

钟旭华, 梁开明, 潘俊峰, 等. 华南双季稻低碳高产栽培技术研究进展 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(6): 867-874.
ZHONG Xuhua, LIANG Kaiming, PAN Junfeng, et al. Research progress on low-carbon and high-yield cultivation technology for double-cropping rice in South China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(6): 867-874.



华南双季稻低碳高产栽培技术研究进展

钟旭华[✉], 梁开明, 潘俊峰, 傅友强, 胡香玉, 黄农荣, 刘彦卓,
胡锐, 李妹娟, 王昕钰, 叶群欢, 尹媛红

(广东省农业科学院 水稻研究所/广东省水稻育种新技术重点实验室/广东省水稻工程实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 分析了华南双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放量, 从低碳品种筛选、节水减排灌溉、化肥减量增效等方面介绍了华南双季稻低碳高产关键技术及其集成应用情况。综述了华南双季稻低碳高产栽培技术研究的主要进展、存在的问题和今后工作重点。华南双季稻低碳高产栽培技术节水节肥、减排控污、增产增收, 实现了低碳与高产的协调, 应用前景好。目前, 该技术主要存在可用品种少、种植模式单一、推广难度大等问题; 今后, 在加大政策支持的同时, 亟需加强品种筛选、模式集成、基础理论等方面的研究, 以确保国家粮食安全, 实现碳达峰碳中和的目标。

关键词: 华南双季稻; 低碳高产栽培; 温室气体减排; 氮高效; 节水灌溉; CH_4 排放

中图分类号: S511; S34

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)06-0867-08

Research progress on low-carbon and high-yield cultivation technology for double-cropping rice in South China

ZHONG Xuhua[✉], LIANG Kaiming, PAN Junfeng, FU Youqiang, HU Xiangyu, HUANG Nongrong, LIU Yanzhuo,
HU Rui, LI Meijuan, WANG Xinyu, YE Qunhuan, YIN Yuanhong

(Rice Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Guangdong Key Laboratory of New Technology in Rice Breeding/Guangdong Rice Engineering Laboratory, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The key technologies for low-carbon and high-yield of double-cropping rice in South China (DCRSC) and their integrated application were introduced from the aspects of low-carbon variety selection, water-saving and emission reduction irrigation, and fertilizer reduction and efficiency enhancement, etc. The main progress, problem and future focus on the development and extension of low-carbon and high-yield technology for DCRSC were summarized. The low-carbon and high-yield cultivation technology for DCRSC could synergize water-saving and fertilizer-saving, emission reduction and pollution control, high yield and income, realized the coordination of low-carbon and high-yield, therefore it would have a good application prospect. There are main problems for this technology including limited available varieties, undiversified planting modes, and difficult promotion at present. While increasing policy support, further efforts are needed to enhance the improvement

收稿日期: 2023-06-20 网络首发时间: 2023-07-26 11:06:41

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/44.1110.S.20230725.1820.002.html>

作者简介: 钟旭华, 研究员, 博士, 主要从事水稻高产高效栽培研究, E-mail: xzhong8@163.com

基金项目: 韶关市科技计划 (210804164531395); 广东省科技计划 (2019A050505006); 国家级科技成果奖励培育专项 (粤农科研 [2018] 45 号); 广东现代农业产业技术体系水稻创新团队项目 (2022KJ105); 广东省农业科学院农业新兴产业学科团队建设项目 (202112TD)

and extension of the new technology, including variety screening, cropping pattern optimization and basic research, so as to ensure national food security and achieve carbon peak and carbon neutrality goals.

Key words: Double-cropping rice in South China; Low-carbon and high-yield cultivation; Greenhouse gas mitigation; Nitrogen efficient; Water-saving irrigation; CH₄ emission

粮食安全和气候变化是中国当前面临的 2 个重大问题。确保粮食安全, 是社会稳定和经济发展的基础。水稻 *Oryza sativa* L. 是中国最重要的粮食作物之一, 全国 60% 以上人口以大米为主食, 稳定和提高水稻产量对保障国家粮食安全至关重要。随着经济的发展和城镇化的推进, 耕地持续减少, 水稻产量的提高只能依靠单产的提高。气候变化是当今人类面临最为严峻的全球环境问题之一, 中国政府已明确要力争在 2030 年前实现碳达峰, 在 2060 年前实现碳中和。人类活动向大气中排放大量的 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体, 是导致气候变化的主要原因。农业是重要的温室气体排放源之一, 中国农业排放的温室气体约占温室气体排放总量的 5.4%, 其中, 水稻种植排放的温室气体约占农业的 16%^[1]。稻田固碳减排对实现碳达峰碳中和的作用不可忽视。在保持水稻高产、保障粮食安全的同时固碳减排, 降低单位产量的碳排放量, 实现低碳高产, 是水稻栽培技术发展的必然趋势^[2]。水稻生产是一个碳固定和碳排放并行的过程。一方面, 通过光合作用把空气中的 CO₂ 转化为碳水化合物并固定在植物体中, 其中部分可通过秸秆还田等转化为土壤有机质, 加上根系和土壤固碳, 从而起到碳汇功能; 另一方面, 水稻植株和土壤直接向环境排放 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体, 使稻田成为温室气体排放源; 此外, 生产过程中投入的种子、化肥、农药、燃油等生产资料, 造成温室气体的间接排放。因此, 水稻低碳栽培要从减少投入、减少温室气体排放、减少环境污染和提高产量及效益等方面着手^[3-4]。

