

双季稻秸秆还田方式对土壤碳库和甲烷排放强度的影响

梁威¹ 李虎² 郑华斌¹ 王慰亲¹ 唐启源¹

(¹ 湖南农业大学农学院, 410128, 湖南长沙; ² 岳阳市农业科学研究院, 414022, 湖南岳阳)

摘要 为探究不同秸秆还田处理方式对稻田土壤固碳与温室气体排放的影响, 于 2023-2024 年在湖南省岳阳市岳阳县进行试验, 以双季稻模式为研究对象, 在常规施肥条件下设置 5 个水稻秸秆处理方式: 秸秆不还田 (CK)、秸秆烧灰还田 (T1)、秸秆炭化还田 (T2)、秸秆减量还田 (T3) 和秸秆全量还田 (T4), 田间原位观测秸秆处理对土壤理化性质、土壤固碳量、CH₄ 排放、稻田温室效应以及水稻产量的影响。结果表明, 影响土壤固碳量增加的因素中, 秸秆施用量是主要因素; 其中 T4 处理的固碳量最高, 为 604.65 kg/hm²。早稻季 CH₄ 排放通量有 2 个峰值, 分别是分蘖期和齐穗期, 晚稻季有 1 个排放峰值, 为齐穗期, 4 个水稻季中, T2 处理的 CH₄ 累积排放量最低, 为 364.88 kg/hm²。各秸秆还田处理的减缓效益抵消效率 (RMO) 在 138.77%~391.73%, 2024 年 T2、T3 和 T4 处理的 RMO 下降, 表明其在土壤中的固碳减排效益提高。总体而言, T4 处理可增加土壤固碳量和土壤孔隙度, 降低土壤容重, 促进稻田固碳; T2 处理可降低 CH₄ 累积排放量和稻田温室效应, 促进稻田减排, 因此在 CH₄ 减排优先区域推荐 T2 处理, 在土壤修复与固碳优先区域推荐 T4 处理。

关键词 双季稻; 秸秆还田; 生物炭; 土壤固碳量; 甲烷

湖南是双季稻主产区, 在保障我国粮食安全中起着举足轻重的作用^[1]。水稻种植会产生丰富的秸秆资源, 秸秆中含有大量作物生长所需的养分^[2], 还田后在土壤中腐解, 可以提高土壤肥力, 同时节约资源, 降低成本^[3-4]。然而秸秆还田在提升土壤碳汇功能的同时, 也可能显著增加稻田温室气体的排放^[5]。戴相林等^[6]指出, 秸秆还田在短期内会显著增加 CH₄ 排放; 黄琼等^[7]通过多年定位试验进一步发现, CH₄ 排放量随秸秆还田量的增加呈线性上升趋势。柴凯斌^[8]则认为, 秸秆还田对温室气体排放的影响具有阈值效应, 当还田量超过一定程度后, 排放增加趋于平稳。无论是秸秆直接还田, 还是配施腐熟剂处理, 均会导致 CH₄ 排放水平高于秸秆不还田处理, 但将秸秆进行处理后再还田能够有效降低 CH₄ 排放量。

近年来, 由秸秆制成的生物炭在促进作物生长和固碳减排方面表现出一定的潜力。赵炎等^[9]研究表明, 与秸秆不还田相比, 秸秆炭化处理的 CH₄ 累积排放量降低了 38.21%。生物炭具有高有机碳含量和高孔隙度等特征, 能够降低稻田土壤容重, 改善土壤环境, 提升土壤的固碳能力^[10]。且与直接还田相比, 炭化处理更有助于在固碳的同时抑制温室气体排放, 体现出更优的减排协同效应。虽然秸

秆还田在一定程度上可通过微生物分解增加土壤碳库输入, 从而提升固碳潜力^[3], 但其所引发的温室气体排放可能抵消甚至超过其固碳贡献。逯非等^[11]研究表明, 我国稻田因秸秆还田所引起的温室气体增排潜力是其固碳潜力的 2.2 倍, 说明秸秆还田在温室气体减排与碳汇提升之间仍存在较大矛盾。

秸秆还田是秸秆资源利用的重要方式之一, 合理利用秸秆是农业生态系统中的资源循环利用的重要措施。目前, 对于秸秆还田的研究较多, 但集中于秸秆腐解进程以及不同秸秆还田量对土壤肥力和作物产量的影响, 固碳减排协同的研究较少。综上, 本研究采用大田定位试验, 分析比较不同的秸秆还田方式对土壤固碳量和 CH₄ 排放强度的影响差异, 以期揭示不同还田方式对土壤环境、稻田温室气体排放和水稻产量的影响, 为水稻丰产与 CH₄ 减排协同提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于湖南岳阳市农业科学研究院科研试验场 (29°5' N, 113°2' E) 进行, 该地属于亚热带大陆性季风湿润气候, 年均降水量 1304.42 mm, 年

