

# 超级稻+再生稻低碳高效栽培对稻田温室气体排放的影响研究

李新建<sup>1</sup>, 寸德志<sup>2</sup>, 简珂<sup>2</sup>, 李昌洪<sup>2</sup>, 彭冬梅<sup>2</sup>, 滕艳红<sup>2</sup>, 黄小芳<sup>2</sup>

1. 广西农业灌溉排水工程技术研究中心, 广西桂林

2. 广西儒泉工程设计咨询有限公司, 广西桂林

DOI:10.62836/environment.v3i2.1260

**摘要:** 为落实国家“双碳”战略, 支撑桂林国家可持续发展议程创新示范区建设, 本研究以超级早稻+再生晚稻种植体系为对象, 采用静态暗箱—气相色谱法原位监测稻田CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>排放通量, 系统对比低碳栽培与常规栽培模式下温室气体排放特征、季节动态及综合增温潜势。结果表明, 与常规栽培相比, 低碳栽培可降低CH<sub>4</sub>排放49.89%、N<sub>2</sub>O排放83.33%; 早稻总排放当量19.16t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>, 再生稻季7.50 t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>, 周年综合排放当量26.66t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>, 较常规栽培减排41.24%。研究证实, 超级稻+再生稻低碳栽培可实现稳产保供与温室气体协同减排, 为我国南方稻区低碳高效生产提供理论依据与技术支撑。

**关键词:** 超级稻; 再生稻; 低碳栽培; 温室气体; 甲烷; 氧化亚氮; CO<sub>2</sub>当量

---

## Study on the Effect of Low-Carbon and High-Efficiency Cultivation of Super Rice+Ratoon Rice on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields

Xinjian Li<sup>1</sup>, Dezhi Cun<sup>2</sup>, Ke Lin<sup>2</sup>, Changhong Li<sup>2</sup>, Dongmei Peng<sup>2</sup>, Yanhong Teng<sup>2</sup>, Xiaofang Huang<sup>2</sup>

1. Guangxi Engineering Research Center for Agricultural Irrigation and Drainage, Guilin, Guangxi

2. Guangxi Ruquan Engineering Design Consulting Co., Ltd., Guilin, Guangxi

**Abstract:** To implement the national “Dual Carbon” strategy and support the construction of the Guilin National Innovation Demonstration Zone for the Sustainable Development Agenda, this study took the super early rice+ratoon late rice cropping system as the research object. The static closed chamber-gas chromatography method was used to in-situ monitor the emission fluxes of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> from paddy fields. The greenhouse gas emission characteristics, seasonal dynamics and comprehensive global warming potential under low-carbon cultivation and conventional cultivation modes were systematically compared. The results showed that, compared with conventional cultivation, low-carbon cultivation reduced CH<sub>4</sub> emissions by 49.89% and N<sub>2</sub>O emissions by 83.33%. The total emission equivalent of early rice was 19.16 t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>, that of the ratoon rice season was 7.50 t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>, and the annual comprehensive emission equivalent was 26.66 t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>, representing a 41.24% reduction compared with conventional cultivation. This study confirmed that low-carbon cultivation of super rice + ratoon rice can achieve stable grain yield and synergistic mitigation of greenhouse gas emissions, providing a theoretical basis

and technical support for low-carbon and efficient production in rice-growing areas of southern China.

**Keywords:** super rice; ratoon rice; low-carbon cultivation; greenhouse gases; methane; nitrous oxide; CO<sub>2</sub> equivalent

## 1 引言

我国是世界上最大的水稻生产与消费国。农业温室气体排放是目前国际国内研究的热点问题[1]。稻田是农业源CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的重要排放源,在全球温室气体清单中占据重要地位[2]。超级稻+再生稻模式因生育期配置合理、省工节本、稳产高效,已成为我国南方双季稻区主推种植模式。2017年袁隆平院士在广西灌阳超级稻+再生稻试验基地测产结果显示:超级稻产量15141.75kg·hm<sup>-2</sup>,再生稻7816.5kg·hm<sup>-2</sup>,周年总产量突破22500kg·hm<sup>-2</sup>,创高产纪录。然而,常规长期淹水灌溉与经验施肥导致稻田温室气体排放强度偏高,如何通过低碳栽培技术实现粮食安全与生态减排协同增效,已成为稻作绿色发展的核心科学问题。