我国在水稻低碳高产栽培方面开展了大量研究, 并取得了较大进展。蔡祖聪等^[5]系统地研究了稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放情况。石生伟等^[6]对中国稻田 CH₄ 和 N₂O 排放进行了整合分析, 初步明确了中国不同稻作区 CH₄ 和 N₂O 排放的分布特征及主要影响因素, 提出了中国稻田温室气体减排途径。Zhang 等^[7]分析了不同栽培技术对稻田温室气体排放的影响, 结果表明: 过去 50 年, 种植系统调整、品种更换和节水灌溉分别使中国稻田温室气体排放减少了 7%、31% 和 42%。Tang 等^[8]研究

了 2002—2017 年中国稻田的碳排放情况。整体而言, 中国稻田的碳排放量高于固碳量。稻田温室气体以 CH₄ 为主, 稻田 CH₄ 和 N₂O 每年排放量分别为 176.02×10¹² 和 12.42×10¹² g, 前者是后者的 14.2 倍。张卫建等^[9]分析了气候变化对我国水稻生产的综合影响, 提出建立气候智慧型稻作技术体系, 从水稻生产力提升、土壤有机碳固存和稻田温室气体减排 3 个方面开展技术创新与集成。陈松文等^[1]分析了我国长江中下游地区碳排放现状, 提出构建“增汇、减排、降耗、循环”的低碳稻作体系。唐志伟等^[10]研究表明, 我国稻田 CH₄ 排放量呈“东南高、西北低”的特征, 单位产量 CH₄ 排放量呈“南高、北低”的特征, 华南地区是我国稻田温室气体减排的重点区域之一。目前, 关于华南双季稻区水稻低碳栽培研究鲜见报道。2010 年, 广东省农业科学院水稻研究所生理生态研究团队提出了研发以低投入、低排放、低污染、高产量(即“三低一高”)为特征的华南双季稻低碳高产栽培技术的设想。本文总结了近 10 多年来华南双季稻低碳高产栽培研究的主要进展, 并对存在问题和今后工作重点进行了讨论。

1 华南双季稻田温室气体排放量

华南稻区位于中国最南部, 包括广东、广西、海南、福建四省(区), 是中国重要的水稻产区, 以双季稻为主。2021 年水稻播种面积 444.85 万 hm², 稻谷总产量 2 642.6 万 t, 分别占全国的 14.9% 和 12.4%; 水稻单产 5.94 t/hm², 比全国平均单产低 16.5%^[11]。

1.1 华南地区稻田 CH₄ 排放量

根据 CH₄ 排放因子和水稻种植面积计算稻田 CH₄ 排放量。华南地区单季稻和双季稻的 CH₄ 排放因子分别为 236.7 和 257.1 kg/hm²^[12], 结合华南地区各省(区)水稻种植面积, 计算出华南四省(区)及整个华南地区稻田 CH₄ 排放量如表 1。由表 1 可见, 华南地区稻田每年 CH₄ 排放量为 1.14×10¹² g, 占全国稻田 CH₄ 排放量的 22.00%。另外, 根据 Liang 等^[13-16]2014—2020 年在广州市田间实测结果和许黎等^[17]在广东省 12 个点(次)的田间监测数据, 稻田

表 1 2021 年华南地区稻田 CH₄ 和 N₂O 排放量

Table 1 CH₄ and N₂O emissions from rice field in South China

区域 Zone	水稻面积 ¹⁾ /(×10 ⁴ hm ²) Rice area	CH ₄ 排放量/(×10 ¹² g) CH ₄ emission	N ₂ O排放量/(×10 ⁹ g) N ₂ O emission	温室效应 ²⁾ /(×10 ¹² g) Warming potential
全国 China ³⁾	2 992.10	5.180	41.68	188.44
广东 Guangdong	182.74	0.470	2.32	16.66
广西 Guangxi	175.67	0.452	2.23	16.02
海南 Hainan	22.66	0.058	0.29	2.07
福建 Fujian	63.78	0.159	0.81	5.64
华南地区 South China	444.85	1.140	5.64	40.39
占全国的比列/% Proportion in China	14.90	22.00	13.50	21.43