作者简介: 梁威, 研究方向为双季稻秸秆还田的固碳减排效应, E-mail: lw044043@163.com

唐启源为通信作者, 研究方向为水稻栽培生理生态及现代水稻生产技术, E-mail: qytang@hunau.edu.cn

基金项目: 国家水稻产业体系岗位专家项目 (CARS-01-27)

收稿日期: 2025-03-19; 修回日期: 2025-04-30; 网络出版日期: 2025-05-13

均气温 17.54 ℃，年无霜期 296 d，年日照时数 1690.63 h。定位试验于 2022 年开始，耕层土壤理化性质为土壤容重 1.26 g/cm³、pH 6.76、有机质 22.81 g/kg、全氮 1.35 g/kg、全磷 0.54 g/kg、全钾 14.50 g/kg。

1.2 试验设计

供试早稻品种为湘早籼 45 号，为常规稻；供试晚稻品种为盛泰优 9712，为三系杂交水稻。采用随机区组设计，设 5 个双季稻秸秆还田处理（表 1），分别为秸秆不还田（CK）、秸秆烧灰还田（T1）、秸秆炭化还田（T2）、秸秆减量还田（T3）和秸秆全量还田（T4），每个处理 3 次重复，小区面积 35 m²，总面积 525 m²。试验小区采用旋耕方式进行土地平整，四周筑小田埂，并用塑料薄膜包覆，各小区单独排灌，防止肥、水相互渗透。其中 T1 处理为双季稻收获后秸秆均匀洒至田间晾晒 2 d 后原位焚烧；T2 处理供试生物炭为稻壳经过 600 ℃热裂解烧制而成，施用量参考秸秆出发率 30% 左右^[12]；T3 处理为 20 cm 留桩后还田，还田量按水稻成熟期 20 cm 留桩干物质质量计算；T4 处理为将秸秆粉碎至 5~10 cm 长度后还田。

表 1 不同处理秸秆还田量

处理 Treatment	Table 1 Straw returning amount of different treatments			
	2023		2024	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
CK	0	0	0	0
T1	100%烧灰	100%烧灰	100%烧灰	100%烧灰
T2	1809 kg/hm ²	2429 kg/hm ²	2139 kg/hm ²	2668 kg/hm ²
T3	2384 kg/hm ²	2553 kg/hm ²	3022 kg/hm ²	3209 kg/hm ²
T4	5816 kg/hm ²	8097 kg/hm ²	7130 kg/hm ²	8892 kg/hm ²

早稻插植密度为 17 cm×20 cm，晚稻插植密度为 20 cm×20 cm。移栽前保持 1~2 cm 浅水，在移栽后返青前，小区保持 3~4 cm 水层，2 周左右促分蘖，待每蔸水稻的分蘖数达 15~20 时，停止灌水，开始晒田，保持干湿交替。肥料采用总养分含量≥45%（N-P₂O₅-K₂O=15-15-15）三元复合肥，各处理施肥量一致，双季稻按照 5:2:3 的比例作基肥、分蘖肥和穗肥施用，早稻的施肥量折合纯 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm² 和 K₂O 150 kg/hm²。晚稻的施肥量折合纯 N 120 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm² 和 K₂O 120 kg/hm²。全生育期严格控制病虫害。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤样品采集

早稻移栽前及晚稻收获后

各小区采用“S”形取样法取 0~30 cm 耕作层土壤，每小区各取 5 个点。采用环刀法（高 10 cm，直径 5 cm）取样测定土壤容重与孔隙度。通过“五点法”在水稻分蘖期、齐穗期及成熟期用内径为 5 cm 的土钻取深度为 0~10 cm 的土样混合，并挑出砾石、侵入体和植物残根等，放置在阴凉处自然风干后带回实验室备用。具体计算参照鲍士旦^[13]的方法。采用重铬酸钾高温氧化法^[14]测定土壤有机碳含量。

1.3.2 温室气体样品采集 利用分离式静态箱-气相色谱法采集与测定 CH₄。该分离式静态箱由底座和箱体组成，在水稻移栽前将底座置于大田，底座内外围边长为 50 cm，以 2 穴×3 穴规格在底座内栽水稻。取样箱体由不锈钢制成，长×宽×高为 50 cm×50 cm×120 cm，外用铝箔纸隔热减小外界温度影响，在箱体侧面中心有 2 个直径 22.5 mm 的圆孔，用于抽取气体以及测量取样时箱内温度。为使取气整体装置不漏气需将稻田里底座的凹槽（高 5 cm）加水密封，将箱体直接放置底座上，本试验在水稻移栽后 7 d 开始取样，每次取样间隔 1 周，取样时间为每日上午 8:00~11:00，于装置组成后的第 0、10、20 和 30 min 分别用外接三通阀的 20 mL 聚乙烯注射器收集空气，并同时记录箱内温度。

