

干湿交替灌溉与秸秆还田方式对水稻产量及温室气体排放的影响

王超瑞 张男 汝艳 严语 孟庆好 温雅 张瑛 肖治林 张耗*

(扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009; *通信作者, email: haozhang@yzu.edu.cn)

Effects of Alternate Wetting and Moderate Soil Drying Irrigation and Straw Returning Methods on Rice Yield and Greenhouse Gas Emissions

WANG Chaorui, ZHANG Nan, RU Yan, YAN Yu, MENG Qinghao, WEN Ya, ZHANG Ying, XIAO Zhilin, ZHANG Hao*

(*Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology / Jiangsu Co-innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; *Corresponding author; email: haozhang@yzu.edu.cn*)

Abstract: 【Objective】 The effects of different irrigation and straw returning combinations on rice yield and greenhouse gas emissions were studied to provide theoretical basis and practical guidance for rice yield increase and greenhouse gas emission reduction. **【Method】** Taking Yongyou 2640 and Nanjing 5718 as the test varieties, two irrigation methods were set up: conventional irrigation (CI), alternate wetting and moderate soil drying irrigation (AWD), and three straw returning methods: no straw returning (S0), straw biochar application(SC), composted straw returning to the field combined with straw biochar(SS). The effects on rice yield, dry matter accumulation, photosynthetic rate, photosynthetic potential, root activity and methane and nitrous oxide emission fluxes during the whole growth period were analyzed.

【Results】 1) Compared with CI+S0, the AWD+SC and AWD+SS treatments significantly increased grain yield by 8.30%–13.90% and 18.55%–22.58%, respectively. Compared with S0 treatment, SC and SS significantly increased the effective panicle number and grain number per panicle, and AWD treatment significantly increased the grain number per panicle, seed setting rate and 1000-grain weight. 2) The increase in yield was mainly due to the significant increase of dry matter accumulation in underground and above-ground parts, net photosynthetic rate and photosynthetic potential of leaves, NSC transport in stem sheath and oxidizing power of roots. 3) SC significantly reduced methane and nitrous oxide emissions, while SS increased emissions, but AWD treatment significantly reduced methane emissions, thereby reducing the global warming potential and greenhouse gas emission intensity of rice fields. **【Conclusion】** The combination of straw returning technology (AWD+SC/SS) with alternating wet and dry irrigation can significantly improve the accumulation and transport of photosynthetic substances in rice, promote below-ground root growth, and achieve the dual goals of increasing rice yield and reducing greenhouse gas emissions in rice fields.

Keywords: rice; alternate wetting and moderate soil drying irrigation; biochar; straw-decomposing microbial inoculants; global warming potential

摘 要: 【目的】 研究不同灌溉和秸秆还田组合方式对水稻产量及温室气体排放的影响, 为稻田高产和温室气体减排提供理论依据和实践指导。 **【方法】** 以甬优 2640 和南粳 5718 为供试品种, 设置常规水层灌溉(CI)、干湿交替灌溉(AWD)2 种灌溉方式和秸秆不还田(S0)、秸秆生物炭(SC)、秸秆堆腐还田配施秸秆生物炭(SS)3 种秸秆还田方式, 分析其对水稻产量、干物质积累量、光合速率、光合势、根系活力以及全生育期甲烷和氧化亚氮排放通量等的影响。 **【结果】** (1)与 CI+S0 相比, AWD+SC 与 AWD+SS 分别显著增产 8.30%~13.90%和 18.55%~22.58%。

收稿日期: 2025-01-19; 修改稿收到日期: 2025-06-30。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFD2300304); 国家自然科学基金资助项目(32071944、32272197); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

从产量构成因素分析, SC 和 SS 较 S0 处理提高了有效穗数和每穗粒数, 并且 AWD 处理显著提高了每穗粒数、结实率和千粒重。(2)产量的提高主要得益于地下部和地上部干物质积累量、叶片净光合速率、光合势、茎鞘 NSC 转运和根系氧化力的显著增加。(3)SC 显著降低稻田甲烷和氧化亚氮排放, 而 SS 则增加了排放, 但经 AWD 处理后甲烷排放显著减少从而降低稻田全球增温潜势和温室气体排放强度。【结论】干湿交替灌溉技术配合秸秆还田技术(AWD+SC/SS)能显著提高水稻光合物质的积累与转运, 改善地下部根系生长, 实现水稻产量提高和稻田温室气体排放减少的双重目标。

关键词: 水稻; 干湿交替灌溉; 秸秆生物炭; 秸秆促腐菌剂; 全球增温潜势

水稻产业作为保障国家粮食安全的核心支柱, 承担着满足我国 2/3 以上口粮需求的重要使命^[1-2]。在传统水层灌溉(continuous irrigation, CI)条件下, 稻田系统耗水量约占农业总用水量的 65%, 水资源利用效率偏低^[3]。面对我国水资源时空分布与区域性短缺的挑战, 特别是水稻生产中高产目标与高耗水之间的突出矛盾, 兼具节水增产优势的节水灌溉技术备受关注。目前主流节水技术包括干湿交替灌溉(alternate wetting and moderate soil drying irrigation, AWD)、控制灌溉、好氧灌溉和覆膜旱种等, 其中 AWD 在我国已形成规模化应用^[4]。AWD 在农业实践中通过“灌水-落干-复灌”的水分管理模式, 显著降低灌溉用水量^[5], 但该技术能否实现增产, 受控于土壤落干程度、气象特征以及品种特性等因素^[6-8]。此外, AWD 避免了稻田长时间处于淹水状态, 能有效缓解稻田甲烷(CH₄)排放, 但却增加了氧化亚氮(N₂O)排放, 如何平衡这两种温室气体“此消彼长”的排放特点, 充分发挥 AWD 的增产减排效益, 尚需进一步研究。

