

周浩之, 吴梦琴, 罗喜秀, 等. 不同再生稻栽培模式碳足迹与经济效益评估[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 71-78.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.02.009

不同再生稻栽培模式碳足迹与经济效益评估

周浩之, 吴梦琴, 罗喜秀, 陈滢琨, 刘天奇, 李成芳

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

摘要 通过大田试验, 在湖北省武穴市花桥镇设置不同再生稻栽培模式: 常规人工插秧模式CK与2个机插秧优化栽培模式OM1、OM2, 探究不同栽培模式下稻田甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放、碳足迹以及净生态系统经济效益, 为再生稻低碳丰产栽培提供理论依据。结果显示, 栽培模式显著影响CH₄排放, 但对N₂O排放影响不显著; OM2模式CH₄周年累积排放量相比CK和OM1模式分别降低43.5%和26.3%; 栽培模式显著影响水稻产量与碳足迹; 与CK、OM1模式相比, OM2模式头季产量显著增加15.2%与5.8%; 再生季产量显著提高44.2%和34.7%; 优化模式OM2相对于CK与OM1显著降低了碳足迹, 降幅分别为40.0%和24.0%; OM2模式净生态系统经济效益最高为20 768 CNY/hm², 分别是CK与OM1模式的1.38与1.28倍。研究结果表明, OM2相比其他模式降低了CH₄排放和碳足迹, 提高了水稻产量和净生态系统经济效益。

关键词 碳足迹; 再生稻; 轻简栽培; 经济效益; 低碳丰产栽培

中图分类号 S181 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)02-0071-08

农业生态系统是大气CH₄和N₂O的重要排放源^[1]。为满足不断增长的粮食需求, 大量氮肥被施入农田, 导致土壤板结、水体富营养化、酸雨、温室气体排放增加等环境问题^[2]。因此, 定量评估农田碳排放对农业生态系统的响应可以评估农艺措施的环境效益^[3]。近几十年来, 基于生命周期评价方法的碳足迹评估已被用来衡量温室气体排放对人类及环境的影响。将碳足迹引入农业生态系统, 可以量化每项农事活动产生的温室气体并了解农产品生产的排放总量, 为农业生产制定最佳种植模式和栽培措施提供理论依据。

再生稻是一种高效轻简化的栽培方式^[4]。学者们研究了不同品种、水分措施、施肥管理、留茬高度、头季收割时间与方式对再生稻的生理、产量与稻米品质的影响, 为推广再生稻栽培提供了理论依据^[5-6]。目前, 对稻田碳足迹的研究取得了一定的进展。王兴等^[7]研究表明, 南方稻区单位产量碳足迹大于北方稻区, 最大的是海南省, 为1.4 kg CO₂-eq/(kg·a); 最小的是吉林省, 为0.60 kg CO₂-eq/(kg·a)。张传红等^[8]报道, 水稻碳足迹要明显高于小麦、玉米、大豆等旱季作物。同时, 也有研究指出, 水

旱轮作能有效减少水稻种植模式的碳足迹^[9]。目前有关再生稻的研究主要考虑了某一农艺措施对再生稻产量与产量构成因子的影响, 而有关再生稻生产过程的碳足迹罕有研究。随着农村劳动力减少, 农业生产对轻简化栽培的需求激增。为实现国家“碳达峰”和“碳中和”目标, 再生稻生产应向低碳丰产的方向发展。因此, 本研究探讨不同再生稻栽培模式下净生态系统经济效益(NEEB), 并评估不同模式的碳足迹, 旨在为再生稻低碳丰产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于2020年10月至2021年10月进行, 试验点位于湖北省黄冈市武穴市花桥镇郑公塔村(115°28'E, 29°48'N), 海拔为20.1 m, 亚热带季风性湿润气候, 年均温为18.6 °C, 年均降雨量为1 140.8 mm。水稻种植方式为移栽, 供试水稻品种为丰两优香1号(*Oryza sativa* L.)。试验点土壤为泥沙田、潴育型水稻土, 为第四纪红土沉积物发育, 试验前土壤基本性状: 有机碳18.15 g/kg, 全氮1.33 g/kg, 总磷为1.33 g/kg, 总钾为3.23 g/kg, 铵态氮7.98 mg/kg, 硝态氮4.37 mg/kg, 速

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2021BBA224)

周浩之, E-mail: 925550354@qq.com

通信作者: 李成芳, E-mail: lichengfang@mail.hzau.edu.cn

效磷为9.85 mg/kg, 速效钾为85.35 mg/kg。

1.2 试验设计与田间管理

本试验采用完全随机区组设计, 设常规栽培模式(CK)和2个优化栽培模式(OM1和OM2)。每个模式3次重复, 小区面积为40 m²(5 m×8 m)。每个小区设有高40 cm、宽30 cm的田埂, 并用黑色薄膜包裹覆盖, 防止肥水互串。各小区之间设有1 m宽的保护行, 防止肥水互串, 同时减少边际效应对试验的影响。