目前,国内外围绕单季稻、双季稻温室气体排放规律及水肥调控已开展大量研究,但针对南方喀斯特岩溶区气候水文条件、超级早稻(120~130d)+再生晚稻(60~80d)特殊生育期结构、留茬再生特性及干湿交替频繁的稻田生态系统,系统开展CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>综合排放特征、减排潜力及低碳栽培调控机制的研究仍较薄弱。本研究以超级稻+再生稻连作体系为对象,阐明低碳栽培对稻田温室气体排放的调控机制,量化减排效应与综合增温潜势,为区域稻田低碳生产、碳足迹核算及农业碳汇提升提供科学依据,为桂林国家可持续发展议程创新示范区建设提供科技支撑。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验概况

试验选择在灌阳袁隆平超级稻+再生稻永久试

验基地及全州县全国种粮大户广西德沁农业旗下的“禾美稻香”合作社典型稻作区进行,供试土壤为水稻土,基础理化性状:有机质26.3g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.83g·kg<sup>-1</sup>,有效磷13.3mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾89.6mg·kg<sup>-1</sup>,pH6.5。供试品种为华浙优261;种植模式为超级早稻(125d)+再生晚稻(60d)。

### 2.2 试验设计

#### 2.2.1 试验处理

设2个处理,3次重复,小区面积66.67m<sup>2</sup>(1分地):

(1) 低碳栽培(T): 超级早稻+再生晚稻连作低碳栽培

1) 水分管理: 间歇灌溉(浅水插秧、够苗晒田、孕穗湿润、成熟前断水)[3];

2) 施肥管理: 基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2, N 197.55kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 114.75kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 300.75kg·hm<sup>-2</sup>;

3) 稻秆管理: 早稻稻秆粉碎浅旋还田,减少厌氧腐解。

(2) 对照组(CK): 超级早稻+再生晚稻连作常规栽培

淹水灌溉、常规施肥: N 319.88kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 95.63kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 455.63kg·hm<sup>-2</sup>,早稻稻秆未粉碎还田。

#### 2.2.2 采样装置(静态暗箱)

底座: 硬质 φ450PVC, 入土8~10cm, 水封槽深2cm, 全程固定不移动。

箱体: 硬质 φ500PVC, 分段式(顶箱+中段箱), 外包保温铝箔, 内置小风扇混匀气体, 设温度探头与采气口。

高度：早稻分蘖期0.6m，拔节-成熟期1.2m；  
再生稻全程0.6–0.8m（如图1）。

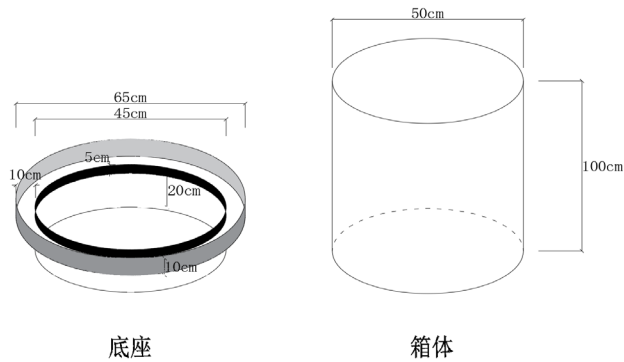


图1. 静态暗箱大样图

### 2.2.3 观测时段与频率

早稻：移栽/直播后次日起，每7天1次；施肥、晒田、灌水、灌浆期加密至3–5天1次。

再生稻：头季收割次日起，每5–7天1次，直至收获。

采样时间：9:00–11:00（代表日均通量），单次闭箱时间30min。

## 2.3 气体采集与测定

采用静态暗箱-气相色谱法测定CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>通量。采样时间为9:00–11:00，箱内气体混匀→水封，闭箱30min，分别在0、10、20、30min采气，用50mL注射器抽气→注入真空瓶；24h内使用气相色谱仪（GC-ECD/FID）测定气体浓度[4-6]。

## 2.4 数据计算

排放通量计算公式：

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{273+T}$$

F：排放通量（mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>）

ρ：标准状态气体密度（CH<sub>4</sub>：0.714kg·m<sup>-3</sup>；

N<sub>2</sub>O：1.964kg·m<sup>-3</sup>；CO<sub>2</sub>：1.977kg·m<sup>-3</sup>）

V/A：箱体积/底面积

Δc/Δt：浓度变化率

T：箱内温度（℃）

全球增温潜势采用IPCC AR5(100a)：CH<sub>4</sub>=28，N<sub>2</sub>O=265，CO<sub>2</sub>=1。数据采用Excel进行统计分析（如表1-6）。