我国秸秆年产生量已超过 7 亿 t, 占全球秸秆资源的 25%以上^[9]。秸秆还田是合理利用资源, 改善土壤质量, 提高水稻产量的重要措施^[10]。但秸秆直接还田面临抑制秧苗根系发育、增加土传病害发生率以及刺激温室气体排放等问题^[11-12]。据报道, 秸秆间接还田, 如秸秆炭化或秸秆堆腐技术, 通过热解炭化工艺或添加促腐菌剂的方式, 改变秸秆养分释放规律以及秸秆碳形态, 对水稻生长、产量形成和温室气体减排有积极影响^[13-16]。但大多数对秸秆间接还田的研究是在常规水层灌溉下进行的, 很少有研究综合评估干湿交替灌溉和秸秆生物炭联合秸秆堆腐还田条件下水稻高产减排的潜力。因此, 本研究以长江中下游稻区生产上的代表性品种甬优 2640 和南粳 5718 为材料, 设置灌溉模式(常规水层灌溉和干湿交替灌溉)与秸秆处理(秸秆不还田、秸秆生物炭还田、秸秆堆腐还田配施生物炭)双因子试验, 解析不同灌溉-秸秆组合对水稻产量形成和温室气体排放的影响, 以期水稻丰产减排栽

培提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023–2024 年在江苏省扬州市蒋王镇进行, 土壤类型为砂壤土, 供试土壤的基本性质: 有机质 16.17 g/kg, 碱解氮 91.11 mg/kg, 速效磷 30.40 mg/kg, 速效钾 128.28 mg/kg, pH 6.52。容重 1.13 g/cm³。水稻生育期内日均气温和日降水量见图 1。

1.2 试验材料及设计

供试水稻品种为甬优 2640 和南粳 5718。秸秆生物炭(粉状, 原材料为小麦秸秆, 500°C下炭化而成)。秸秆促腐菌剂由中国成都生物研究所提供, 其中枯草芽孢杆菌量不少于 1.0×10^{10} CFU/g。

试验采用裂区设计, 以 2 种灌溉方式为主区, 分别是常规水层灌溉(CI)和干湿交替灌溉(AWD); 以 3 种秸秆还田方式为裂区, 分别是秸秆不还田(S0)、秸秆生物炭(SC)、秸秆堆腐还田配施生物炭(SS); 以 2 个品种为小区。每个小区面积 30 m²。栽插株行距为 16 cm×25 cm, 每穴双本移栽。各主区间用塑料薄膜包埂。各小区全生育期各处理总氮量为 240 kg/hm², 折合成含纯氮 46.0%的尿素, 按基肥: 分蘖肥: 促花肥: 保花肥=4:2:2:2 的比例施用, 磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)分别以 40 kg/hm² 和 100 kg/hm² 作为基肥一次性施入。除草、病虫害防治等其他管理措施均同当地常规管理。

常规水层灌溉处理按当地水稻种植习惯管理, 除分蘖后期排水晒田和黄熟期自然落干外, 其余各生育阶段田间均保留 3~5 cm 薄水层。干湿交替灌溉为自移栽后 10 d 至成熟期, 自 2~3 cm 浅水层自然落干至土壤水势-10±5 kPa(采用中国科学院南京土壤研究所研制的真空表式土壤负压计监测小区内土壤水势变化情况), 然后灌 2~3 cm 水层, 如此循环。

秸秆不还田处理要求每季水稻移栽前清理田间残茬。秸秆生物炭还田处理为一次性施用 10 t/hm², 2024 年水稻不重复添加。秸秆堆腐还田配施

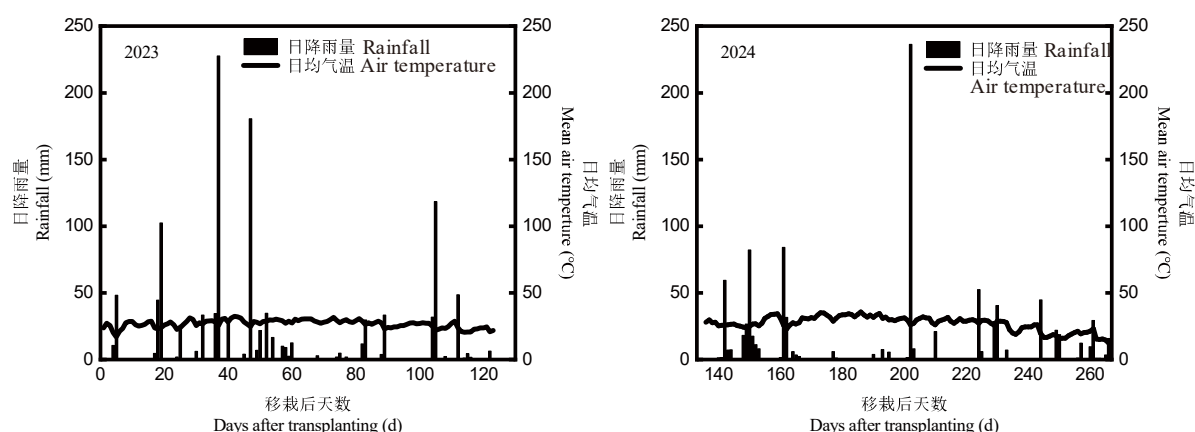


图1 水稻移栽后生长季日降雨量和平均气温

Fig. 1. Daily rainfall and average temperature in the growing season after rice transplantation

生物炭处理为在施用生物炭基础上，将前茬小麦秸秆收集并进行堆腐后还田。秸秆堆腐所用的小麦秸秆量为全量还田量，即 6 t/hm^2 。秸秆堆腐的操作过程如下：首先将秸秆粉碎至 $10\sim 15 \text{ cm}$ ，于田间地头堆成垛，添加秸秆促腐菌剂 6 kg/t ，尿素 $10\sim 12 \text{ kg/t}$ ，加水使含水量达到 65% 左右，覆盖薄膜进行发酵腐熟， $10\sim 20 \text{ d}$ 后还田。整个堆腐过程以好氧发酵为主，甲烷和氧化亚氮排放量很低，堆腐秸秆质量下降 $21\%\sim 36\%$ ，堆体最高温度可达 65°C ，有助于杀灭杂草种子、病原菌和虫卵。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 茎蘖动态和地上干物质积累量