1.3.3 产量 于早、晚稻成熟期各小区割取 5 m²，单独收获后晒干称重计算实产。

1.3.4 土壤碳汇与温室气体排放 土壤容重=烘干土重/土壤体积；土壤孔隙度（%）=（1-土壤容重/2.65）×100；

$$\text{稻田土壤碳库 (DSOC, kg/hm}^2\text{)} = 100 \times \text{SOC} \times \text{BD} \times \text{A} \times \text{H} / \text{Y} \quad (1)$$

式中，SOC 为土壤有机碳含量（g/kg）；BD 为土壤容重（g/cm³）；A 为稻田面积（m²）；H 为耕层深度，本研究取 0.1 m；Y 为年份。

$$\text{土壤固碳速率 (DSOCP)} = \text{DSOC}_2 - \text{DSOC}_1 \quad (2)$$

式中，DSOCP 为收获时与种植前稻田土壤碳库之差（kg）。

$$\text{以 CO}_2\text{ 当量的土壤碳储量 (MCSP)} = \text{DSOC} \times 44 / 12 \quad (3)$$

式中，MCSP 为稻田秸秆还田后土壤固碳对减缓全球变暖的贡献（kg CO₂ eq/hm²）^[11]。

$$\text{减缓效益抵消率 (RMO, \%)} = \text{GWP} / \text{MCSP} \times 100 \quad (4)$$

式中，GWP 为秸秆还田后稻田增排的综合温室效应^[11]。

CH_4 排放通量 (F)= $\rho \cdot 273 / (273 + T) \cdot H \cdot dc/dt$ (5)

式中, ρ 为标准状况下 CH_4 -C 密度, dc/dt 为单位时间内气体浓度变化率; T 为气箱内平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

CH_4 累积排放量 (C)= $\sum_{i=1}^n (F_{i+1}+F_i) \times d \times 24 \times 10^{-2}$ (6)

式中, C 为采气期 CH_4 的累积排放量 ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/hm}^2$), F_i 、 F_{i+1} 分别表示第 i 次、第 $i+1$ 次气体样品排放通量; d 为前后 2 次气体测定相隔天数 (d); n 为气体监测总次数。

综合 CO_2 排放当量: 以 CO_2 当量 CH_4 排放量, 100a 的影响尺度上 1 kg CH_4 排放当量为 1 kg CO_2 的 25 倍, 单位为 $\text{kg CO}_2 \text{ eq/hm}^2$ 。

稻田温室效应 (GWP)= $25 \times \text{CE}(\text{CH}_4)$, 式中, 25 为在过去的 100a 增温尺度, $\text{CE}(\text{CH}_4)$ 为 CH_4 的增温系数^[15]。

温室气体排放强度 (GHGI , $\text{kg CO}_2 \text{ eq/hm}^2$)= GWP/Y , 式中, Y 为作物籽粒产量^[15]。

净全球增温潜势 (NGWP , $\text{kg CO}_2 \text{ eq/hm}^2$)= $\text{GWP}-\text{MSCP}$ ^[16]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 对数据进行归类整理与作图, 采用 Statistix 8.0 软件进行方差分析, 采用最小显著差法进行显著性检验, 使用 OriginPro 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式对土壤容重与孔隙度的影响

由表 2 可知, 处理与年际间交互作用对 0~10 cm 土层土壤容重与孔隙度影响不显著。2023 年在 0~10 cm 土层深度, T1 处理的土壤容重最高, T4 处理明显低于其他处理, 降幅在 2.50%~9.40%; T2 处理土壤孔隙度较 CK 和 T1 处理显著增加, T3 与 T4 处理的土壤孔隙度较 CK 处理显著增加。2024 年早稻移栽前在 0~10 cm 土层深度, T4 处理土壤容重较 CK 处理显著降低了 7.66%; T3 处理土壤孔隙度在双季稻移栽前与收获后中均表现出较高水平。2024 年, 0~10 cm 土层深度收获后较移栽前各处理土壤容重提高了 0.18%~10.55%, T3 处理的土壤容重显著低于其他处理。

表 2 不同秸秆还田方式 0~10 cm 土层土壤容重与孔隙度的影响
Table 2 Effects of different straw returning methods on the soil bulk density and porosity of 0-10 cm soil layer

处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density (g/cm^3)			土壤孔隙度 Soil porosity (%)		
	2023 年早稻移栽前 Before transplanting early rice in 2023	2024 年早稻移栽前 Before transplanting early rice in 2024	2024 年晚稻收获后 After the harvest of late rice in 2024	2023 年早稻移栽前 Before transplanting early rice in 2023	2024 年早稻移栽前 Before transplanting early rice in 2024	2024 年晚稻收获后 After the harvest of late rice in 2024
CK	1.26a	1.24a	1.28ab	52.45b	53.21b	51.68c
T1	1.28a	1.27a	1.29a	51.70b	52.08b	51.41c
T2	1.23ab	1.24a	1.28ab	53.58ab	53.21b	51.60c
T3	1.20ab	1.16b	1.19c	54.72ab	56.23a	54.99a
T4	1.17b	1.13b	1.25b	55.85a	57.36a	52.86b
处理 (T)		**			**	
年份 (Y)		**			**	
T×Y		ns			ns	

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。 “**” 代表差异极显著 ($P < 0.01$), ns 代表差异不显著, 下同。
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). “**” indicates extremely significant difference ($P < 0.01$), ns indicates no significant difference, the same below.