表1. 早稻不同生育期CH<sub>4</sub>排放量（kg·hm<sup>-2</sup>）观测记录

处理	返青期				分蘖期				拔节孕穗期			
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4	
CK	5.0	12.6	15.1	17.6	22.0	25.2	15.7	14.6	21.9	18.2	18.2	
低碳栽培	3.3	8.3	6.9	9.1	9.5	11.0	11.0	10.0	12.7	9.1	13.6	
处理	抽穗开花期				灌浆成熟期					合计		
	1	2	3		1	2	3	4	5			
CK	35.9	26.9	26.9		5.6	4.5	4.0	4.5	3.8	298.2		
低碳栽培	12.4	10.0	13.2		2.2	2.1	2.0	1.5	2.2	150.0		

表2. 再生稻不同生育期CH<sub>4</sub>排放量（kg·hm<sup>-2</sup>）观测记录

处理	再生萌芽期		再生苗生长期			幼穗分化期			抽穗开花期		灌浆成熟期		合计
	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	
CK	1.25	0.83	0.97	0.83	0.97	0.83	1.11	0.83	2.29	1.88	1.23	0.85	13.90
低碳栽培	0.51	0.51	0.51	0.38	0.38	0.28	0.70	0.42	0.84	0.63	0.60	0.62	6.40

表3. 早稻不同生育期N<sub>2</sub>O排放量 (kg · hm<sup>-2</sup>) 观测记录

处理	返青期				分蘖期			拔节孕穗期			
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
CK	1.78	6.23	5.34	4.45	5.03	5.74	3.59	2.61	3.92	3.27	3.27
低碳栽培	0.33	0.91	0.69	0.83	0.68	0.79	0.79	0.46	0.58	0.42	0.62

处理	抽穗开花期			灌浆成熟期					合计
	1	2	3	1	2	3	4	5	
CK	0.67	0.89	0.67	0.20	0.22	0.28	0.22	0.19	48.56
低碳栽培	0.14	0.17	0.18	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	7.77

表4. 再生稻不同生育期N<sub>2</sub>O排放量 (kg · hm<sup>-2</sup>) 观测记录

处理	再生芽萌发期		再生苗生长期			幼穗分化期			抽穗开花期		灌浆成熟期		合计
	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	
CK	1.41	0.94	0.98	1.15	1.15	1.48	1.48	1.97	3.27	4.00	2.31	3.32	23.44
低碳栽培	0.36	0.36	0.18	0.24	0.18	0.18	0.27	0.44	0.47	0.63	0.47	0.46	4.23

表5. 早稻不同生育期CO<sub>2</sub>排放量 (kg · hm<sup>-2</sup>) 观测记录

处理	返青期				分蘖期			拔节孕穗期			
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
CK	118.4	355.2	296.0	414.4	651.1	911.6	1041.8	739.9	739.9	887.9	591.9
低碳栽培	170.3	354.9	425.8	468.4	677.4	580.7	677.4	774.2	516.1	722.6	567.8

处理	抽穗开花期			灌浆成熟期					合计
	1	2	3	1	2	3	4	5	
CK	994.4	1325.9	994.4	443.9	301.9	319.6	355.2	355.2	11838.6
低碳栽培	903.3	1129.1	1193.6	823.3	823.3	748.4	561.3	785.8	12903.7

表6. 再生稻不同生育期CO<sub>2</sub>排放量 (kg · hm<sup>-2</sup>) 观测记录

处理	再生芽萌发期		再生苗生长期			幼穗分化期			抽穗开花期		灌浆成熟期		合计
	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	
CK	616.8	411.2	619.7	531.2	619.7	359.8	479.8	359.8	534.0	436.9	438.1	304.4	5711.4
低碳栽培	619.6	619.6	644.4	483.3	483.3	260.2	650.6	390.4	635.7	479.6	455.4	474.0	6196.3

### 3 结果与分析

#### 3.1 稻田CH<sub>4</sub>排放特征

常规栽培下，早稻CH<sub>4</sub>总排放量298.2kg·hm<sup>-2</sup>，再生稻13.90kg·hm<sup>-2</sup>；排放主要集中于淹水分蘖期与稻秆腐解期。低碳栽培下，早稻CH<sub>4</sub>排放量150.0kg·hm<sup>-2</sup>，再生稻6.40kg·hm<sup>-2</sup>，较常规栽培平均降低49.89%，排放峰值显著下降（如图2-3）。