分别于主要生育时期(分蘖中期、穗分化始期、抽穗期和成熟期)，每小区定点考察茎蘖数，并随机选取 5 穴植株，将植株各个部位分开，烘干至恒重后测定干物质积累量。

1.3.2 光合速率、叶面积指数和光合势

分别于上述时期复水后，采用肖治林等^[17]的方法测定 10 张最上部完全展开叶的净光合速率；采用顾汉柱等^[18]的方法测定水稻叶片总面积；光合势计算公式如下：

$$\text{光合势}(\text{m}^2 \text{ d/m}^2) = 1/2 \times (L_1 + L_2) \times (t_2 - t_1);$$

式中， L_1 和 L_2 为前后 2 次测定的叶面积， $t_2 - t_1$ 为前后 2 次测定的间隔时间(d)。

1.3.3 根系干质量和根系氧化力

分别于上述时期，采用张耗等^[19]的方法进行根系的取样及后续根系干质量测定；于分蘖中期、穗分化始期、抽穗期和灌浆期，采用 α -萘胺法^[20]测定稻田复水后的水稻根系氧化力。

1.3.4 茎鞘中非结构性碳水化合物含量(NSC)

分别称取抽穗期和成熟期的茎鞘干物质 0.1 g ，按照邓亚萍^[21]的方法测定茎鞘中非结构性碳水化合物含量。

1.3.5 气体采集和分析

使用静态室-气相色谱法测定 CH_4 和 N_2O 排放量。静态室由不锈钢无底箱体和不锈钢底座组成，箱体外包裹一层铝箔。在水稻移栽前，将不锈钢底座布置在每个小区中，顶部留有密封槽。测量时，向凹槽内注水以密封，气体每 7 d 采集 1 次，采集时间为 $7:00\sim 10:00$ ，每隔 10 min 用注射器抽取箱内不少于 10 mL 气体样本，并且记录箱内温度变化。样品随后带回实验室，用气相色谱仪(GC-2010PLUS 型，岛津公司，日本)测定气体浓度。采用马义虎等^[22]的方法计算气体排放通量和累计排放量；按照 IPCC 最新报告^[23]， CH_4 和 N_2O 的增温效应分别是 CO_2 的 27 和 273 倍，在计算稻田全球增温潜势(GWP)时不包含 CO_2 排放量，计算公式如下： $\text{GWP}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{CH}_4(\text{kg}/\text{hm}^2) \times 27 + \text{N}_2\text{O}(\text{kg}/\text{hm}^2) \times 273$ ；温室气体排放强度(GHGI)为生产单位产量稻谷排放的温室气体量，计算公式如下： $\text{GHGI}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{GWP}(\text{kg}/\text{hm}^2) / \text{水稻产量}(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 。

1.3.6 考种与测产

按照成熟期考察的平均有效穗数，各小区取 10 穴水稻植株，重复 3 次，用于理论产量的测定，分别考察每穗粒数、结实率和千粒重。

1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS 19.0 进行数据处理和相关分析。采用 Origin 2024 绘图。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素与茎蘖成穗率

如表 1 所示，不同灌溉和秸秆还田方式组合对甬优 2640 和南粳 5718 两个水稻品种的产量及其构成因素影响显著。与常规水层灌溉下秸秆不还田

表 1 不同灌溉和秸秆还田方式对水稻产量及其构成因素的影响

Table 1. Effects of different irrigation and straw returning methods on rice yield and its components						
年度与品种 Year and variety	处理 Treatment	穗数 Number of panicles (×10 ⁴ /hm ²)	每穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Filled grain rate(%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (t/hm ²)
2023						
甬优 2640	CI+S0	182.50 cd	292.14 d	82.29 c	25.42 e	11.15 c
Yongyou 2640	CI+SC	185.00 bc	294.11 cd	82.75 bc	25.55 d	11.50 c
	CI+SS	190.00 a	302.52 bc	83.30 b	25.77 c	12.34 b
	AWD+S0	178.75 d	305.26 ab	84.51 a	26.57 b	12.26 b
	AWD+SC	181.25 cd	306.63 ab	84.48 a	26.65 b	12.52 b
	AWD+SS	187.50 ab	311.54 a	85.04 a	26.81 a	13.32 a
南粳 5718	CI+S0	226.25 bc	139.43 c	90.62 b	28.57 b	8.17 d
Nanjing 5718	CI+SC	230.00 ab	141.49 bc	90.72 b	28.63 b	8.45 cd
	CI+SS	233.75 a	146.22 bc	91.10 b	28.84 ab	8.99 bc
	AWD+S0	221.25 c	147.78 abc	92.75 a	29.04 ab	8.82 bcd
	AWD+SC	227.50 abc	148.85 ab	92.92 a	29.11 ab	9.15 ab
	AWD+SS	230.00 ab	155.24 a	93.33 a	29.31 a	9.77 a
2024						
甬优 2640	CI+S0	182.50 bc	289.45 d	80.38 b	23.68 b	10.05 c
Yongyou 2640	CI+SC	186.25 b	290.56 d	80.86 b	23.72 b	10.36 c
	CI+SS	192.50 a	297.42 c	81.27 b	23.85 b	11.10 b
	AWD+S0	177.50 c	301.75 bc	83.88 a	24.96 ab	11.21 b
	AWD+SC	180.00 c	303.58 b	84.02 a	25.04 a	11.50 b
	AWD+SS	187.50 ab	307.72 a	84.77 a	25.21 a	12.33 a
南粳 5718	CI+S0	232.50 ab	137.65 c	86.98 b	27.81 c	7.75 d
Nanjing 5718	CI+SC	237.50 a	140.03 bc	86.97 b	27.89 bc	8.07 cd
	CI+SS	241.25 a	145.57 b	87.46 b	28.02 bc	8.60 b
	AWD+S0	224.50 b	146.08 b	89.36 a	28.13 b	8.25 bc
	AWD+SC	226.50 b	147.65 b	89.58 a	28.85 a	8.64 b
	AWD+SS	236.25 a	152.38 a	89.92 a	29.06 a	9.43 a
方差分析 Analysis of variance						
年份 Year(Y)		25.37*	8.90*	730.32**	1641.67**	210.58**
品种 Variety(V)		7399.56**	31639.49**	6418.84**	13245.22**	3245.50**
灌溉方式 Irrigation regime(I)		87.72**	128.284**	806.72**	1011.35**	292.36**
秸秆还田 Straw returning(S)		97.35**	26.542**	21.43**	44.92**	135.44**
Y×V		20.45**	ns	177.53**	334.23**	ns
Y×I		ns	ns	26.39**	21.19**	ns
Y×S		ns	ns	ns	ns	ns
V×I		ns	ns	ns	110.79**	ns
V×S		ns	ns	ns	ns	ns
I×S		ns	ns	ns	ns	ns
Y×V×I		ns	ns	11.40*	ns	ns
Y×V×S		ns	ns	ns	ns	ns
Y×I×S		ns	ns	ns	ns	ns
V×I×S		ns	ns	ns	ns	ns
Y×V×I×S		ns	ns	ns	ns	ns