2.2 不同秸秆还田处理对土壤碳库和固碳量的影响

各处理间固碳量排序为 $T4 > T3 > T2 > T1 > \text{CK}$, CK 处理土壤固碳速率最差, 固碳量为 -27.28 kg/hm^2 , T4 处理土壤固碳速率最好, 固碳量为 604.65 kg/hm^2 。随年际间碳库变化趋势的斜率 (图 1) 可知, 秸秆还田处理的差异对碳库的提升效果不同, 除 CK 处理外, 其他处理影响显著, 说明影响土壤固碳量增加的因素中, 秸秆施用量是主要因素, 其中对土壤碳库影响最大的因素是秸秆焚烧。

2.3 不同秸秆还田方式对 CH_4 排放通量的影响

由图 2 所知, 在不同的秸秆还田处理方式下, CH_4 的排放动态存在差异。2023 年早稻季和 2024 年早稻季有 2 个排放峰值, 均为分蘖期和齐穗期; 2023 年晚稻季和 2024 年晚稻季有 1 个排放峰值, 在分蘖期。2 年内排放峰值变化不大, 晚稻季的 CH_4 排放通量高于早稻季。其中 T4 处理的排放峰值在早晚稻季均最高, 排放通量范围在 $28.02 \sim 51.60 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。双季稻秸秆还田处理与秸秆