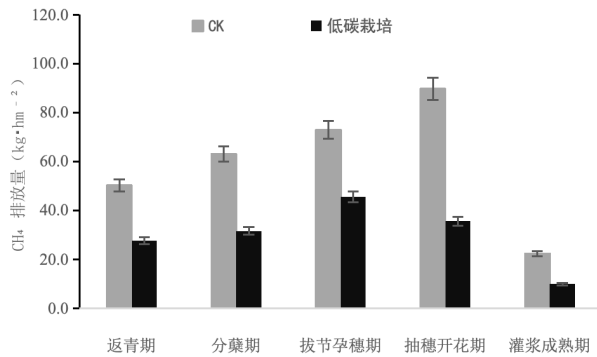


图2. 超级稻+再生稻（早稻）不同生育期CH<sub>4</sub>累积排放量 (kg·hm<sup>-2</sup>)

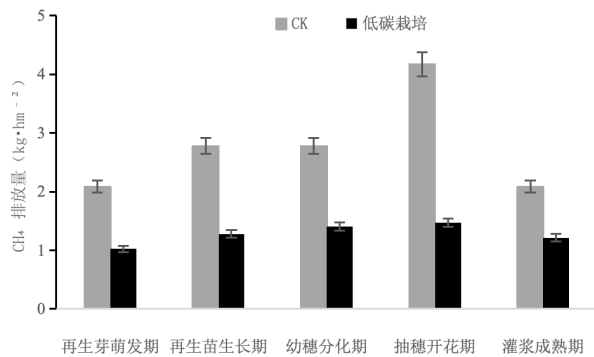


图3. 超级稻+再生稻不同生育期CH<sub>4</sub>累积排放量 (kg·hm<sup>-2</sup>)

#### 3.2 稻田N<sub>2</sub>O排放特征

常规栽培早稻N<sub>2</sub>O总排放量48.56kg·hm<sup>-2</sup>，再生稻23.44kg·hm<sup>-2</sup>。低碳栽培下，早稻N<sub>2</sub>O排放量7.77kg·hm<sup>-2</sup>，再生稻4.23kg·hm<sup>-2</sup>，较常规模式降低83.33%，氮素损失与温室气体排放得到有效抑制（如图4-5）。

#### 3.3 稻田CO<sub>2</sub>排放特征

CO<sub>2</sub>主要来自生态系统呼吸，低碳栽培对土壤—作物系统呼吸无显著抑制作用，保证了正常物质代谢与作物生长。常规栽培早稻CO<sub>2</sub>总排放量11838.6kg·hm<sup>-2</sup>，再生稻5711.4kg·hm<sup>-2</sup>；低碳栽培早稻12903.7kg·hm<sup>-2</sup>，再生稻6196.3kg·hm<sup>-2</sup>，较常规栽培平均升高8.83%（如图6-7）。

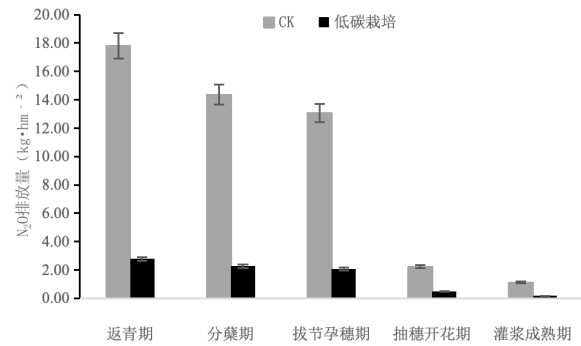


图4. 超级稻+再生稻（早稻）不同生育期N<sub>2</sub>O累积排放量 (kg·hm<sup>-2</sup>)

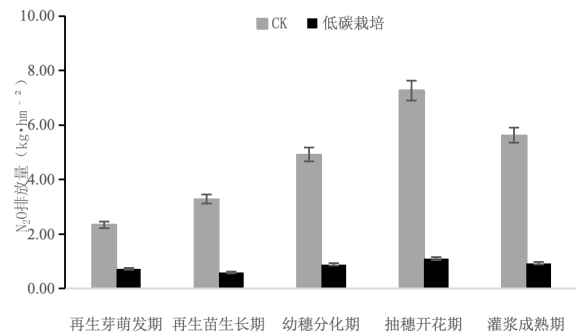


图5. 超级稻+再生稻不同生育期N<sub>2</sub>O累积排放量 (kg·hm<sup>-2</sup>)