1) 水稻播种面积来自《中国统计年鉴2022》^[1], 其中, 福建省包括单季稻25.81×10⁴ hm², 其他均为双季稻; 2) CH₄和N₂O总温室效应; 3)全国CH₄和N₂O排放量数据引自文献^[8]

1) Rice planting area was from 《China Statistical Yearbook 2022》^[1], Fujan Province included single season rice area of 25.81×10⁴ hm², while the rest was double season rice; 2) Total warming potential of CH₄ and N₂O; 3) National CH₄ and N₂O emission data were cited from the literature ^[8]

平均 CH₄ 排放量分别为 301.59 和 380.05 kg/ hm², 据此测算出华南稻田每年 CH₄ 排放量分别为 1.34×10¹² 和 1.69×10¹² g, 均比按排放因子测算的数值高。

1.2 华南地区稻田 N₂O 排放量

华南地区水稻平均施氮量为 161.4 kg /hm² ^[18], 稻田 N₂O–N 排放系数为 0.50%^[19]。根据水稻播种面积、平均施氮量和 N₂O–N 排放系数, 采用排放系数法估算出华南四省 (区) 稻田 N₂O 排放量 (表 1)。由表 1 可见, 华南地区稻田每年 N₂O 排放量为 5.64 × 10⁹ g, 约占全国稻田 N₂O 排放总量的 13.50%。

1.3 华南地区稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的总温室效应

基于稻田 CH₄ 和 N₂O 排放量, 按 CH₄ 和 N₂O 全球增温潜势分别为 34 和 298^[20], 计算得出华南四省 (区) 稻田每年 CH₄ 和 N₂O 排放的总温室效应为 40.39×10¹² g, 占全国稻田的 21.43%(表 1)。可见, 研发华南双季稻低碳高产栽培技术, 在保持水稻高产的同时减少稻田温室气体排放, 对于保障国家粮食安全和国家碳达峰碳中和目标的实现具有重要意义。

2 华南双季稻低碳高产栽培技术

2.1 华南双季稻低碳高产品种筛选及评价指标

2.1.1 高产低 CH₄ 排放品种筛选及评价指标 选用温室气体排放少的品种, 可以减少水稻生产过程的直接温室气体排放。国内外已有研究表明, 稻田中 90% 以上的 CH₄ 是通过水稻植株排放到大气中的, 不同品种的 CH₄ 排放量存在差异^[21]。黄农荣等^[22] 以南方稻区 50 个代表品种为材料, 在盆栽条

件下采用静态箱–气相色谱法测定 CH₄ 排放通量, 结果表明: 不同品种间 CH₄ 排放通量存在显著差异, 最大相差达 9.12 倍。不同品种的 CH₄ 排放通量与稻谷产量之间相关性不显著, 表明培育低碳和高产协调的品种是可能的。根据 CH₄ 排放通量和稻谷产量的聚类分析结果, 可将水稻品种分为 8 种类型, 其中, 低排高产、低排中产、中排高产品种可供生产上直接选用, 也可作为低碳品种选育的种质资源 (表 2)。黄农荣等^[22] 的相关分析表明, 株高、叶面积指数与 CH₄ 排放通量呈显著正相关, 在保持高产的同时植株较矮、叶面积较小, 这也可能是高产低 CH₄ 排放品种的重要特征。Jiang 等^[23] 研究表明, 稻田 CH₄ 排放与水稻根系特性密切相关, 高产水稻品种的根系孔隙度大, 可以使较多 O₂ 进入土壤, 从而提高土壤氧化还原电位、减少 CH₄ 排放。

2.1.2 氮高效品种筛选及评价指标 水稻氮效率存在显著的基因型差异。选用氮高效品种, 则可以用较少的氮肥取得较高的产量, 从而减少因施用氮肥而产生的直接和间接温室气体排放。黄农荣等^[24] 研究了 48 份不同水稻基因型材料, 发现水稻品种的氮效率表现因地力不同而异, ‘长伦占’ 不论在低氮还是高氮条件下都表现氮高效, 是典型的氮高效品种; ‘广恢 128’ 和 ‘茉莉占选’ 在低氮条件下表现氮高效, 为低氮高效型品种, 适宜在土壤肥力较低的稻田种植; 而 ‘97 香’ ‘2466’ 和 ‘银花占’ 在高氮条件下表现氮高效, 为高氮高效型, 适宜在土壤肥力较高的稻田种植。相关分析也表明, 氮肥利用率与单位面积有效穗数、收获指数及稻谷产量呈极显著正相关, 可作为氮高效品种选育的参