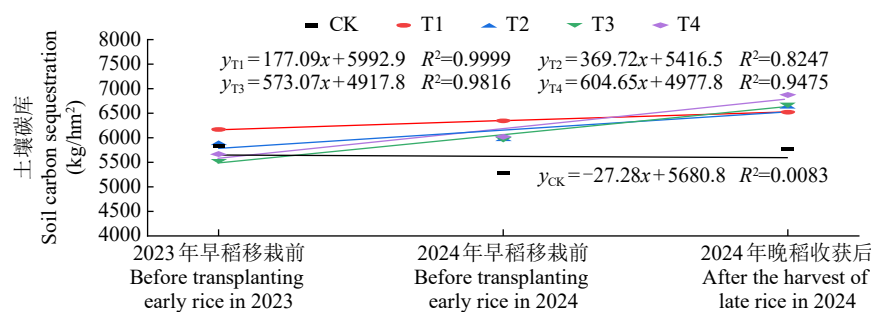


图 1 不同秸秆还田方式对土壤碳库的影响
Fig.1 Effects of different straw returning methods on DSOC

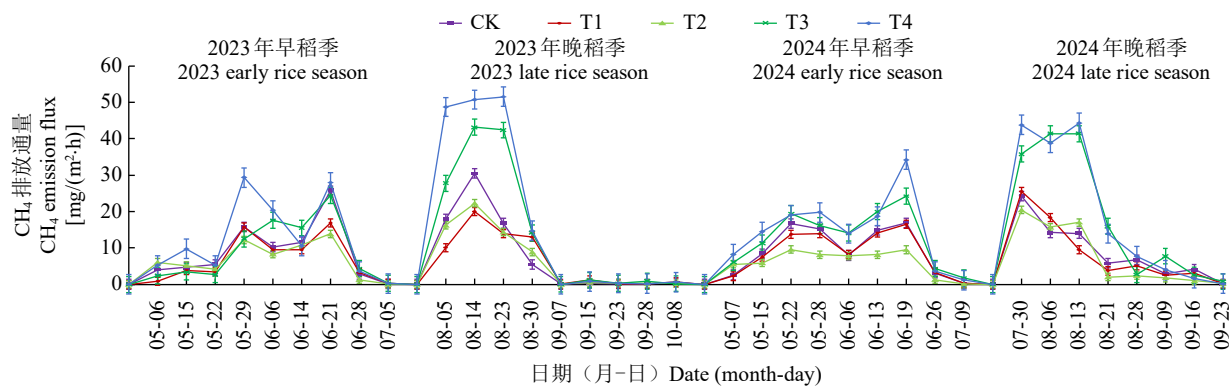


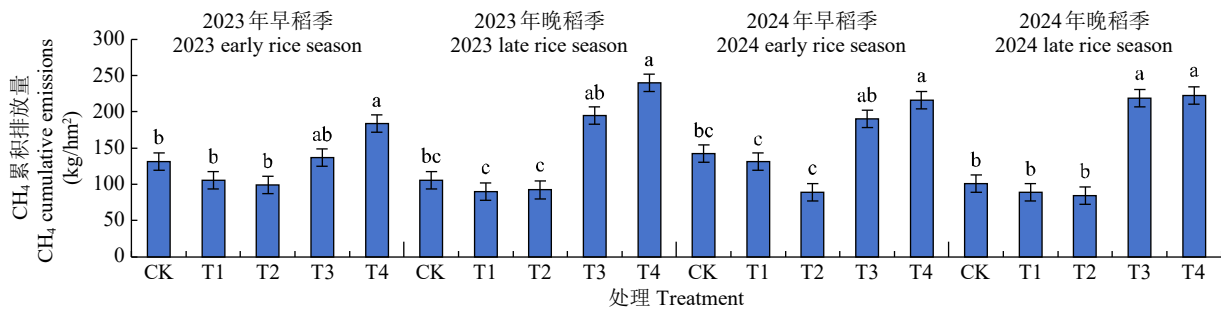
图 2 不同秸秆还田方式对 CH₄ 排放通量的影响
Fig.2 Effects of different straw returning methods on CH₄ emission fluxes

不还田处理的排放通量变化范围分别是 0.04~30.50 mg/(m²·h)和 0.01~51.60 mg/(m²·h)。

2.4 不同秸秆还田方式对 CH₄ 累积排放量的影响

由图 3 和表 3 可知，不同的秸秆还田处理对 CH₄ 累积排放量产生显著影响，在早稻季处理和年

份存在交互作用，对晚稻季和周年 CH₄ 累积排放量而言这种交互作用不显著。2023 年早稻季中，与 CK 处理相比，T3 和 T4 处理的 CH₄ 累积排放量分别提高了 4.15%和 39.74%，T1 和 T2 处理分别降低了 18.89%和 24.89%。2023 年晚稻季中，与 CK 处



不同小写字母代表不同秸秆处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences among different straw treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同秸秆还田方式对 CH₄ 累积排放量的影响

Fig.3 Effects of different straw returning methods on CH₄ cumulative emissions

理相比，T3 和 T4 处理的 CH₄ 累积排放量分别提高了 85.67%和 129.22%，T1 和 T2 处理分别降低了 12.10%和 14.40%。2024 年早稻季中，与 CK 处理相比，T3 和 T4 处理的 CH₄ 累积排放量分别提高了 34.09%和 51.90%，T1 和 T2 处理分别降低了 7.40%和 37.20%。2024 年晚稻季中，与 CK 处理相比，

表 3 不同秸秆还田方式下 CH ₄ 累积排放量的方差分析			
Table 3 Variance analysis of CH ₄ cumulative emissions under different straw returning methods			
变异来源	CH ₄ 累积排放量 CH ₄ cumulative emissions		
Source of variation	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	周年 Anniversary
处理 Treatment (T)	**	**	**
年份 Year (Y)	**	ns	ns
T×Y	**	ns	ns

T3 和 T4 处理的 CH₄ 累积排放量分别提高了 116.80%和 120.55%。T4 处理的 CH₄ 累积排放总量是 T3 处理的 1.16 倍。4 个水稻季中，T2 处理的 CH₄ 累积排放量最低，为 364.88 kg/hm²。

2.5 不同秸秆还田方式对稻田水稻产量和稻田温室效应的影响

由表 4 和图 4 可知，不同的秸秆还田处理对周年水稻产量产生显著影响，在早稻季处理和年份存在交互作用，对晚稻季和周年水稻产量而言这种交互作用不显著。2023 年两季中，除 T4 处理产量低于 CK 处理外，秸秆还田处理下产量均高于秸秆不还田处理；2024 年两季中，T4 处理产量较 2023 年

有所提升，秸秆还田处理下产量均高于秸秆不还田处理。所有处理均未对产量造成不良影响。

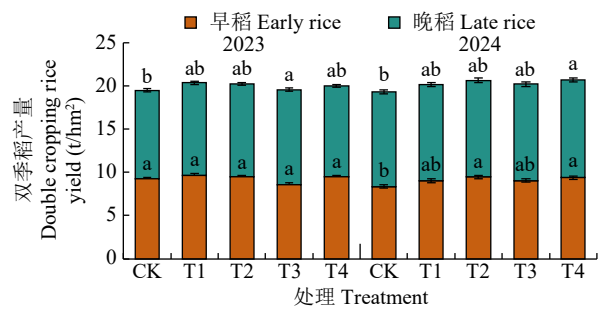


图 4 不同秸秆还田方式对产量的影响
Fig.4 Effects of different straw returning methods on yield

由表 5 可知，2 年试验中，与 CK 处理相比，T1 和 T2 处理 GWP 显著降低，T4 处理的 GWP 高于 T3 处理，差异显著。2023 年早稻季中 T2 处理下 GHGI 最低，显著低于 CK 和 T3 处理，晚稻季中 T1 处理下 GHGI 最低，显著低于 T4 处理；2024 年早晚稻季中 T2 处理下 GHGI 最低，显著低于其他处理。综合来看，T1 与 T2 处理会降低 GWP 和