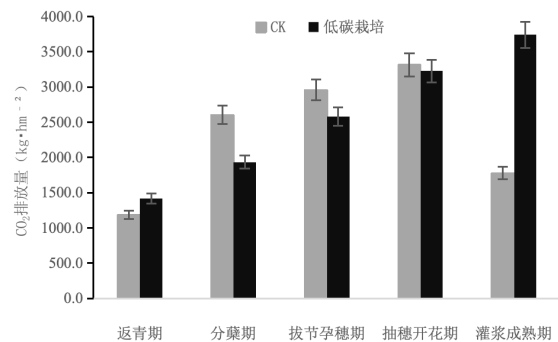


图6. 超级稻+再生稻（早稻）不同生育期CO<sub>2</sub>累积排放量 (kg·hm<sup>-2</sup>)

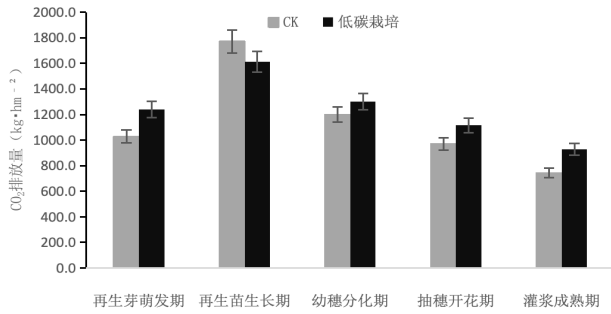


图7. 超级稻+再生稻不同生育期CO<sub>2</sub>累积排放量 (kg·hm<sup>-2</sup>)

### 3.4 综合温室气体排放当量

#### 3.4.1 超级稻+再生稻不同生育期CH<sub>4</sub>累积排放当量

常规栽培早稻CH<sub>4</sub>总排放当量8.35t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>，再生稻CH<sub>4</sub>总排放当量0.39t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>；低碳栽培早稻CH<sub>4</sub>总排放当量4.20t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>，再生稻CH<sub>4</sub>总排放当量0.18t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>。与常规栽培模式比较，低碳栽培早稻CH<sub>4</sub>总排放当量降低49.70%，再生稻CH<sub>4</sub>总排放当量降低53.96%（如图8-9）[7-9]。

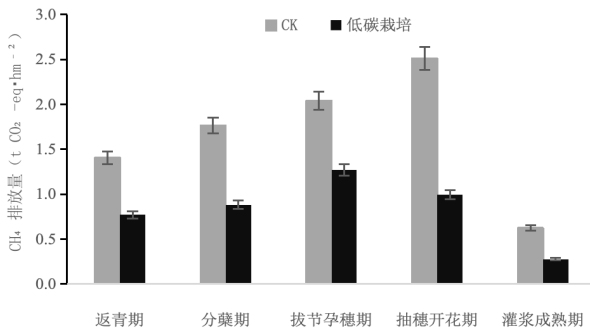


图8. 超级稻+再生稻（早稻）不同生育期CH<sub>4</sub>累积排放当量 (t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>)

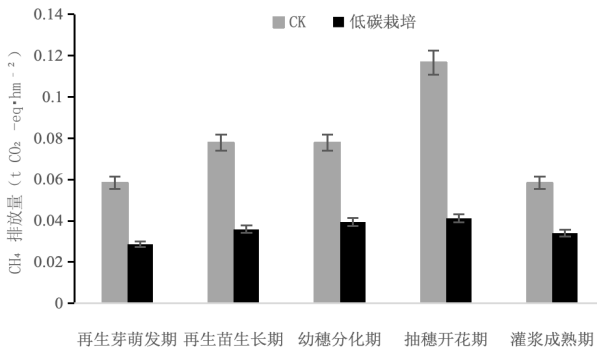


图9. 超级稻+再生稻不同生育期CH<sub>4</sub>累积排放当量 (t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>)