CI: 常规水层灌溉, AWD: 干湿交替灌溉; S0: 秸秆不还田, SC: 秸秆生物炭, SS: 秸秆堆腐还田配施生物炭。同一列的品种内不同字母表示处理间有显著性差异($P<0.05$)。同一栏内*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。下同。

CI, Conventional irrigation; AWD, Light dry and wet alternate irrigation; S0, No straw returning; SC, Straw biochar; SS, Combined application of composted straw and biochar. Different letters in a column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$, Duncan). * and ** in a column indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. The same below.

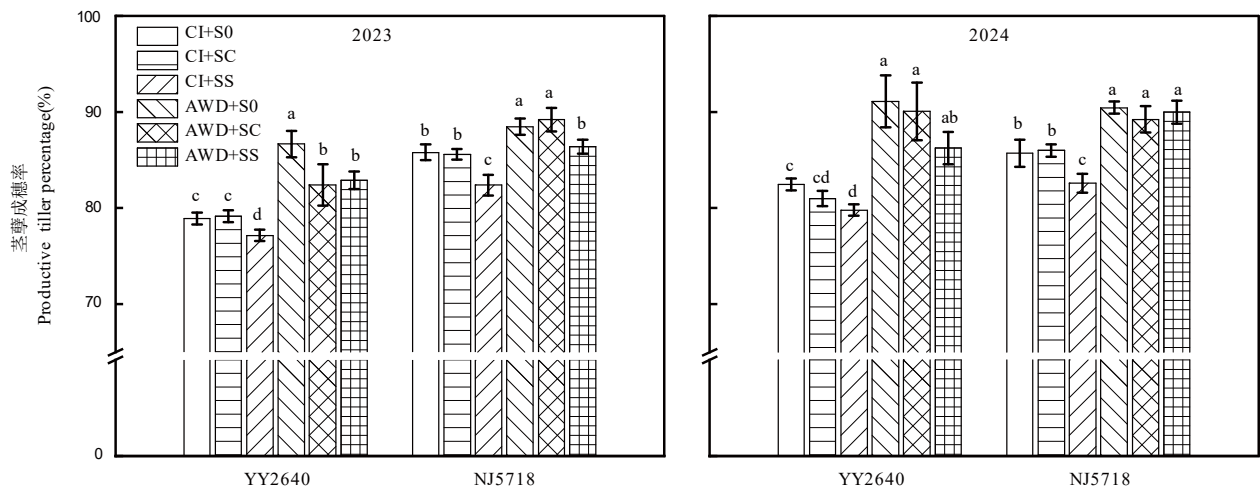


图 2 灌溉方式和秸秆还田方式对茎蘖成穗率的影响
Fig. 2. Effects of irrigation methods and straw returning mode on productive tiller percentage

表 2 不同灌溉和秸秆还田方式对水稻主要生育时期的净光合速率的影响

Table 2. Effects of irrigation and straw returning modes on net photosynthetic rate in main growth stage of rice			[mol/(m ² ·s)]		
年度与品种	处理	分蘖中期	穗分化始期	抽穗期	成熟期
Year and variety	Treatment	Mid tillering	Panicle initiation	Heading	Maturity
2023					
甬优 2640 Yongyou 2640	CI+S0	18.09 d	20.01 e	22.22 e	8.31 b
	CI+SC	18.69 d	21.74 d	22.68 e	8.39 b
	CI+SS	19.25 c	23.26 d	23.74 d	8.91 b
	AWD+S0	21.40 b	24.01 c	25.72 c	10.07 a
	AWD+SC	21.46 b	25.05 b	26.13 b	10.43 a
	AWD+SS	22.55 a	26.89 a	26.93 a	10.61 a
南粳 5718 Nanjing 5718	CI+S0	16.53 e	18.13 f	21.06 e	6.49 b
	CI+SC	17.75 d	19.94 e	21.52 e	6.86 b
	CI+SS	18.83 c	20.68 d	22.13 d	6.98 b
	AWD+S0	20.15 b	21.41 c	23.32 c	8.35 a
	AWD+SC	20.53 b	22.64 b	24.26 b	8.64 a
	AWD+SS	20.94 a	23.01 a	25.43 a	8.83 a
2024					
甬优 2640 Yongyou 2640	CI+S0	19.11 d	21.31 e	22.43 d	7.26 d
	CI+SC	19.87 d	21.67 de	22.85 cd	7.45 d
	CI+SS	20.44 c	22.44 d	23.36 c	8.35 c
	AWD+S0	22.59 b	24.62 c	25.83 b	9.34 b
	AWD+SC	23.17 ab	25.15 b	26.43 ab	9.64 b
	AWD+SS	23.34 a	26.38 a	27.02 a	10.59 a
南粳 5718 Nanjing 5718	CI+S0	17.48 c	20.65 c	21.58 e	6.22 d
	CI+SC	18.14 c	20.84 c	21.76 e	6.74 d
	CI+SS	18.87 b	20.76 c	22.94 d	7.58 c
	AWD+S0	21.34 a	21.07 b	23.83 c	8.21 b
	AWD+SC	22.06 ab	21.63 b	24.16 bc	8.51 b
	AWD+SS	22.49 a	22.42 a	24.67 a	9.42 a