各模式均于3月底育秧, 4月底进行移栽, CK为人工插秧, 优化模式为机插秧, 栽插行株距分别为30、13 cm, 每穴3株。各模式头季施肥量均为N 180 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²与K₂O 150 kg/hm², 再生季施肥量为N 90 kg/hm²、P₂O₅ 45 kg/hm²和K₂O 90 kg/hm²。

对于CK, 全生育期所需氮磷钾由尿素(46%)、过磷酸钙(12% P₂O₅)、氯化钾(60% K₂O)提供, 其中头季氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2比例施用, 磷、钾肥作为基肥一次性施用;对于再生季, 在头季稻齐穗后15~20 d施用催芽肥, 并于收割留桩后7 d结合复水施用促苗肥, 氮磷钾施用量为催芽肥的一半。头季采用常规灌溉的水分管理方式, 即苗期田间水位保持在3~5 cm, 在分蘖盛期排水晒田1周以控制无效分蘖, 之后复水保持水稻在3~5 cm, 头季水稻收获前10 d排水晒干。对于再生季, 头季稻收割留桩后7 d复水, 保持浅水层3~5 cm, 收获(8月23日)前1周排水晒干。

与CK相比, OM1模式主要从肥料管理、水分灌溉、头季留茬高度等方面进行优化。OM1模式头季所需氮磷钾由缓释肥(15% N、7% P₂O₅、10% K₂O, 贵州天宝丰生态农业科技有限公司, 贵州贵阳)、过磷酸钙、氯化钾提供, 且作为基肥一次性施入;再生季肥料施用与CK一致。OM1模式头季采用干湿交替灌溉方式。利用TEN90张力计(托普云农科技股份有限公司, 浙江杭州)监测田间水势, 在水稻移栽后田间水位保持在3~5 cm, 水稻返青后, 当田间水势达到-15 kPa时复水到3~5 cm, 之后如此往复。而再生季采用与CK一样的浅水灌溉方式。头季稻收获后, OM1模式与CK一样, 其再生季留茬高度为20 cm, 且秸秆粉碎覆盖于稻桩之间。

OM2模式相对于CK主要从肥水管理、水分灌溉、头季秸秆处理、头季留茬高度、冬季绿肥种植等方面优化。OM2模式头季氮肥施用比例与CK一

致, 磷、钾肥作为基肥一次性施用;其中50%氮肥和全部的磷、钾肥通过半自动深施肥机(台州农乐塑料有限公司, 浙江台州)作为基肥施入耕层10 cm, 其余50%氮肥作为追肥表面撒施。OM2模式与OM1模式相同, 其头季采用干湿交替灌溉方式, 再生季采用浅水灌溉方式。头季稻收获后, OM2模式留茬高度为40 cm, 其头季秸秆粉碎覆盖于稻桩之间, 并喷施30 kg/hm²秸秆腐熟剂(沃宝生物科技有限公司, 河南鹤壁)。在再生季收获前1周(10月中旬), 在水稻行间直播油菜, 播种量为15 kg/hm²;来年4月初, 用小型旋耕机整地, 并将油菜秸秆就地翻入土中。

1.3 测定指标与方法

1) 温室气体。稻田温室气体CH₄和N₂O采用静态暗箱-气相色谱法^[10]测定。采样箱为PVC圆柱体, 直径38 cm, 高50 cm或110 cm(依据植株高度选用)。外围用银白色保温材料包裹防止箱内温度升温过高。箱顶部安装1个三通阀进行采样, 箱体内部顶端安装温度计探头和4个小风扇, 用于测定箱内温度和混匀箱内气体。气体采样从油菜播种后1 d开始, 直到第2年再生季收获完结束。冬季气体14 d采集1次, 稻季7 d采集1次(根据气候情况稍作调整)。气体采集时间在08:00-11:00, 采集时先将圆环不锈钢底座提前放置田间, 采样箱安置后, 灌入水封闭, 分别在闭箱后0、10、20、30 min用注射器采集25 mL气体样品, 注入到事先抽好真空约25 mL玻璃瓶中, 带入室内用气相色谱仪测定CH₄和N₂O浓度。根据4个样品所做的线性方程得到其排放速率, 气体排放通量公式参照文献^[11]:

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

式(1)中, F 为气体排放通量, mg/(m²·h); ρ 为标准状态下气体密度, mg/m³; h 为密闭箱到水面的距离, m; dc/dt 为箱内气体浓度的变化率; t 为采样过程中箱内平均温度, °C。整个周年的温室气体累积排放量采用内插法计算^[12]。