表 2 水稻低碳高产品种及选择指标

Table 2 Low-carbon and high-yield rice cultivars and selection traits

类型 Type	特征 Characteristic	品种 Variety	选择指标 Selection trait	文献来源 Source
低CH ₄ 排放 Low CH ₄ emission	低排高产	黄华占、粤新占	产量高、植株较矮、 叶面积指数较小	[22]
	中排高产	五优308、丰华占、特三矮、 茉莉占选、广超丝苗、珍桂矮		
	低排中产	广恢998、特籼占13、富粤占、 七桂早25、IR72和IR36		
氮高效 High nitrogen use efficiency	低氮高效型	广恢128、茉莉占选	产量高、收获指数 高、有效穗数多	[24]
	高氮高效型	97香、2466、银花占		
	高低氮高效型	长伦占		
减氮高产 High yield with reduced N input		晶两优华占、盛泰优722、丰田优553、 五优308、恒丰优7011、国优9113、 荃香优6号、天优华占、深优513、 聚两优751	减氮条件下，生物量大、 库容量大、氮素籽粒 生产效率高	[26]
高光效 High radiation use efficiency	早季	Y两优143、特优524、天优3301、 特优3301	产量高、收获指数 高、千粒质量高	[27]
	晚季	五优308、五优163、五优376、 天优3618、天优998、天优华占、 天优3301、广8优188、Y两优305		

考指标^[24]。吴子帅等^[25]测定了广东和广西 104 个优质常规稻品种在不施氮和正常施氮条件下的产量表现,筛选出‘桂育 8 号’‘桂育 9 号’‘桂育 11 号’和‘黄华占’等 16 个氮高效品种。

2.1.3 减氮高产品种筛选及评价指标 胡香玉等^[26]以广东省区试对照种‘粤晶丝苗 2 号’为对照,在当地高产栽培减施氮肥 1/3 的条件下,测定了不同水稻品种的产量和氮肥利用率,结果表明,参试品种之间的产量存在显著差异,并筛选出了减氮高产品种(表 2);在减氮 1/3 的条件下,‘晶两优华占’‘聚两优 751’‘国优 9113’‘荃香优 6 号’和‘深优 513’的稻谷产量均达到 7 t/hm² 以上,比对照种增产 20% 以上。表明通过品种改良实现减氮高产是可行的。在减氮 1/3 条件下,水稻产量与总生物量、库容量呈显著正相关,与产量构成因子、不同阶段物质积累量、叶源大小均无显著相关性。减氮高产品种的总吸氮量并不高,但其氮素籽粒生产效率高。在减氮条件下生物量大、库容量大、氮素籽粒生产效率高是减氮高产品种的主要特征。

2.1.4 华南双季稻主栽品种的光能利用效率 选用高光效品种是低碳高产栽培的重要基础。黄农荣等^[27]以华南双季稻区 36 个主栽品种为供试材料,研究了不同品种的光能利用效率及其与产量等农艺性状的关系。结果表明,水稻的光能利用效率在品种间和季节间均存在显著差异;通过系统聚类

可将水稻品种划分为低光效型、中光效型和高光效型;多数品种为中、低光效品种,早季和晚季高光效品种分别占 11.1% 和 25.0%,早稻和晚稻品种中的高光效品种如表 2。多数品种在早、晚季的光能利用效率差异较大,品种选择应随季节而异。目前,生产上早、晚季多采用同一品种(即早晚兼用),这也可能是华南双季稻区水稻单产较低的原因之一。

2.2 华南双季稻节水减排灌溉技术

中国是一个水资源短缺的国家,人均水资源量仅为世界平均水平的 1/4^[28]。华南稻区虽然降雨量大,但季节性、区域性缺水经常发生。节水灌溉不仅可以节约灌溉用水,而且可以提高土壤氧化还原电位、减少稻田 CH₄ 排放,还可以降低化肥流失造成的环境污染风险。在水稻的节水灌溉方面,国际水稻研究所(IRRI)研发了安全干湿交替灌溉技术(Safe alternate wetting and drying, AWD)。该技术采用无底水位管监测地下水埋深,作为衡量田间水分状况的指标,用于指导灌溉。在移栽后 10~15 d 内保持水层 2~5 cm,抽穗前后 2~5 cm 水层维持 7 d,其他时间均采用 AWD 灌溉,即当水位下降至地下 15 cm 时灌水建立 2~5 cm 水层,如此循环,收割前 7~10 d 排水落干^[29]。该技术在菲律宾、越南、孟加拉等东南亚国家得到推广应用^[30]。此外,华南双季稻区也先后研发了浅沟灌法^[31]和