(CI+S0)相比，常规水层灌溉下秸秆生物炭还田(CI+SC)未显著提高水稻产量，而常规水层灌溉下秸秆促腐还田配施生物炭(CI+SS)显著增产 7.88%~10.69%。当采用干湿交替灌溉后，两种秸秆还田处理(AWD+SC 和 AWD+SS)分别较 CI+S0 显著增产 8.30%~13.90%和 18.55%~22.58%。结合产量构成因素与茎蘖成穗率来看，与 S0 处理相比，SC 和 SS 处理提高了有效穗数和每穗粒数，且在 AWD 条件下进一步显著提高了茎蘖成穗率、每穗粒数、结实率和千粒重。

2.2 净光合速率、光合势与干物质积累量

由表 2 可知，在同一灌溉方式下，秸秆还田方式对第一完全展开叶净光合速率的影响，总体表现为 SS>SC>S0，且在 AWD 复水后，净光合速率得到显著提高。从穗分化始期至抽穗期，光合势也表现为 SS>SC>S0，而 AWD 处理下的光合势在抽穗期至成熟期显著高于 CI。各处理下，地上部干物质积累量在分蘖期无显著差异，SC 和 SS 经 AWD 处理后，抽穗期和成熟期的干物质积累量均显著增加。

表 3 不同灌溉和秸秆还田方式对水稻 NSC 积累和转运的影响

Table 3. Effects of different irrigation and straw returning methods on NSC accumulation and transport in rice

年度与品种 Year and variety	处理 Treatment	抽穗期NSC量 NSC at heading (t/hm ²)	成熟期NSC量 NSC at maturity (t/hm ²)	NSC 转运量 NSC translocation amount(t/hm ²)	NSC 转运率 NSC translocation rate(%)	NSC对产量贡献率 Contribution of NSC translocation to grain yield(%)
2023						
甬优 2640	CI+S0	1.98 c	1.12 b	0.86 d	43.43 d	8.44 d
Yongyou 2640	CI+SC	2.06 c	1.14 b	0.92 d	44.66 d	8.66 d
	CI+SS	2.34 b	1.28 a	1.06 c	45.30 c	9.27 c
	AWD+S0	2.36 b	1.01 c	1.35 b	57.20 b	12.14 b
	AWD+SC	2.41 ab	1.02 c	1.39 b	57.68 b	12.05 b
	AWD+SS	2.74 a	1.13 b	1.61 a	58.76 a	13.16 a
南粳 5718	CI+S0	1.56 d	0.99 b	0.57 d	36.54 d	7.74 d
Nanjing 5718	CI+SC	1.62 d	1.02 b	0.60 cd	37.04 d	8.02 d
	CI+SS	1.82 c	1.11 a	0.71 c	39.01 c	8.93 cd
	AWD+S0	1.98 bc	0.95 b	1.03 b	52.02 b	12.83 b
	AWD+SC	2.06 ab	0.98 b	1.08 b	52.43 b	13.15 ab
	AWD+SS	2.26 a	1.02 b	1.24 a	54.87 a	13.81 a
2024						
甬优 2640	CI+S0	2.18 c	1.21 b	1.06 d	48.58 b	10.77 b
Yongyou 2640	CI+SC	2.23 c	1.24 b	1.11 d	49.60 b	11.17 b
	CI+SS	2.38 b	1.38 a	1.10 d	46.05 b	10.51 b
	AWD+S0	2.36 b	1.01 c	1.35 c	57.20 a	12.34 a
	AWD+SC	2.41 b	1.02 c	1.39 b c	57.68 a	12.50 a
	AWD+SS	2.69 a	1.15 bc	1.54 a	57.25 a	13.29 a
南粳 5718	CI+S0	2.26 d	1.23 c	1.03 b	45.56 b	13.97 b
Nanjing 5718	CI+SC	2.32 cd	1.23 c	1.09 b	46.98 b	14.48 b
	CI+SS	2.51 b	1.51 a	1.17 b	46.61 b	14.43 b
	AWD+S0	2.59 b	1.18 c	1.41 a	54.44 a	17.54 a
	AWD+SC	2.64 b	1.20 c	1.44 a	54.52 a	17.44 a
	AWD+SS	2.81 a	1.30 b	1.51 a	53.74 a	17.81 a

2.3 NSC 的积累与转运

从表 3 可知,对比两种灌溉方式,AWD 处理下成熟期茎鞘 NSC 量显著低于 CI,从而显著提高了 NSC 转运量及其对产量的贡献率。在秸秆还田处理中,SC 和 SS 处理增加了抽穗期和成熟期茎鞘 NSC 的积累量、转运量和对产量的贡献率,但仅 SS 达显著水平。综合不同灌溉和秸秆组合方式来看,AWD+SS 下的 NSC 转运量及其对产量的贡献率显著高于其他 5 个处理。

2.4 根干质量、根冠比与根系氧化力(ROA)

由图 3 可知,在分蘖中期和穗分化始期,各灌溉方式下 SC 处理的根干质量与 S0 处理无显著差异,而 SS 处理有显著促进作用;自抽穗期开始,3 种秸秆还田方式在 AWD 处理后的根干质量显著增加,以 AWD+SS 对根干质量的促进作用最显著;成熟期与抽穗期一致,根干质量表现为 AWD+SS>AWD+SC>AWD+S0>CI+SS>CI+SC>CI+S0。