2) 碳足迹。本研究分析不同再生稻栽培模式下作物从播种到收获整个生产过程中直接与间接的温室气体排放特征。直接温室气体排放为CH₄和N₂O排放。间接温室气体排放为冬季和稻季整年的农资投入(机械用柴油、种子、化肥、农膜、农药等)所产生, 即每项农资产品从原材料的开采、运输、加工、制造所产生的温室气体排放总量。各项农资投入的间接排放引用了由亿科环境科技研发的包含中国本地化的生命周期基础数据库(Chinese life cycle data-

base, CLCD)的生命周期评价软件 eBalance v3.1 中的温室气体排放因子。本研究定义头季与再生季产生的稻谷为产品,定量评价不同再生稻栽培模式下每产生 1 kg 产品的碳足迹。具体单位产量碳足迹由公式(2)~(5)计算^[13]:

$$CF = \frac{CE_T}{Y} \quad (2)$$

$$CE_T = CE_{\text{indirect}} + CE_{\text{direct}} \quad (3)$$

$$CE_{\text{indirect}} = \sum_{i=0}^n Q_i \times M_i \quad (4)$$

$$CE_{\text{direct}} = CE_{N_2O} \times 265 + CE_{CH_4} \times 28 \quad (5)$$

式(2)~(5)中,CF为单位产量碳足迹,kg CO₂-eq/(kg·a);CE_T为整个生产过程中产生的温室气体排放总量,kg CO₂-eq/(hm²·a);Y为产量,kg/hm²;CE_{indirect}为整个生产过程中农资投入造成的间接温室气体排放量,kg CO₂-eq/(hm²·a);CE_{direct}为甲烷和氧化亚氮的直接排放造成的温室气体排放量,kg CO₂-eq/(hm²·a);Q_i代表生产过程中某种农资的消耗量,kg/hm²;M_i代表所消耗的农资投入对应的温室气体排放系数,kg CO₂-eq/kg;CE_{N₂O}和CE_{CH₄}代表整个生产过程中氧化亚氮和甲烷的累计排放量,kg/hm²;28和265分别是在100 a尺度上CH₄和N₂O的增温系数。

3)经济效益。经济效益为两季水稻产量收益减去生产成本。水稻产量的测定是在水稻成熟后选取4 m²长势均一的样方,每个小区取2个,脱粒、晒干、风选、称质量,最终产量按13.5%稻谷含水量折算。

净生态系统经济效益(net ecosystem economic benefit, NEEB)通过公式(6)~(7)计算^[10]:

$$NEEB = \text{水稻收益} - \text{生产成本} - \text{GWP成本} \quad (6)$$

$$\text{GWP成本} = \text{GWP} \times \text{碳价} \quad (7)$$

式(6)~(7)中,水稻收益为水稻产量乘以稻谷收购价,生产成本包括农资成本(农药、化肥、种子等)、人工成本(1个人劳动1 d为60 CNY)、机械成本(打田机、插秧机、收割机等);GWP成本为生产过程中直接产生的温室气体的碳成本;碳价为42 CNY/tCO₂-eq。

1.4 数据分析

所有试验数据采用Excel 2016进行整理分析并制图,采用SPSS 18.0软件进行单因素方差分析,采用LSD对数据进行显著性差异分析。最终结果以3次重复的“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 不同再生稻栽培模式温室气体排放特征

1)CH₄排放通量变化。不同再生稻栽培模式冬季CH₄排放通量为-0.11~0.33 mg/(m²·h),均处于低水平(图1)。在稻季,各模式均在头季稻分蘖盛期、齐穗期以及再生季幼穗分化期出现峰值CK的CH₄排放通量为0.11~36.6 mg/(m²·h),OM1为0.01~19.0 mg/(m²·h),OM2为0.01~12.0 mg/(m²·h)。OM2平均CH₄排放通量较OM1和CK少21.7%和41.1%。