水气平衡法^[32]等节水灌溉技术。

2010 年广东省农业科学院水稻研究所将 IRRI 的 AWD 技术引进广东, 随后对不同灌溉处理、不同施肥处理下的水稻产量、稻田温室气体排放和氮肥利用及损失规律进行了系统研究。结果表明, 不论是传统灌溉还是 AWD, 稻田 CH₄ 排放高峰都出现在分蘖期, AWD 可显著减少灌溉水用量和稻田 CH₄ 排放量, 对稻谷产量无显著影响^[13]。Pan 等^[33]研究表明, 在华南双季稻条件下, 水分管理与施氮处理对水稻产量无显著的互作效应。黄荣等^[22]在低 CH₄ 排放品种筛选的盆栽试验中发现, 不同品种的 CH₄ 排放高峰均出现在分蘖期; 幼穗分化期所有品种的 CH₄ 排放通量均大幅下降, 各品种的平均值仅为分蘖期的 18.2%; 分蘖期品种间 CH₄ 排放通量差异显著, 而幼穗分化期差异不显著。可见, 分蘖期是减少稻田 CH₄ 排放量的关键期。

水分管理对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放有显著影响^[34-37]。Liang 等^[15-16]田间监测结果表明, 氮肥后移和 AWD 可显著减少氮肥损失。氮肥后移处理的氮肥环境损失(包括氨挥发、径流和渗漏)比习惯栽培减少 32.7%, 氮肥后移与 AWD 结合处理比习惯栽培减少 41.9%; 分蘖期也是稻田氮肥环境损失的高峰期, 不同氮肥和水分管理下, 氮肥环境损失均在分蘖期最大; 习惯栽培分蘖期、幼穗分化期和结实期的氮肥环境损失分别占 83.5%、7.5% 和 9.0%, 氮肥后移处理分别占 58.8%、25.9% 和 15.4%, 而氮肥后移与 AWD 结合处理分别占 59.7%、27.8% 和 12.5%^[14]。

中期晒田具有控制无效分蘖、促进根系生长、减少病虫害和提高抗倒性等作用, 是水稻高产栽培的重要措施, 同时也可显著减少稻田 CH₄ 排放量。Liang 等^[16]的研究表明, 在 AWD 基础上, 分蘖期进行晒田处理, 可以进一步提高节水减排效果; 与 AWD 相比, 中期晒田与 AWD 结合处理的稻谷产量略增或保持不变, 灌溉用水量平均减少 19.0%, 稻田 CH₄ 排放量减少 16.2%, 单位产量温室气体排放量下降 11.1%。

2.3 华南双季稻化肥减施增效技术

2.3.1 氮肥减施增效技术 钟旭华等^[38-39]研发的水稻“三控”施肥技术, 一般减少氮肥 20%, 增产 10% 左右, 氮肥利用率提高 10 个百分点以上, 倒伏和病虫害大幅减轻。以此为基础, Fu 等^[40]在广东和广西进一步研究了栽插密度和肥料运筹等栽培因子对水稻群体动态、光能利用和产量形成的影响, 结果表明, 增密减氮处理(比习惯栽培减氮 23%、增

密 51%) 的光能利用率达到 1.60~1.80 g/MJ, 比习惯栽培提高 28.6%~37.9%, 稻谷产量比习惯栽培提高 23.9%~29.9%。周文涛等^[41]研究发现, 在节水轻简栽培模式下, 增密减氮可显著减少稻田温室气体排放。稻田周年温室效应以早稻施氮 86.4 kg/hm²、密度 36 万穴/hm², 晚稻施氮 108 kg/hm²、密度 32 万穴/hm² 处理最低。Zhu 等^[42]研究了增密减氮对东北单季稻产量、氮肥利用率和温室气体排放的影响, 结果表明, 在增密 50%、减少氮素基肥 30% 的情况下, 稻谷产量提高 0.5%~7.4%, 氮肥偏生产力提高 14.3%~50.6%, 温室气体排放减少 6.4%~12.6%, 单位产量温室气体排放降低 7.0%~17.0%。关于增密减氮对华南双季稻温室气体排放的影响, 值得进一步研究探讨。针对农村劳动力短缺问题, 彭碧琳等^[43]研发了“一基一追”轻简施氮法, 施肥次数减少 1~2 次, 产量和氮肥利用率与“三控”施肥技术差异不显著。