在分蘖中期和穗分化始期,AWD+SS 处理的根冠比较大,随生育进程的推进,各处理间无显著差异。如图 4 所示,6 个处理下 ROA 在全生育期均呈现先上升后下降趋势,在穗分化始期达到最大值。AWD 处理后的 ROA 均显著高于 CI,两种灌溉方式下,SC 和 SS 处理的 ROA 显著高于 S0。

2.5 温室气体排放和全球增温潜势

如图 7 所示,在相同灌溉措施下,两水稻品种在各秸秆还田处理下 CH₄排放通量的变化趋势基本一致,且 CH₄排放主要出现在水稻分蘖期和穗分化始期,如甬优 2640 移栽后前 42 d 的 CH₄ 累计排放量平均占整个生育期的 80%。不同的是,CI 条件下 S0 和 SC 的 CH₄ 排放通量从较低水平开始增加,直至晒田前达到 CH₄ 日最高排放量,晒田期间迅速下降,而后随复水又激发 CH₄ 排放,出现又一次排放高峰;而 SS 自移栽后以较高水平排放量迅速爬升,较 S0 和 SC 提前出现日 CH₄ 排放通量最高值(在 21

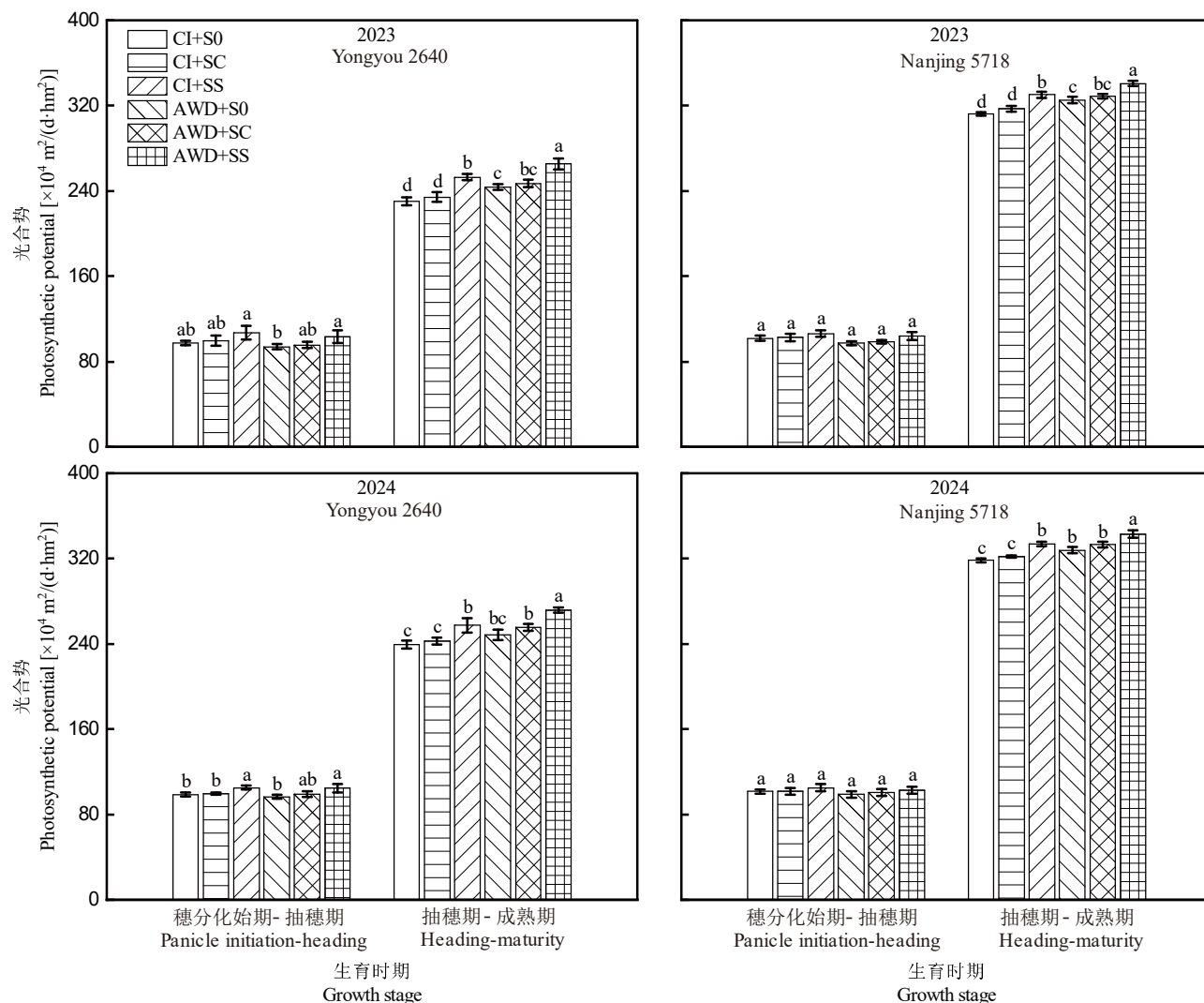
表 4 不同灌溉和秸秆还田方式对全球增温潜势和温室气体强度的影响

Table 4. Effects of irrigation and straw returning methods on global warming potential and greenhouse gas intensity