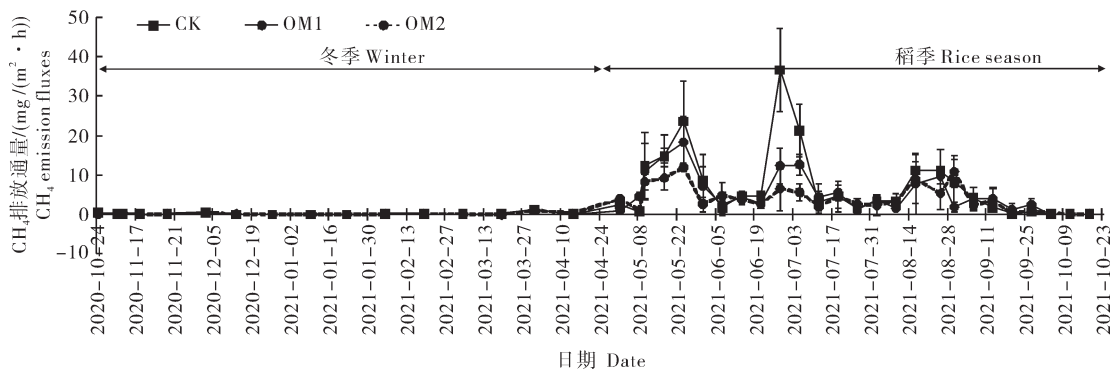


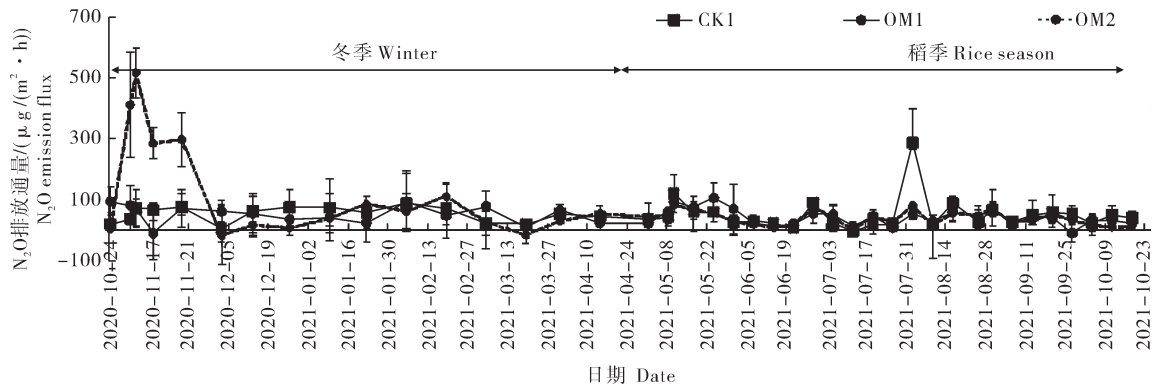
图1 不同再生稻栽培模式CH₄排放通量的周年变化

Fig.1 Annual changes in CH₄ emission fluxes under different cultivation modes of ratooning rice

2)N₂O排放通量变化。各模式N₂O排放通量冬季高于稻季,均在氮肥施用后出现峰值(图2)。CK和OM1的N₂O排放通量为-8.92~94.7 μg/(m²·h),OM2的排放通量为-17.4~518 μg/(m²·h)。

3)CH₄和N₂O累计排放量变化特征。栽培模式显著影响CH₄的累计排放量,而对N₂O的累计排

放量的影响不显著(表1)。在冬季休闲期,各模式间CH₄累计排放量无显著差异,OM2模式N₂O累计排放量显著大于CK与OM1模式。在头季,OM2模式CH₄累计排放量显著小于其他模式,相比CK、OM1分别减少了52.6%、42.4%,而各模式间N₂O累计排放量无显著差异。在再生季,各模式CH₄和N₂O累

图2 不同再生稻栽培模式N₂O排放通量的周年变化Fig.2 Annual changes in N₂O emission flux under different cultivation modes of ratooning rice

计排放量均无显著差异。OM2模式周年CH₄累计排放量显著大于OM1、CK模式,相对于CK、OM1模式分别减少了43.5%、26.3%,而各模式间周年N₂O累计排放量无显著差异。

表1 不同再生稻栽培模式温室气体累计排放量

模式 Modes	冬季休闲 Winter fallow season		头季 First rice season		再生季 Ratooning rice season		周年 Total	
	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O
	CK	8.1±1.9a	2.06±0.52b	235±13a	1.30±0.53a	65±13a	0.72±0.11a	308±28a
OM1	9.4±1.1a	1.96±0.49b	175±11b	1.12±0.38a	51±11a	0.56±0.05a	236±10b	3.64±0.64a
OM2	6.1±1.5a	3.40±0.59a	111±16c	0.95±0.58a	58±13a	0.59±0.11a	174±29c	4.94±0.49a

注: 同列不同字母表示在5%水平上存在显著差异($P<0.05$)。Note: Different letters in a row mean significant differences at the level of 5% ($P<0.05$).

2.2 不同再生稻栽培模式间接温室气体排放

如表2所示,肥料是间接温室气体排放的最大贡献者,约为总间接温室气体排放的52.4%~60.2%,其中肥料的排放主要是由氮肥产生。除了CK外,秧盘为第二排放源,占总量的18.6%~21.7%。各模式柴油的投入产生较大的温室气体排放,占总间接温室气体排放的16.0%~18.1%。农药造成的间接温室气体排放最小,不到总量的5%。OM2模式间接温室气体排放量最高,CK最小。

2.3 不同再生稻栽培模式碳足迹及其构成

各模式周年温室气体排放为8 611~11 329 kg CO₂-eq/(hm²·a), OM1和OM2模式显著低于CK(表3)。分析其构成,CH₄排放占比最高,占总排放的56.7%~76.1%;其次为农资投入造成的间接温室气体排放,约为总排放的14.3%~26.1%;N₂O排放最低,为总排放的7.5%~15.2%。优化模式OM1和OM2相对于CK显著降低了碳足迹,降幅分别为21.1%和40.0%。

2.4 不同再生稻栽培模式产量

由表4可见,栽培模式显著影响头季、再生季以

表2 不同再生稻栽培模式下农资投入造成的间接温室气体排放量变化

Table 2 Indirect greenhouse gas emissions from agricultural inputs under different cultivation modes of ratooning rice kgCO₂-eq/(hm²·a)

农资投入 Agricultural inputs	CK	OM1	OM2
柴油 Diesel fuel	282.1	335.0	440.8
氮肥 N fertilizer	534.7	482.0	596.7
磷肥 P fertilizer	256.7	256.7	330.1
钾肥 K fertilizer	185.3	185.3	214.5
有机肥 Organic fertilizer		163.5	163.5
除草剂 Herbicide	23.6	19.1	30.1
杀虫剂 Herbicide	23.0	23.0	23.0
杀菌剂 Fungicide	12.7	12.7	12.7
农膜 Film	136.3	22.7	22.7
秧盘 Tray		454.4	454.4
种子 Seed	120.6	120.6	127.3
人工 Labor	48.2	19.8	30.1
合计 Total	1 623.2	2 094.6	2 445.7