表 4 不同秸秆还田方式下产量的方差分析			
Table 4 Analysis of variance of yield under different straw returning methods			
变异来源	产量 Yield		
Source of variation	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	周年 Anniversary
处理 Treatment (T)	**	**	**
年份 Year (Y)	**	ns	ns
T×Y	**	ns	ns

表 5 不同秸秆还田方式对稻田温室效应的影响								
Table 5 Effects of different straw returning methods on greenhouse effect in paddy field								
处理 Treatment	2023				2024			
	综合温室效应 GWP		温室气体排放强度 GHGI		综合温室效应 GWP		温室气体排放强度 GHGI	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
CK	3294.96ab	2629.20bc	0.45ab	0.32bc	3554.27c	2519.77b	0.53b	0.29b
T1	2639.70b	2253.41c	0.34b	0.27c	3290.84c	2223.71b	0.46b	0.25b
T2	2472.96b	2308.10c	0.33b	0.27c	2231.92d	2108.91b	0.30c	0.24b
T3	3431.84a	4872.07ab	0.50ab	0.57ab	4765.96b	5462.85a	0.66a	0.61a
T4	3190.34ab	5448.57a	0.60a	0.64a	5399.48a	5557.38a	0.81a	0.51a

GHGI，T3 与 T4 处理会增加稻田 GWP 和 GHGI。

2.6 不同秸秆还田方式对土壤固碳效益和 NGWP 的影响

由表 6 可知，除 2024 年 T2 处理下增排温室气体的 GWP 小于土壤固碳效益外，各秸秆还田处理增排温室气体的 GWP 均可完全抵消秸秆还田在土壤中的固碳减排效益，减缓效益抵消率在 125.30%~391.19%。且 2 年间 T1 和 T2 处理的 RMO 均低于 T3 和 T4 处理。2024 年 T2、T3 和 T4 处理的 RMO 较 2023 年分别降低了 63.09%、75.45%和 110.61%。与 CK 处理相比，2 年间除 T2 处理外其他处理的 NGWP 变化趋势一致，T2 处理由于生物炭的多孔结构可通过物理吸附作用截留 CH₄，减少了 CH₄ 的排放，从而降低了 NGWP。

表 6 不同秸秆还田方式对土壤固碳效益和 NGWP 的影响
Table 6 Effects of different straw returning methods on soil carbon sequestration benefit and NGWP

年份 Year	处理 Treatment	DSOC (kg/hm ²)	MCSP (kg CO ₂ eq/hm ²)	GWP (kg CO ₂ eq/hm ²)	减缓 效益 抵消率 RMO (%)	净全球 增温潜能 NGWP (kg CO ₂ eq/hm ²)
2023	CK	5282.66	—	—	—	—
	T1	6348.23	3905.00	4893.11	125.30	988.11
	T2	5959.11	2478.67	4781.06	192.89	2302.39
	T3	5973.30	2530.00	8303.91	328.14	5771.91
	T4	6022.80	2713.33	8638.91	391.19	7901.03
2024	CK	5770.75	—	—	—	—
	T1	6523.60	2101.00	5514.55	262.97	3413.55
	T2	6624.07	3131.33	4340.82	138.77	1209.49
	T3	6682.32	3344.00	10 228.81	306.07	6884.81
	T4	6873.91	4048.00	10 956.86	270.94	6908.86

3 讨论

3.1 不同秸秆还田方式对固碳量和土壤碳库的影响

秸秆还田能提升稻田土壤的碳汇功能。双季稻秸秆还田后,土壤容重较不还田处理显著下降,不同秸秆处理对土壤容重的影响不同,T4 处理土壤容重显著高于其他处理,但其他各处理间差异不显著,秸秆还田处理较不还田处理的土壤孔隙度显著增大,与前人^[17]研究结果一致。本研究结果表明,T3 和 T4 处理的固碳量均高于其他处理,这可能是由于秸秆直接还田归还了秸秆量,在短期内提供更多的有机碳源,从而在固碳能力上表现更为显著。但二者固碳量接近,原因可能是减量还田处理中根部留茬 20 cm 的秸秆还田效率高。