年度与品种 Year and variety	处理 Treatment	甲烷排放量 CH ₄ emission (kg/hm ²)	氧化亚氮排放量 N ₂ O emission (g/hm ²)	全球增温潜势 Global warming potential(kg/hm ²)	温室气体强度 Greenhouse gas intensity(kg/kg)
2023					
甬优 2640	CI+S0	341.63 b	26.38 e	9231.21 b	0.91 b
Yongyou 2640	CI+SC	253.70 c	20.55 f	6855.51 c	0.65 c
	CI+SS	494.83 a	31.37 d	13368.97 a	1.17 a
	AWD+S0	164.47 d	61.97 b	4457.61 d	0.40 d
	AWD+SC	136.06 d	45.97 c	3686.17 d	0.32 d
	AWD+SS	278.44 c	83.09 a	7540.56 e	0.62 c
南粳 5718	CI+S0	492.53 b	19.59 d e	13303.66 b	1.81 a
Nanjing 5718	CI+SC	407.49 c	15.82 e	11006.55 c	1.47 b
	CI+SS	584.97 a	28.00 d	15801.83 a	1.99 a
	AWD+S0	267.71 e	61.64 b	7245.00 e	0.92 d
	AWD+SC	199.72 f	52.87 c	5406.87 f	0.66 e
	AWD+SS	355.43 d	80.86 a	9078.68 d	1.01 d
2024					
甬优 2640	CI+S0	209.07 c	16.84 d	5649.38 b	0.56 a
Yongyou 2640	CI+SC	172.05 d	15.70 d	4649.71 c	0.45 b
	CI+SS	243.78 a	20.40 c	6587.76 a	0.59 a
	AWD+S0	105.95 e	36.97 b	2870.62 d	0.26 c
	AWD+SC	78.06 f	33.18 b	2116.68 e	0.18 d
	AWD+SS	198.24 b	43.76 a	5364.55 b	0.44 b
南粳 5718	CI+S0	204.93 b	21.86 c	5539.08 b	0.72 b
Nanjing 5718	CI+SC	154.23 d	19.79 c	4169.61 d	0.52 c
	CI+SS	253.02 a	23.93 c	6838.07 a	0.80 a
	AWD+S0	86.67 e	47.82 a b	2353.18 e	0.29 d
	AWD+SC	67.78 f	43.97 b	1842.06 f	0.21 e
	AWD+SS	180.55 c	53.88 a	4889.56 c	0.52 c
方差分析 Analysis of variance					
年份 Year(Y)		4494.78**	526.798**	4508.40**	2777.53**
品种 Variety(V)		339.675**	29.14**	340.63**	1499.71**
灌溉方式 Irrigation regime(I)		3322.83**	3449.78**	3312.84**	3012.75**
秸秆还田 Straw returning(S)		1044.08**	263.31**	1047.99**	511.77**
Y×V		524.73**	73.71**	524.65**	764.267**
Y×I		508.38**	258.03**	507.55**	363.38**
Y×S		74.09**	67.49**	74.52**	27.77**
V×I		52.29**	26.00**	52.21**	201.44**
V×S		7.60*	ns	7.62*	9.42*
I×S		11.01**	46.72**	10.98**	15.17**
Y×V×I		11.01**	ns	19.297**	63.65***
Y×V×S		12.29**	ns	12.30**	ns
Y×I×S		39.61**	13.43**	39.57**	22.11**
Y×V×I×S		7.41*	ns	7.41*	ns

d 左右出现排放高峰), 随后排放量自主下降。
整个生育时期, 两种灌溉方式之间的 N₂O 排放曲线差异较大, AWD 条件下呈现多峰曲线, CI 条件下接近于单峰曲线。N₂O 的排放峰值仅在第一次施用氮肥后、晒田期间和干湿交替灌溉的落干期出

现, 稻田其余淹水期间的 N₂O 排放通量均较小, 两水稻品种的最大日 N₂O 排放通量均产生于 SS 处理。同一灌溉条件下的不同秸秆利用处理同样拥有相似趋势, 以 SS 的排放量最大, 其次是 S0 和 SC 处理。



图中误差棒表示标准误, 不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$, Duncan)。下同。

Error bars in the figure represent standard error, and different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, Duncan). The same below.

图3 灌溉方式和秸秆还田方式对光合势的影响

Fig. 3. Effects of irrigation and straw returning methods on photosynthetic potential

如上所述, 灌溉方式和秸秆还田方式不仅对 CH_4 和 N_2O 累计排放量表现出显著的交互作用, 对 GWP 和 GHGI 同样如此。与 S0 处理相比, SC 显著降低了 GWP 和 GHGI, 而 SS 处理则使这两个指标显著升高。但在采用 AWD 处理后, 无论是 AWD+SC 还是 AWD+SS 组合处理, 其 GWP 和 GHGI 均显著下降, 最终数值甚至低于 CI+S0 处理。其中, 以 AWD+SC 的 GWP 和 GHGI 最低, 显著低于其他处理 20.93%~271.22% 和 25.00%~281.82%。