及周年产量。在头季,OM2和OM1模式产量显著大于CK,增幅为5.81%~15.2%,且OM2模式产量最高。对于再生季,与CK和OM1模式相比,OM2模

表3 不同再生稻栽培模式碳足迹及其构成

Table 3 Carbon footprint and its components under different cultivation modes of ratooning rice

项目 Items	CK	OM1	OM2
间接温室气体排放/ (kg CO ₂ -eq/(hm ² ·a)) Indirect greenhouse gas emissions	1 623.2± 0c	2 094.6± 0b	2 445.7± 0a
CH ₄ 排放/(kg CO ₂ -eq/ (hm ² ·a)) CH ₄ emissions	8 622± 787a	6 600± 270b	4 879± 801c
N ₂ O排放/(kg CO ₂ -eq/ (hm ² ·a)) N ₂ O emissions	1 084± 164a	967± 170a	1 309± 130a
水稻产量/(kg/hm ²) Rice yield	11 940± 562c	12 916± 295b	15 030± 514a
碳足迹/(kg CO ₂ -eq/ (hm ² ·a)) Carbon footprint	0.95± 0.09a	0.75± 0.04b	0.57± 0.05c

注:同行不同字母表示在5%水平上存在显著差异($P<0.05$)。下同。Note: Different letters in a line mean significant differences at the level of 5% ($P<0.05$). The same as follows.

表4 不同再生稻栽培模式全生育期产量

Table 4 Yield during the whole growth period of different cultivation modes of ratooning rice

模式 Modes	头季 First rice season	再生季 Ratooning rice season	周年 Annual
CK	7 528±316b	4 412±247b	11 940±562c
OM1	8 194±280	4 722±148b	12 916±295b
OM2	8 670±216a	6 361±254a	15 030±514a

注:同列不同字母表示在5%水平上存在显著差异($P<0.05$)。Note: Different letters in the same row mean significant differences at the level of 5% ($P<0.05$).

式产量显著提高34.7%~44.2%。因此,周年产量表现为OM2>OM1>CK。

2.5 不同再生稻栽培模式 NEEB

由表5可见,虽然OM2模式生产成本高于其他模式,但是有最高的产量收入和GWP支出,因此,OM2模式NEEB最高,分别为CK和OM1的1.38和1.28倍。

表5 不同再生稻栽培模式NEEB

Table 5 NEEB under different cultivation modes of ratooning rice

模式 Modes	产量收入 Rice income	生产支出 Production costs	GWP 支出	NEEB
CK	29 849± 1 405c	14 381± 0c	430± 41a	15 038± 1 410b
	32 289± 737b	15 750± 0b	337± 21bc	16 202± 737b
OM2	37 575± 1 284	16 529± 0a	277± 35c	20 768± 1 269a

3 讨论

3.1 不同栽培模式对再生稻稻田CH₄和N₂O排放的影响

本研究结果表明,再生稻稻田CH₄排放通量呈现明显季节性变化规律,稻季明显高于冬季,同时头季明显高于再生季(图1)。冬季CH₄排放通量为-0.11~0.33 mg/(m²·h),相对较低。这可能与田间水分密切相关。不论冬闲还是种植绿肥,田面无水干旱,土壤通气性强,CH₄的产生受抑制,同时冬季的低温也会抑制产甲烷菌活性从而不利于CH₄的产生^[14]。不同栽培模式在头季分蘖盛期、齐穗期与再生季幼穗分化期出现排放高峰,这可能与头季分蘖盛期与再生季幼穗分化期植株旺盛生长产生大量甲烷通过茎秆排放,同时头季齐穗期根系生长旺盛,大量分泌物产生,刺激CH₄生成^[15]。

本研究结果表明,OM2和OM1模式头季稻田CH₄排放显著低于CK(表1)。这与优化模式采用干湿交替的灌溉方式有关。干湿交替增加了田间土壤与外界的氧气交换频率,提高了土壤有效氧,从而抑制了CH₄的产生^[16]。同时,OM2模式绿肥还田提高了土壤肥力,为作物提供良好生长环境,有利于根系发育,促进根际泌氧^[17],从而激活甲烷氧化菌活性,抑制CH₄产生。此外,OM2模式深施氮肥有利于耕层土壤NH₄⁺提高,进而抑制CH₄的产生^[18]。Linguist等^[19]的试验结果也表明氮肥深施具有更低的甲烷排放量。各模式再生季CH₄排放无显著差异(表1),这是因为再生季较低的土壤温度以及再生季植株较少的生物量都会抑制CH₄的排放^[20]。