稻田的 RMO 是增排的 GWP 与 MSCP 的比值,本试验中,对比土壤温室气体碳排和碳汇的数值结果,土壤固碳并未完全抵消碳排,2023 和 2024 年各处理的 RMO 均高于 100%,但 2024 年 T2 和 T4 处理 RMO 均显著下降,改善了秸秆分解条件,促进了更多的土壤固碳量并减少了 GWP,但增排的稻田温室效应未完全抵消土壤固碳减排效益。这与陈丽明^[18]的研究结果一致,秸秆生物炭还田在固碳方面表现出色,甚至优于传统的秸秆还田方式,本研究条件下 2 年间 T2 处理的 RMO 均小于其他秸秆直接还田处理,与前人^[19]结果相同。本试验中,秸秆直接还田处理会促进土壤 CH₄ 的排放,引起 NGWP 增加^[20],秸秆间接还田处理中的 T2 处理因施用生物炭,其发达的孔隙结构和更多的稳定碳有助于减少土壤中厌氧微环境的形成,从而进一步抑制产甲烷菌的活性,在第 2 年实现 NGWP 显著下降(1209.49 kg CO₂ eq/hm²),固碳—减排协同性提升。本研究用 RMO 和 NGWP 来衡量土壤固碳和甲烷减排能力,均显示 T2 处理对土壤的固碳减排有良好效果,但数据仅有 2 年,还需多年监测证实其对土壤固碳减排的影响。

3.2 不同秸秆还田方式对 CH₄ 排放和稻田温室效应的影响

本研究条件下,早稻全生育期出现 2 个排放峰值,在移栽后 7 d 出现第 1 个排放峰值,移栽后 21 d 出现第 2 个排放峰值,与吴健成等^[21]研究结果一致。不同的秸秆处理方式对 CH₄ 累积排放量有显著影响,秸秆直接还田处理的 CH₄ 累积排放量显著高于其他处理,原因可能是秸秆还田初期,秸秆和淹水的存在会迅速激发 CH₄ 产生菌的生长,导致

CH₄ 排放量增加。有研究^[22]显示随着秸秆还田量增加,CH₄ 排放量也可能随之增加,本研究中 T3 处理的 CH₄ 累积排放量低于秸秆全量还田处理,这与前人^[23]研究一致。Qian 等^[24]研究发现,在 CO₂ 浓度升高的条件下,随着秸秆还田年限的延长,稻田 CH₄ 排放有降低的趋势,但在本研究条件下,第 2 年秸秆还田处理的 CH₄ 累积排放量高于第 1 年,这可能是还田年限短的原因。陈立天等^[19]研究表明,施加生物炭可改善稻田土壤通透性,在缺氧条件下增加甲烷氧化菌丰度并降低产甲烷菌与甲烷氧化菌丰度的比率,在一定程度上可抑制 CH₄ 排放,与本文研究结果一致。目前,关于秸秆烧灰还田下 CH₄ 排放通量的研究较少,在本研究条件下,T1 处理的 CH₄ 累积排放量与 CK 处理相比有所降低,这可能与产甲烷菌的丰度有关,但具体原因有待进一步研究。

合理施用生物炭及秸秆焚烧可降低稻田温室效应。本研究条件下,T1 与 T2 处理的 GWP 显著低于秸秆直接还田处理,不同的秸秆还田方式对于温室气体排放和农作物产量的影响存在差异,使得 GHGI 也产生差异,本研究中 T1 与 T2 处理的 GHGI 显著低于秸秆直接还田处理。我国的人口和资源现状决定了稻田 CH₄ 减排技术创新必须以水稻丰产为前提,T1 和 T2 处理下,产量均保持在较高水平,可见 T1 和 T2 处理在平衡经济和环境效益中具有一定的优势。本文通过构建 GHGI、RMO 以及 NGWP 的评价模型,量化不同还田方式的生态经济阈值,阐明了秸秆还田方式对稻田多界面过程的调控机制,为农业绿色低碳发展提供了理论依据与技术选择框架。

4 结论

T1 和 T2 处理均降低了稻田 CH₄ 累积排放量、GWP 和 GHGI,且对产量无显著不良影响。T2、T3 和 T4 处理秸秆固碳能力较高,有助于 RMO 的降低。T2 处理在第 2 年实现 NGWP 显著下降,固碳—减排协同性提升;T4 处理增加了土壤固碳量,有机碳是产生 CH₄ 的重要底物,增加 CH₄ 排放从而增加了 NGWP。尽管秸秆直接还田刺激了土壤温室气体排放,但通过增加土壤有机碳固存和提高籽粒产量,在一定程度上缓解了气候变化的负面影响。因此,在温室气体减排优先区域推荐 T2 处理,在土壤修复与固碳优先区域推荐 T4 处理。

