varying tillage and seeding methods[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 80(12):438-444.
- [16] 袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH₄ 和 N₂O 温室效应及经济效益评估[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(6):2052-2060.
- YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, LI Cheng-fang, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice-fish and rice-duck complex ecosystems and the evaluation of their economic significance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(6):2052-2060.
- [17] 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 and chemical analysis[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.
- [18] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19:703-704.
- [19] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, et al. Effects of tillage practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice-wheat cropping systems in central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122:636-644.
- [20] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(12):4294-4300.
- YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, CHENG Jian-ping, et al. CH₄ and N₂O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12):4294-4300.
- [21] 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 Biogeochemistry Cycles*, 2005, 19:GB2021.
- [22] Xu Y, Zhan M, Cao C, et al. Improved water management to reduce greenhouse gas emissions in no-till rapeseed-rice rotations in Central China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 221:87-98.
- [23] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9):1104-1108.
- XIONG Zheng-qin, XING Guang-xi, Tsuruta H, et al. The effects of summer legume crop cultivation on nitrous oxide emissions from upland farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9):1104-1108.
- [24] 程建平, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉方式对水稻产量和水分生产率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12):28-33.
- CHENG Jian-ping, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, et al. Effects of different irrigation modes on the yield and water productivity of rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12):28-33.
- [25] Jiang Y, van Groenigen K J, Huang S, et al. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(11):4728-4738.
- [26] 邱虎森, 苏以荣, 刘杰云, 等. 易利用态有机质对水稻土甲烷排放的激发作用[J]. *土壤*, 2018, 50(3):537-542.
- QIU Hu-sen, SU Yi-rong, LIU Jie-yun, et al. Priming effects of la-

- bile organic substances on methane emission in flooded paddy soil[J]. *Soils*, 2018, 50(3):537-542.
- [27] 彭世彰, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田 CH_4 排放规律的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1):9-13.
- PENG Shi-zhang, LI Dao-xi, XU Jun-zeng, et al. Effect of water-saving irrigation on the law of CH_4 emissions from paddy field[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, 28(1):9-13.
- [28] 邹凤亮, 曹凑贵, 马建勇, 等. 基于 DNDC 模型模拟江汉平原稻田不同种植模式条件下温室气体排放[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9):1291-1301.
- ZOU Feng-liang, CAO Cou-gui, MA Jian-yong, et al. Greenhouse gases emission under different cropping systems in the Jiangnan Plain based on DNDC model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9):1291-1301.
- [29] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: Methodology for full carbon cycle analyses[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3):439-444.
- [30] 田 卡, 张 丽, 钟旭华, 等. 稻草还田和冬种绿肥对华南双季稻产量及稻田 CH_4 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):592-598.
- TIAN Ka, ZHANG Li, ZHONG Xu-hua, et al. 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 [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):592-598.
- [31] 苏祖芳, 张洪程, 侯康平, 等. 再生稻的生育特性及高产栽培技术研究[J]. 江苏农学院学报, 1990, 11(1):15-21.
- SU Zu-fang, ZHANG Hong-cheng, HOU Kang-ping, et al. Studies on development characters and cultural technology for high yield in regeneration rice[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 1990, 11(1):15-21.
- [32] 李成芳, 胡红青, 曹凑贵, 等. 中国再生稻田土壤培肥途径的研究与实践[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(14):2666-2669, 2721.
- LI Cheng-fang, HU Hong-qing, CAO Cou-gui, et al. Research and practice on improvement of ratoon rice soil fertility in China[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(14):2666-2669, 2721.
- [33] Wood J D, Gordon R J, Wagner-Riddle C. Biases in discrete CH_4 and N_2O sampling protocols associated with temporal variation of gas fluxes from manure storage systems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171/172:295-305.