各模式N₂O排放均在氮肥施用后产生峰值(图2)。N₂O是土壤微生物硝化和反硝化作用的中间产物,氮肥的施用增加了土壤速效氮含量,为硝化和反硝化作用提供了底物,促进了N₂O的产生^[10]。各模式冬季N₂O平均排放通量冬季高于稻季,符合IPCC报告所说的旱作排放的温室气体高于稻田的结论^[21]。本研究各模式间头季与再生季稻田N₂O累积排放量无显著差异(表1)。这可能与不同的水肥管理和秸秆还田措施有关。虽然优化模式干湿交替改善了土壤通气性,秸秆还田提高了有效碳底物浓度,有利于N₂O排放,但是缓释肥或氮肥深施能促进水稻氮吸收,降低硝化与反硝化作用底物浓度^[22],导致各模式间N₂O排放没有显著差异。

3.2 不同再生稻栽培模式对碳足迹的影响

水稻生产投入的农资(化肥、农药、农膜和柴油等)被大量消耗亦会造成大量的碳排放^[23]。本研究各模式间接温室气体排放在1 623.2~2 445.7 kg CO₂-eq/(hm²·a)。各模式的差异主要表现在肥料、农膜、秧盘和柴油的使用上,其中肥料是最大的排放来源,且各个模式肥料的贡献率均大于50%。从碳足迹构成来看,CH₄排放是碳足迹的最大贡献源,这与前人研究结果^[24]类似,因此,减少稻田CH₄排放,对于我国低碳稻作的发展有着重要意义。

本研究中各栽培模式碳足迹介于0.57~0.95 kg CO₂-eq/(kg·a)。OM2模式碳足迹最小,OM1次之,CK最大(表3)。原因在于OM2模式具有最低的周年温室气体排放和最高的再生稻产量,OM2优化了水肥管理,采取干湿交替和氮肥深施显著降低了CH₄累积排放量,因此,采取适当的栽培措施可以减少水稻种植的CH₄排放。不同地区和不同种植模式的碳足迹差异也较为明显^[9],本研究中的碳足迹低于双季稻碳足迹,与林志敏等^[25]的研究类似,因此,在适宜地区发展再生稻并结合优化栽培措施可以有效减少水稻生产碳足迹。然而,本研究没有考虑土壤有机碳储量的变化,研究表明土壤碳储量的变化也是影响碳足迹的一大因素^[26],而长期绿肥和秸秆还田能提高土壤有机碳储量^[27]。因此,需进行长期试验,将有机碳储量的变化考虑进来,进一步优化低碳稻作技术,为缓解气候问题提供强有力的理论支撑。

3.3 不同再生稻栽培模式对产量与NEEB的影响

本研究结果表明,优化模式头季稻产量显著高于常规模式(表4)。与常规模式相比,优化模式从绿肥种植、插秧方式、水分管理和肥料运筹方面进行了优化,从而显著提高头季稻产量。第一,机插秧秧苗整齐划一,行株距均匀,提高了光温利用效率^[28],机插秧用秧盘育秧可以有效避免秧苗感染病害,水稻生长后期的病害程度要比人工插要轻,有利于水稻增产。第二,研究表明长期淹水会诱发土壤有毒物质积累,抑制根系生长^[29]。优化模式采用干湿交替的灌溉方式,干湿交替能促进水稻根和芽的发育^[30],有利于水稻地上部的发育。第三,OM1模式施用缓释肥能满足水稻不同阶段对氮的需求,有利于水稻增产^[31]。也有研究表明,干湿交替灌溉模式下一次性施用缓释肥在提高水分利用效率的同时能提高水稻产量^[32]。第四,OM2模式的头季稻产量大于OM1可能与该模式秸秆催腐、冬季种植绿肥和氮肥深施有关。秸秆喷施腐熟剂,能有效提高秸秆降解,提高

土壤肥力;深施可以将养分精确地输送到根区,减少NH₃挥发和氮素的淋失^[33],提高了氮肥利用率^[22]。同时,绿肥还田不仅对土壤有改良作用,还可以提高土壤中的速效N、P、K和有机质含量^[34]。绿肥还加速了土壤酶活性的变化,会改变土壤细菌和真菌群落的分类组成和功能性状,这些变化对土壤和作物大有益处^[35],因此能提高水稻产量。

NEEB是生产支出、增温潜势以及水稻产量的综合作用结果^[36]。虽然与常规模式相比,优化模式OM2模式增加了种子、肥料与整地成本,OM1模式施用的缓释肥价格较高,导致了更高的生产成本(表5),但是优化模式显著降低了头季稻CH₄排放并提高了水稻产量,因此,优化模式提高了NEEB,表明该模式能够提高经济效益,降低再生稻田增温潜势,是一种可持续的低碳丰产高经济效益的再生稻栽培模式。由于大田试验受气候影响较大,该模式是否能连年稳产丰产并保持低碳排放,还需经过长期的验证。