2.3.2 磷肥减量施用技术 长期施用磷肥使我国大多数农田处于磷素盈余状态, 合理减少磷肥施用对保护环境有重要意义。潘俊峰等^[44]在广东省农业科学院白云试验基地开展的连续 9 年 18 季的定位试验结果表明, 在土壤有效磷较缺(有效磷质量分数 7.2 mg/kg) 条件下, 不施磷处理第 1—3 年的稻谷产量与正常施磷处理无显著差异, 第 4—6 年产量下降 5.0%, 第 7—9 年产量下降 12.7%, 减产达显著水平; 2 年的短期试验结果表明, 在土壤磷含量中等(有效磷质量分数 13.6 mg/kg) 条件下, 磷肥减半施用对稻谷产量、物质生产和磷素吸收利用均无显著影响, 田面水总磷和可溶性磷含量在全生育期内差异不显著。因此, 在土壤磷含量中等及以上的稻田, 3 年内磷肥减半施用既不影响水稻产量, 又可降低稻田磷素损失风险, 是兼顾产量和环保的可行技术方案。广东省中等和高磷肥力土壤占 80% 以上^[45], 华南地区稻田磷肥减施潜力可观, 关于华南双季稻田的磷肥周年运筹值得进一步深入研究。

2.3.3 化肥替代技术 稻草还田和冬种绿肥可替代部分化肥, 还可增加土壤固碳、培肥地力, 是低碳高产栽培的重要措施。张水清等^[46-47]研究表明, 稻草覆盖还田处理的总吸氮量比稻草不还田处理增加 13.7%~20.3%, 氮肥吸收利用率提高 8.23 个百分点, 增产 3.8%~13.9%。稻草还是一种重要的钾肥资源。田卡等^[48]的盆栽试验结果表明, 稻草钾的当季利用率为化学钾肥的 79.6%, 而成熟期稻草中积累的钾约占植株总钾积累量的 70%, 若稻草全量还田则可替代化学钾肥的 50% 以上; 进一步的田间试验

表明,在稻草全量还田的情况下减施 50% 化学钾肥,水稻植株的含钾量和吸钾量都显著高于全量施用化学钾肥处理,增产 6.5%。可见,全量稻草还田替代 50% 化学钾肥是可行的。但是,稻草还田显著增加了稻田 CH₄ 排放量^[49]。冬种紫云英回田不但可以部分替代化学氮肥,而且还可培肥地力,是水稻低碳栽培的有效措施。冬种紫云英绿肥可以显著提高水稻产量,平均增产 3.6%;同时,也增加稻田 CH₄ 排放量,但差异未达显著水平^[49]。王飞等^[50]的研究表明,稻草与紫云英联合还田可以有效地提高土壤肥力和水稻氮肥利用率;在等氮投入下,稻草与紫云英联合还田替代 20%~40% 化肥有利于水稻稳产增产。

2.4 华南双季稻低碳高产栽培技术集成及示范应用

钟旭华等^[51]以低碳高产品种、节水减排灌溉、化肥减施增效等关键技术为基础,结合现有先进实用技术,集成建立了华南双季稻低碳高产栽培技术体系,制定了技术规程。在广州、肇庆、惠州、湛江和云浮等地进行了示范应用。结果表明,与习惯栽培相比,该技术减少施肥 (N+P₂O₅+K₂O)17.8%, 每季减少灌溉 2~3 次,节约灌溉水 20% 以上,稻田温室气体平均减排 33.5%,氮素环境损失减少 41.9%,稻谷产量提高了 5.8%~22.2%,增收 1 662~4 485 元 /hm²,实现了低碳与高产的协调。该技术 2017 年入选国家发改委节能低碳重点推广技术目录,2023 年入选广东省农业主推技术。

3 问题和展望

控制温室气体排放,遏制或减缓气候变化,是当今国际社会的紧迫任务。降低投入品碳足迹,减少生产过程能耗,提升固碳减排功能,同时提高产量和经济效益,是包括水稻在内的农业可持续发展的必然趋势^[52]。当前,华南双季稻低碳高产栽培还存在可用的低碳高产品种少、种植模式单一、推广难度大、基础研究不够深入等问题,亟需提高认识,加强协作,促进技术进一步完善和推广应用。

3.1 加大政策支持力度

水稻低碳高产栽培技术属于公益性技术,其推广应用需要政府的引导和政策支持。当前,稻田碳排放交易体系尚未建立,农民难以从低碳高产技术的减排效应中获利。这就需要出台有效的政策和激励措施。可通过设立示范推广专项,建立示范基地,开展技术示范、培训和宣传,推动低碳高产栽培技术的落地应用,使这一技术为国家粮食安全和双碳目标的实现做出应有贡献。

3.2 扩大低碳高产品种筛选

前期虽已开展低碳高产品种的筛选工作,但参与筛选的品种数量有限,而且主要是针对广东的品种。下一步要扩大品种筛选范围,对华南四省(区)的优良品种(特别是主导品种)从 CH₄ 排放量、氮磷效率等方面进行系统筛选和鉴定评价,筛选出更多的低碳高产品种。未来应把碳排放特性(包括单位产量 CH₄ 排放量等)纳入水稻育种目标,定向培育低碳高产品种。