参考文献

[1] 张洪程,胡雅杰,杨建昌,等. 中国特色水稻栽培学发展与展

- 望. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1301-1321.
- [2] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [3] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2518-2525.
- [4] Wang X K, Lu F, Han B, et al. Carbon sequestration by cropland soil in China: Potential and feasibility. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2009, 6(24): 242041.
- [5] 周静雯, 向钦佩, 项金金, 等. Meta 分析生物炭对我国农田土壤的增汇减排效应. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2024, 47(5): 422-429.
- [6] 戴相林, 刘雅辉, 孙建平, 等. 秸秆还田和氮肥减施对滨海盐渍水稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响. 应用与环境生物学报, 2023, 29(4): 994-1005.
- [7] 黄琼, 朱小莉, 沈皖豫, 等. 秸秆还田年限及还田量对稻田净温室效应的影响. 土壤, 2022, 54(5): 912-919.
- [8] 柴凯斌. 秸秆还田对稻麦系统作物产量及温室气体排放的影响. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [9] 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 等. 添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响. 环境科学, 2022, 43(12): 5819-5831.
- [10] 徐建明, 王艳红, 刘忠珍, 等. 有机物料还田对稻田土壤温室气体排放及产量的影响. 中国农学通报, 2024, 40(36): 95-101.
- [11] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷减排. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99-108.
- [12] 李飞跃, 汪建飞. 生物炭对土壤 N₂O 排放特征影响的研究进展. 土壤通报, 2013, 44(4): 1005-1009.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析: 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 李庆逵, 鲁如坤, 陈家坊. 土壤分析法: 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1965.
- [15] 李成伟, 刘章勇, 龚松玲, 等. 稻作模式改变对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响. 生态环境学报, 2022, 31(5): 961-968.
- [16] Wu Z, Zhang X, Dong Y B, et al. Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278: 107625.
- [17] 苏扬, 商小兰, 钱忠明, 等. 腐熟剂与生物炭协同强化秸秆还田对土壤质量和水稻生长的影响. 浙江农业学报, 2025, 37(5): 1139-1148.
- [18] 陈丽明. 长期秸秆还田下双季稻田土壤碳氮转化特征及其微生物学机制. 南昌: 江西农业大学, 2020.
- [19] 陈立天, 刘玉学, 何莉莉, 等. 水稻秸秆生物炭对南方稻田土壤的固碳减排效应. 土壤通报, 2024, 55(3): 686-694.
- [20] 孙亚楠, 段琳博, 钟华昱, 等. 温室气体排放与番茄产量对水肥气耦合的响应机制研究. 农业机械学报, 2024, 55(5): 312-322.
- [21] 吴健成, 刘卿, 汪翠存, 等. 秸秆还田与氮肥施用对稻田温室气体排放的影响. 生态学报, 2024, 44(12): 5328-5339.
- [22] 朱雅婷, 倪远之, 张敏, 等. 不同秸秆还田量对上海地区稻田甲烷排放的影响. 浙江农业学报, 2023, 35(10): 2436-2445.
- [23] 杨正宇, 李宗明, 李言言, 等. 连续 11 年不同秸秆还田量下稻田甲烷减排效应变化研究. 土壤学报, 2025, 62(4): 1115-1126.
- [24] Qian H Y, Huang S, Chen J, et al. Lower-than-expected CH₄ emissions from rice paddies with rising CO₂ concentrations. Global Change Biology, 2020, 26(4): 2368-2376.

Effects of Double Cropping Rice Straw Returning Method on Soil Organic Carbon Fixation and Methane Emission Intensity

Liang Wei¹, Li Hu², Zheng Huabin¹, Wang Weiqin¹, Tang Qiyan¹

(¹College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China;

²Yueyang Academy of Agricultural Sciences, Yueyang 414022, Hunan, China)

Abstract To investigate the effects of different straw returning treatments on soil carbon sequestration and greenhouse gas emissions in paddy fields, this study was conducted in Yueyang County, Yueyang City, Hunan Province from 2023 to 2024. The double cropping rice model was used as the research object, and five rice straw treatment methods were set up under conventional fertilization conditions: no straw returning (CK), straw ash returning (T1), straw carbonization returning (T2), straw reduction returning (T3), and total straw returning (T4). The effects of straw treatment on soil physicochemical properties, soil carbon sequestration, CH₄ emissions, greenhouse effect in paddy fields, and rice yield were observed in situ in the field. The results showed that among the factors affecting the increase of soil carbon sequestration, straw application was the main factor. Among them, the carbon sequestration of T4 treatment was the highest (604.65 kg/ha). There were two peaks in CH₄ emission flux during the early rice season, namely the tillering stage and the full heading stage. There was one emission peak during the late rice season, which was the full heading stage. Among the four rice seasons, the cumulative CH₄ emission of T2 treatment was the lowest (364.88 kg/ha). The mitigation benefit offset efficiency (RMO) of each straw returning treatment ranged from 138.77% to 391.73%. The RMO of T2, T3, and T4 treatments decreased in 2024, indicating an improvement in their carbon sequestration and emission reduction benefits in soil. Overall, T4 treatment increases soil carbon sequestration and soil porosity, reduces soil bulk density, and promotes carbon sequestration in paddy fields. T2 treatment reduces the CH₄ cumulative emissions and greenhouse effect of paddy fields, promoting emission reduction in rice fields. Therefore, T2 treatment is recommended for CH₄ reduction priority areas, and T4 treatment is recommended for soil remediation and carbon sequestration priority areas.

Key words Double cropping rice; Straw returning; Biochar; Soil carbon sequestration amount; Methane