#### 3.4.2 超级稻+再生稻不同生育期N<sub>2</sub>O累积排放当量

常规栽培早稻N<sub>2</sub>O总排放当量12.87t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>，再生稻N<sub>2</sub>O总排放当量6.21t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>；低碳栽培早稻N<sub>2</sub>O总排放当量2.06t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>，再生稻N<sub>2</sub>O总排放当量1.12t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>。与常规栽培模式比较，低碳栽培早稻N<sub>2</sub>O总排放当量降低84.00%，再生稻N<sub>2</sub>O总排放当量降低81.96%（如图10-11）[10]。

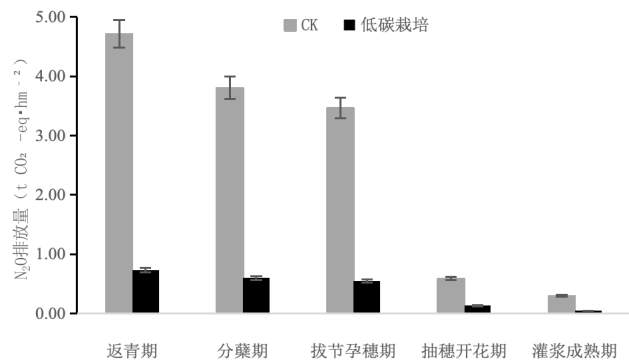


图10. 超级稻+再生稻（早稻）不同生育期N<sub>2</sub>O累积排放当量 (t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>)

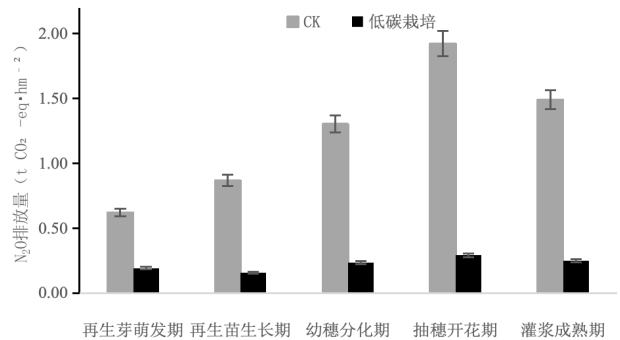


图11. 超级稻+再生稻不同生育期N<sub>2</sub>O累积排放当量 (t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>)

#### 3.4.3 超级稻+再生稻不同生育期CO<sub>2</sub>累积排放当量

常规栽培早稻CO<sub>2</sub>总排放当量11.84t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>，再生稻CO<sub>2</sub>总排放当量5.71t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>；低碳栽培早稻CO<sub>2</sub>总排放当量12.90t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>，再生稻CO<sub>2</sub>总排放当量

6.20t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>。与常规栽培模式比较，低碳栽培早稻CO<sub>2</sub>总排放当量升高9.00%，再生稻CO<sub>2</sub>总排放当量升高8.49%（如图12-13）。

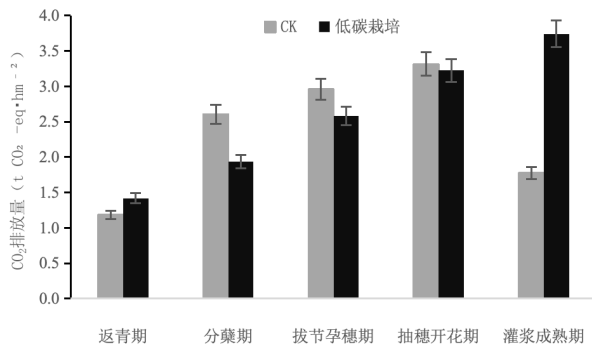


图12. 超级稻+再生稻（早稻）不同生育期CO<sub>2</sub>累积排放当量 (t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>)

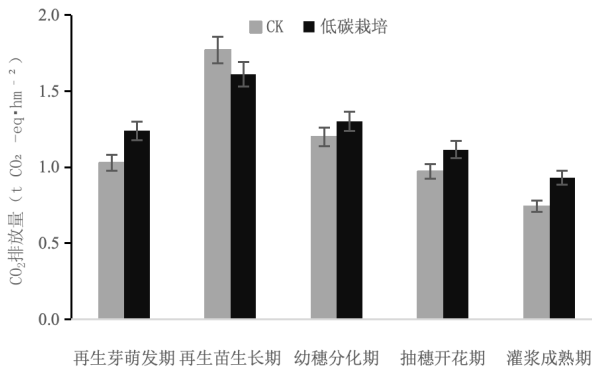


图13. 超级稻+再生稻不同生育期CO<sub>2</sub>累积排放当量 (t CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>)