参考文献 References

- [1] 叶兴庆,程郁,张玉梅,等.我国农业活动温室气体减排的情景模拟、主要路径及政策措施[J].农业经济问题,2022,43(2):4-16. YE X Q, CHENG Y, ZHANG Y M, et al. Scenario simulation, main paths and policy measures of greenhouse gas emission reduction of agricultural activities in China [J]. Issues in agricultural economy, 2022, 43(2): 4-16 (in Chinese with English abstract).
- [2] OITA A, SHIBATA H, SHINDO J. Nitrogen footprint: a novel indicator to quantify nitrogen loss to the environment [J]. Journal of life cycle assessment (Japan), 2018, 14(2): 120-133.
- [3] FANG K, HEIJUNGS R, DE SNOO G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: overview of a footprint family [J]. Ecological indicators, 2014, 36: 508-518.
- [4] 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 C F, HU H Q, CAO C G, et al. Research and practice on improvement of ratoon rice soil fertility in China [J]. Hubei agricultural sciences, 2017, 56(14): 2666-2669, 2721 (in Chinese with English abstract).
- [5] 徐富贤,袁驰,王学春,等.不同杂交中稻品种在川南再生稻区的两季产量及头季稻米品质差异[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(7):990-998. XU F X, YUAN C, WANG X C, et al. Differences in the two-crop yields and main-crop rice qualities among different hybrid mid-season rice varieties in the ratooning rice region of southern Sichuan, China [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2020, 28(7): 990-998 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王肖凤,汪吴凯,夏方招,等.水分管理对再生稻稻米品质的影响[J].华中农业大学学报,2021,40(2):103-111. WANG X F, WANG W K, XIA F Z, et al. Effects of water management on grain quality of ratooning rice [J]. Journal of Huazhong Agricultural

- al University, 2021, 40(2): 103-111 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王兴, 赵鑫, 王钰乔, 等. 中国水稻生产的碳足迹分析[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 713-722. WANG X, ZHAO X, WANG Y Q, et al. Assessment of the carbon footprint of rice production in China [J]. Resources science, 2017, 39(4): 713-722 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张传红, 韩露, 谢佳男, 等. 江苏省主要农作物碳足迹动态及其构成研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14(1): 110-119. ZHANG C H, HAN L, XIE J N, et al. Carbon footprint dynamics and composition assessment of major crops production in Jiangsu Province [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (natural science edition), 2022, 14(1): 110-119 (in Chinese with English abstract).
- [9] SUN M, ZHAN M, ZHAO M, et al. Maize and rice double cropping benefits carbon footprint and soil carbon budget in paddy field [J/OL]. Field crops research, 2019, 243: 107620 [2022-06-16]. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107620>.
- [10] 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(2): 636-644.
- [11] ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields [J]. Advances in atmospheric sciences, 1998, 15(4): 569-579.
- [12] LI C F, ZHANG Z S, GUO L J, et al. Emissions of CH₄ and CO₂ from double rice cropping systems under varying tillage and seeding methods [J]. Atmospheric environment, 2013, 80: 438-444.
- [13] GAN Y T, LIANG C, WANG X Y, et al. Lowering carbon footprint of durum wheat by diversifying cropping systems [J]. Field crops research, 2011, 122(3): 199-206.
- [14] DUNFIELD P, KNOWLES R, DUMONT R, et al. Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH [J]. Soil biology and biochemistry, 1993, 25(3): 321-326.
- [15] 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 Q J, CAO C G, LI C F. 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 (in Chinese with English abstract).
- [16] SULTANA N, ZHAO J, ZHENG Y, et al. Stable isotope probing of active methane oxidizers in rice field soils from cold regions [J]. Biology and fertility of soils, 2019, 55(3): 243-250.
- [17] 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(中英文), 2015, 23(4): 392-401. LIN W X, CHEN H F, ZHANG Z X, 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 (in Chinese with English abstract).
- [18] FAN D J, LIU T Q, SHENG F, et al. Nitrogen deep placement mitigates methane emissions by regulating methanogens and methanotrophs in no-tillage paddy fields [J]. Biology and fertility of soils, 2020, 56(5): 711-727.
- [19] LINQUIST B A, ADVIENTO-BORBE M A, PITTELKOW C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: a quantitative review and analysis [J]. Field crops research, 2012, 135: 10-21.
- [20] SONG K F, ZHANG G B, YU H Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from a ratoon paddy field in Sichuan Province, China [J]. European journal of soil science, 2021, 72(3): 1478-1491.
- [21] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [22] LIU T Q, LI S H, GUO L G, et al. Advantages of nitrogen fertilizer deep placement in greenhouse gas emissions and net ecosystem economic benefits from no-tillage paddy fields [J/OL]. Journal of cleaner production, 2020: 121322 [2022-06-16]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121322>.
- [23] 陈松文, 刘天奇, 曹凑贵, 等. 水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 3-12. CHEN S W, LIU T Q, CAO C G, et al. Situation of carbon neutrality in rice production and techniques for low-carbon rice farming [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(3): 3-12 (in Chinese with English abstract).
- [24] 姜振辉, 杨旭, 刘益珍, 等. 春玉米-晚稻与早稻-晚稻种植模式碳足迹比较[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 8091-8099. JIANG Z H, YANG X, LIU Y Z, et al. Comparison of carbon footprint between spring maize-late rice and early rice-late rice cropping system [J]. Acta ecologica sinica, 2019, 39(21): 8091-8099 (in Chinese with English abstract).
- [25] 林志敏, 李洲, 翁佩莹, 等. 再生稻田温室气体排放特征及碳足迹[J]. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1340-1351. LIN Z M, LI Z, WENG P Y, et al. Field greenhouse gas emission characteristics and carbon footprint of ratoon rice [J]. Chinese journal of applied ecology, 2022, 33(5): 1340-1351 (in Chinese with English abstract).
- [26] XUE J F, PU C, LIU S L, et al. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China. [J]. Ecological indicators, 2016, 64: 249-257.
- [27] ANSARI M A, CHOUDHURY B U, LAYEK B U, et al. Green manuring and crop residue management: effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India) [J/OL]. Soil and tillage research, 2022, 218: 105318 [2022-06-16]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105318>.
- [28] CHEN J N, ZHANG R C, CAO F B, et al. Critical yield factors for achieving high grain yield in early-season rice grown under mechanical transplanting conditions [J]. Phytion, 2020, 89(4): 1043-1057.
- [29] RAMASAMY S, BERGE H, PURUSHOTHAMAN S. Yield formation in rice in response to drainage and nitrogen application [J]. Field crops research, 1997, 51(1/2): 65-82.
- [30] ZHANG H, XUE Y G, WANG Z Q, et al. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice [J]. Crop science, 2009, 49(6): 2246-2260.
- [31] 李桂花, 张雪凌, 周吉祥, 等. 长期秸秆还田下有机无机配施及微量元素和缓释肥的施用对双季稻产量和肥料利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 149-155. LI G H, ZHANG X L,