3.3 加强低碳高产技术模式研究和推广应用

加强顶层设计,从华南双季稻区各地实际情况出发,集成创建形式多样、独具特色的低碳高产技术模式,建立技术标准。华南地区光温水资源丰富,要在稳定双季稻种植面积的基础上,大力发展冬季作物。加强周年统筹,提高光温和水肥等资源的综合利用效率。处理好高产与低碳、经济效益与生态效益的关系,提高农民应用低碳高产栽培技术的积极性。加强低碳高产栽培技术与现有先进实用技术及装备的融合,近年来,华南双季稻区在机械化育插秧、侧深施肥、无人机施肥施药、直播稻、机收再生稻等方面取得了重要进展,要把这些先进的实用技术和装备集成到低碳高产栽培技术模式中,提高综合效益。

3.4 加强低碳高产栽培技术基础理论研究

目前华南双季稻低碳高产栽培技术的基础研究还不够深入。今后,应开展不同低碳高产技术模式的比较研究,明确不同技术模式及关键技术的优先顺序,优化技术模式的区域布局;从形态、生理和分子等层面,研究低碳高产品种和水肥管理等措施的增产增效、固碳减排机理,阐明低碳与高产的内在协调机制。

参考文献:

[1] 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.

[2] 管大海,张俊,王卿梅,等.气候智慧型农业及其对我国农业发展的启示[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(10): 7-13.

[3] 曹凑贵,李成芳.低碳稻作理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[4] 高旺盛,陈源泉,董文.发展循环农业是低碳经济的重要途径[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1106-1109.

[5] 蔡祖聪,徐华,马静.稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.

[6] 石生伟,李玉娥,刘运通,等.中国稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及减排整合分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2923-2936.

[7] ZHANG Y, JIANG Y, TAI A P K, et al. Contribution of rice variety renewal and agronomic innovations to yield improvement and greenhouse gas mitigation in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(11): 114020.

[8] TANG J C, LIU T Q, JIANG Y, et al. Current status of carbon neutrality in Chinese rice fields (2002–2017) and strategies for its achievement[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 842: 156713.

[9] 张卫建, 陈长青, 江瑜, 等. 气候变暖对我国水稻生产的综合影响及其应对策略[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 805-811.

[10] 唐志伟, 张俊, 邓兴艾, 等. 我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(4): 582-591.

[11] 国家统计局. 2022 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[12] 陈田, 潘竞虎. 2009—2019 年中国人为 CH₄ 排放量的估算及时空格局[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(12): 5549-5560.

[13] LIANG K M, ZHONG X H, HUANG N R, et al. Grain yield, water productivity and CH₄ emission of irrigated rice in response to water management in South China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163: 319-331.

[14] LIANG K M, ZHONG X H, HUANG N R, et al. Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 46-57.

[15] LIANG K M, ZHONG X H, PAN J F, et al. Reducing nitrogen surplus and environmental losses by optimized nitrogen and water management in double rice cropping system of South China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 286: 106680.

[16] LIANG K M, ZHONG X H, FU Y Q, et al. Mitigation of environmental N pollution and greenhouse gas emission from double rice cropping system with a new alternate wetting and drying irrigation regime coupled with optimized N fertilization in South China[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 282: 108282.

[17] 许黎, 任万辉, 杨宁, 等. 广东清远早、晚稻稻田甲烷排放的观测研究[J]. *气象*, 2007, 33(3): 19-27.

[18] 闫聪硕, 杨莉莉, 周奇, 等. 我国水稻不同产区施氮量与产量分析比较[J]. *农业科技与装备*, 2023(1): 17-19.

[19] 邹建文, 秦艳梅, 刘树伟. 不同水分管理方式下水稻生长季 N₂O 排放量估算: 模型应用[J]. *环境科学*, 2009, 30(4): 949-955.

[20] IPCC. Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[21] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 水稻品种对稻田甲烷排放的影响[J]. *作物学报*, 1999, 25(4): 441-446.

[22] 黄农荣, 梁开明, 钟旭华, 等. 南方低甲烷排放的高产水稻品种筛选与评价[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(12): 2854-2863.

[23] 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: 4728-4738.

[24] 黄农荣, 钟旭华, 郑海波. 水稻氮高效基因型及其评价指标的筛选[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 29-33.

[25] 吴子帅, 罗翠萍, 李虎, 等. 氮高效型优质常规稻品种筛选[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(1): 63-69.

[26] 胡香玉, 钟旭华, 彭碧琳, 等. 减氮条件下高产水稻品种的产量形成和氮素利用特征[J]. *核农学报*, 2019, 33(12): 2460-2471.