## 4 讨论

本研究表明，超级稻+再生稻体系温室气体排放呈头季高、再生季低，淹水期高、晒田期低的典型规律，CH<sub>4</sub>为主要排放载体，N<sub>2</sub>O为关键调控对象。低碳栽培通过间歇灌溉+减氮运筹+稻秆科学还田协同调控，改善土壤厌氧环境、抑制产甲烷菌活性，同时减少氮素硝化-反硝化损失，实现CH<sub>4</sub>与N<sub>2</sub>O同步减排，有效破解常规水肥管理的权衡效应。CO<sub>2</sub>主要来自作物+土壤呼吸[11,12]，属于碳循环，不计入农业减排口径，减排核心是CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>O。再生稻生育期短、淹水时间少、免育秧移栽，具备天然低碳优势。本研究获得的排放系数可作为南方超级稻+再生稻模式温室气体核算参考值，为区域碳足迹核

算、低碳认证与农业碳汇交易提供基础数据支撑。

## 5 结论

(1) 超级稻+再生稻稻田CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放存在季节差异，头季排放高于再生季，淹水期与施肥期为温室气体排放关键窗口期。

(2) 低碳栽培通过间歇灌溉、减氮运筹与稻秆科学还田协同调控，显著降低CH<sub>4</sub>排放49.89%、N<sub>2</sub>O排放83.33%，周年综合温室气体排放当量较常规模式降低41.24%。

(3) 超级稻+再生稻低碳栽培模式实现稳产与温室气体协同减排，是我国南方稻区绿色低碳高效生产的优选模式[13-15]。

(4) 本研究明确的温室气体排放参数、季节变化规律与测算方法，可为南方同类稻作系统温室气体监测、碳足迹核算及低碳技术评价提供直接参考。

## 参考文献

- [1] 雷玉涵,卢佳欣,赵冬梅,等.农田温室气体排放模型评估综述[J].节水灌溉,2026(3):93-105.
- [2] 叶佩,宋春燕,刘凯文,等.江汉平原不同稻作模式下温室气体排放特征[J].应用气象学报,2022,33(6):748-758.
- [3] 肖亚楠,杨士红,刘晓静,等.生物炭施用对节水灌溉稻田甲烷排放的影响[J].节水灌溉,2017(10):52-55.
- [4] 余庆,冯涛,丁紫娟,等.有机肥与控释尿素减氮配施对再生稻田温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2025,44(6):1675-1686.
- [5] 丁紫娟,徐洲,田应兵,等.再生稻干湿交替灌溉与根区分层施氮减少温室气体排放[J].灌溉排水学报,2021,40(7):51-58.
- [6] 王超瑞,周宇琨,温雅,等.秸秆还田方式对稻田土壤特性和温室气体排放的影响及其水肥互作调控[J].中国水稻科学,2025,39(3):295-305.
- [7] 王世辰,靳鹏辉,金柯达,等.典型单季稻区蓄留再生稻的温室气体排放观测研究[J].中国生态农业学报(中英文),2026,34(4):899-909. DOI: 10.12357/cjea.20240784.1023.002.
- [8] 易琼,唐拴虎.稻田温室气体(CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放影响因素及其减排措施研究进展[J].广东农业科学,2015,(4):141-146.

- [9] 李鑫,巨晓棠,张丽娟,等.不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J].应用生态学报,2008,19(1):99-104.
- [10] 武文明,杨光明,沙丽清.氮肥对西双版纳地区稻田 $N_2O$ 排放通量的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(5):1876-1881.
- [11] 沈皖豫,黄琼,马静,等.不同稻作系统土壤的 $CH_4$ 产生潜力与产生途径[J].环境科学,2022,43(7):3835-3843.
- [12] 武亚谨,李阳,汪本福,等.再生稻再生芽萌发及生长影响因素研究进展[J].中国稻米, 2025, 31 (5): 39-46.
- [13] 范巧红,林志敏,李锦颖,等.再生稻高产与碳盈余形成的生理生态机制研究[J].中国生态农业学报,2025,33(11):2177-2193
- [14] 葛玉姣,梁晶晓,梁梅英,等.水肥管理对稻田温室气体排放的调控效应[J].广西师范大学学报,2025,33(6):1-8.
- [15] 曹开勋,赵坤,金王飞,等.水氮互作对稻田温室气体排放的影响[J].土壤学报,2022,59(5):1386-1396.