- ZHOU J X, et al. Impact of manure incorporation, microelements and slow release fertilizer application on double rice yield and fertilizer use efficiency under long-term straw return condition [J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2021, 6(6): 149-155 (in Chinese with English abstract).
- [32] CAO X C, YUAN L, LIU X X. Benefits of controlled-release/stable fertilizers plus biochar for rice grain yield and nitrogen utilization under alternating wet and dry irrigation [J/OL]. *European journal of agronomy*, 2021, 129: 126338 [2022-06-16]. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126338>.
- [33] ZHAO C, HUANG H, QIAN Z H, et al. Effect of side deep placement of nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of single season late japonica rice [J]. *Journal of integrative agriculture*, 2021, 20(6): 1487-1502.
- [34] 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 J S, XU M G, DONG C H, 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 (in Chinese with English abstract).
- [35] 胡启良, 杨滨娟, 刘宁, 等. 绿肥混播下不同施氮量对水稻产量、土壤碳氮和微生物群落的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(6): 16-26. HU Q L, YANG B J, LIU N, et al. Effects of application rates of nitrogen on rice yield, carbon and nitrogen, microbial community in soil under mixed sowing of green manure [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(6): 16-26 (in Chinese with English abstract).
- [36] XU Y, LIANG L Q, WANG B R, et al. Conversion from double-season rice to ratoon rice paddy fields reduces carbon footprint and enhances net ecosystem economic benefit [J/OL]. *The science of the total environment*, 2021, 813: 152550 [2022-06-16]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152550>.

Evaluating carbon footprint and economic benefit under different cultivation modes of ratooning rice

ZHOU Haozhi, WU Mengqin, LUO Xixiu, CHEN Yukun, LIU Tianqi, LI Chengfang

Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Ratooning rice as a cultivation mode of rice with low cost and high benefits has been promoted in China, but the effects of the mode on carbon footprint of rationing rice production are unclear. A field experiment was conducted to study the effects of different cultivation modes of ratooning rice including conventional cultivation mode (CK), two optimized cultivation modes (OM1 and OM2) on the emission of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), grain yields, carbon footprint and economic benefits in central China. The results showed that the OM1 and OM2 modes were optimized from the perspectives of water and fertilizer managements, stubble height, straw treatment in the first season and winter management compared with CK. The cultivation modes significantly affected CH₄ emissions but had no effect on N₂O emissions. OM2 significantly reduced the annual cumulative CH₄ emissions by 43.5% and 26.3% relative to CK and OM1, respectively. Cultivation modes significantly affected grain yields and carbon footprint. Compared with CK and OM1, OM2 significantly increased the yields of first rice season by 15.2% and 5.8, and the yield of ratooning rice season by 44.2% and 34.7%, respectively. OM2 significantly decreased the carbon footprint by 40.0% and 24.0% relative to CK and OM1, respectively. The highest net ecosystem economic benefit of OM2 was 20 768 CNY/hm², which was 1.38 and 1.28 times of those of OM1 and CK, respectively. It is indicated that OM2 mitigates CH₄ emissions, reduces carbon footprint, increases rice yields and improves NEEB compared with other modes. OM2 is a sustainable cultivation mode of ratooning rice with low-carbon emission, high yield and high economic benefit. It will provide scientific basis for cultivating ratooning rice with low carbon and high yield.

Keywords carbon footprint; ratooning rice; simple and efficient cultivation; economic benefits; low-carbon and high-yield cultivation

(责任编辑:张志钰)