[27] 黄农荣, 傅友强, 钟旭华, 等. 华南双季稻主栽品种的光能利用效率及聚类分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(11): 1714-1724.

[28] 杨建昌, 张建华. 水稻高产节水灌溉[M]. 北京: 科学出版社, 2019.

[29] BOUMAN B A M, LAMPAYAN R M, TUONG T P. Water management in irrigated rice: Coping with water scarcity[M]. Manila: International Rice Research Institute, 2007: 53.

[30] LAMPAYAN R M, REJESUS R M, SINGLETON G R, et al. Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice[J]. *Field Crops Research*, 2015, 170: 95-108.

[31] 郭荣发, 陈爱珠, 唐德强. 南方直播水稻浅沟渗灌节水增产机理研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(5): 57-60.

[32] 徐世宏. 水稻水气平衡栽培法的研究[J]. *广西农学报*, 2008, 23(2): 1-4.

[33] PAN J F, LIU Y Z, ZHONG X H, et al. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in South China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 191-200.

[34] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪, 等. 水稻生长后期水分管理对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 332-336.

[35] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 控制灌溉对稻田 CH₄ 和 N₂O 综合排放及温室效应的影响[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 235-240.

[36] 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.

[37] TOWPRAYOON S, SMAKGAHN K, POONKAEW S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields[J]. *Chemosphere*, 2005, 59: 1547-1566.

[38] 钟旭华, 黄农荣, 郑海波, 等. 水稻“三控”施肥技术规程[J]. *广东农业科学*, 2007, 34(5): 13-15.

[39] 钟旭华, 黄农荣, 胡学应. 水稻“三控”施肥技术[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2013.

[40] FU Y Q, ZHONG X H, ZENG J H, et al. Improving grain

yield, nitrogen use efficiency and radiation use efficiency by dense planting, with delayed and reduced nitrogen application, in double cropping rice in South China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(2): 565-580.

[41] 周文涛, 龙文飞, 毛燕, 等. 节水轻简栽培模式下增密减氮对双季稻田温室气体排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2604-2612.

[42] ZHU X C, ZHANG J, ZHANG Z P, et al. Dense planting with less basal nitrogen fertilization might benefit rice cropping for high yield with less environmental impacts[J]. *The European Journal of Agronomy*, 2016, 75: 50-59.

[43] 彭碧琳, 李妹娟, 胡香玉, 等. 轻简氮肥管理对华南双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(7): 1424-1438.

[44] 潘俊峰, 刘彦卓, 梁开明, 等. 长期和短期减施磷肥对华南双季稻产量与磷肥利用的影响[J]. *作物杂志*, 2022(5): 241-248.

[45] 黄继川, 彭智平, 徐培智, 等. 广东省水稻土有机质和氮、磷、钾肥力调查[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(6): 70-73.

[46] 张水清, 钟旭华, 黄农荣, 等. 稻草覆盖还田对水稻氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 611-616.

[47] 张水清, 钟旭华, 黄农荣, 等. 稻草覆盖还田对华南双季晚稻物质生产和产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(3): 284-290.

[48] 田卡, 钟旭华, 黄农荣, 等. 还田稻草的钾素利用及其增产效应研究[J]. *中国稻米*, 2014, 20(3): 54-57.

[49] 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 CH₄ 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 592-598.

[50] 王飞, 李清华, 何春梅, 等. 稻秆与紫云英联合还田提高黄泥田氮素利用率和土壤肥力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(1): 66-74.

[51] 钟旭华, 梁开明, 潘俊峰, 等. 水稻低碳高产栽培技术及应用案例[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022: 82.

[52] 骆世明. 生态农业发展的回顾与展望[J]. *华南农业大学学报*, 2022, 43(4): 1-9.



钟旭华, 博士, 广东省农业科学院水稻研究所二级研究员, 广东省水稻产业技术体系首席专家, Norman Borlaug 奖和广东省丁颖科技奖获得者, 享受国务院政府特殊津贴。长期从事水稻高产高效栽培理论与技术研究, 在水稻高效施肥、低碳栽培、抗倒和高产方面有造诣。先后主持国家自然科学基金、“863”计划、国家公益性行业科研专项、广东省自然科学基金、广东省科技攻关、国际合作和科技部成果转化等项目 30 多项。发表学术论文 120 余篇, 主著(编)专著 4 本, 获省部级科研成果奖励 8 项。主持研制的水稻“三控”施肥技术, 可节省氮肥 20%、增产 10% 左右, 先后入选农业农村部主推技术和超级稻“双增一百”技术, 连续多年入选广东省农业主推技术和广东省农业面源污染治理重点推广技术。主持研发的水稻低碳高产栽培技术, 先后入选国家发改委重点推广节能低碳技术目录和广东省农业主推技术。

【责任编辑 周志红】