2.6 主要农艺生理性状与产量和温室气体排放的相关分析

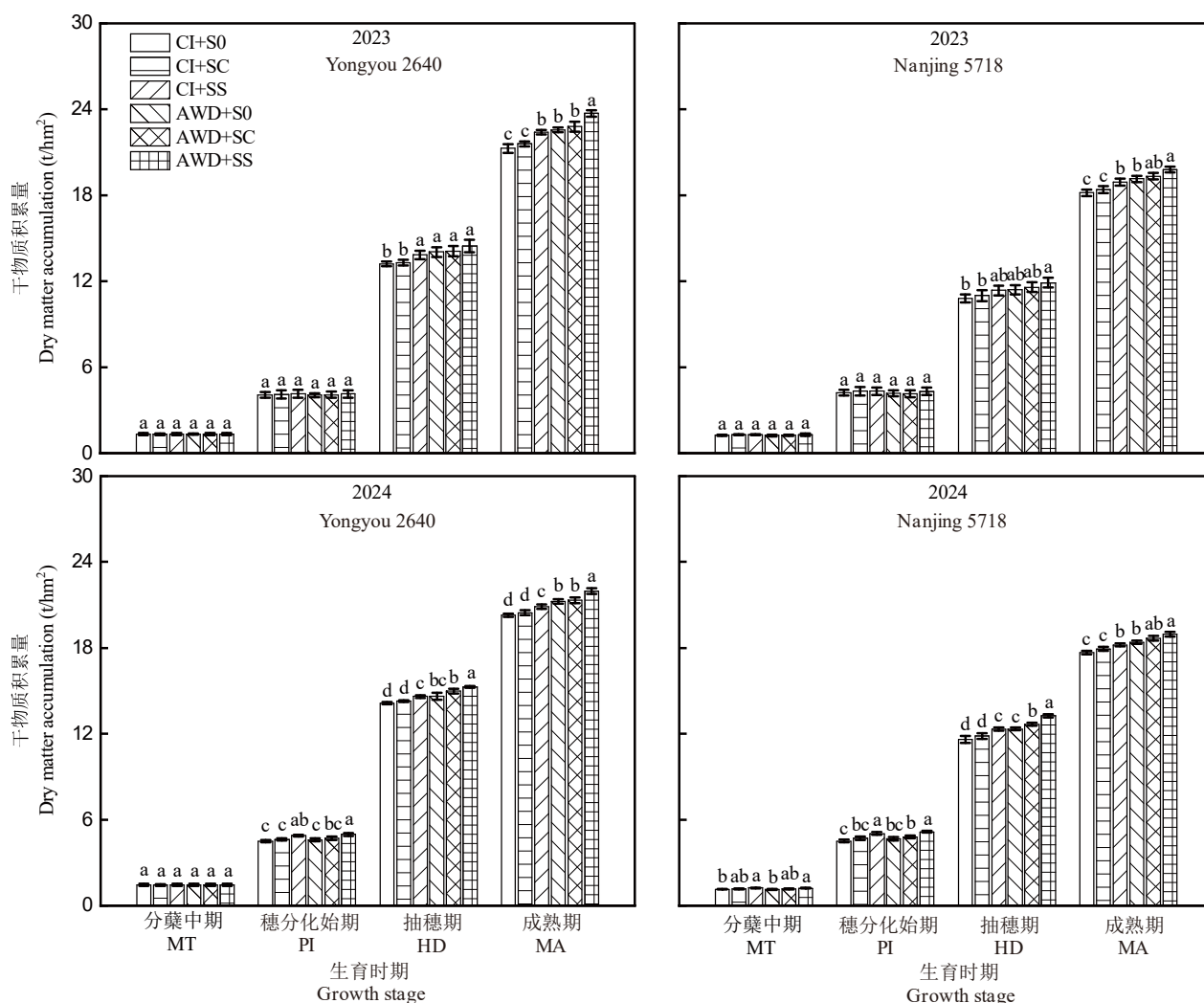
相关分析表明, 甬优 2640 和南粳 5718 的产量均与净光合速率、光合势、干物质积累量、根系干质量显著性正相关, 与根冠比显著负相关或不相

关。 CH_4 累计排放量与 N_2O 累计排放量分别与茎蘖成穗率、净光合速率、NSC 转运量、根冠比和根系氧化力负相关和正相关, 进一步验证了两者此消彼长的关系。值得关注的是, GWP 和 GHGI 与甲烷累计排放量显著正相关, 但与茎蘖成穗率、净光合速率、NSC 转运量、根干质量和根系氧化力显著负相关, 表明提高光合产物能力和增强根系活性是协同实现产量提升和减排的关键途径。

3 讨论

3.1 干湿交替灌溉与秸秆还田的增产效应

已有研究表明, AWD 技术对水稻产量的调控效应存在显著差异^[24-26]。本研究通过建立安全复水



MT, Mid-tillering; PI, Panicle initiation; HD, Heading; MA, Maturity. The same below.

图4 不同灌溉和秸秆还田方式对水稻主要生育时期的干物质积累量

Fig. 4. Effects of irrigation and straw returning methods on dry matter accumulation during main growth stages of rice

阈值(土壤水势不低于-15 kPa), AWD 处理后 S0、SC 以及 SS 的水稻产量较 CI 均显著提高, 其中 AWD+SS 处理表现出最优产量。适量生物炭(<20 t/hm²)配施氮肥能显著提高低肥力稻田的产量^[27-28], 但过量施用(>30 t/hm²)会通过物理吸附作用降低土壤无机态氮有效性, 抑制水稻对氮素的吸收利用, 从而对产量造成负面影响^[29]。在苏扬等^[30]的研究中, 常规灌溉下秸秆腐熟联合生物炭施用有助于改善土壤质量, 从而提升产量。这与本研究中 SS 处理能增产的结论一致, 且我们发现这种处理与干湿交替灌溉有良好的适配度, 能更好地协调穗数、每穗粒数、结实率和千粒重之间的关系, 有助于水稻高产的形成。

前人研究表明, 采用安全复水阈值的干湿交替灌溉技术, 土壤落干期适度水分亏缺不会严重影响水稻体内水分状况, 能够抑制无效分蘖, 并使功能

叶具有较大的叶面积和较高的叶绿素含量, 从而增加光合面积、延缓生育后期叶片衰老, 有利于冠层进行光合生产^[31-32]。水稻产量形成的 70%~90%来自花后的光合产物。本研究中, 3 种秸秆还田处理在 AWD 条件下最终成穗数与 CI 无显著差异, 而茎蘖成穗率显著提高, 这说明秸秆还田在干湿交替条件下优化了分蘖质量(而非数量), 使更多的分蘖发育为有效穗, 提升了水稻的资源分配效率。同时, SC 和 SS 经 AWD 处理后叶片具有较高的净光合速率, 抽穗期至成熟期具有较高的光合势, 表明源器官功能得到增强, 这也是较大干物质积累量形成的原因。此外, 还有 10%~30%的产量来自花前茎鞘储存的 NSC 量, AWD+SC/SS 处理在抽穗期不仅有较高的茎鞘 NSC 积累量, NSC 转运量和 NSC 对产量的贡献率也显著增加, 这表明干湿交替灌溉配合秸秆还田为籽粒灌浆提供了充足碳源, 有利于结实

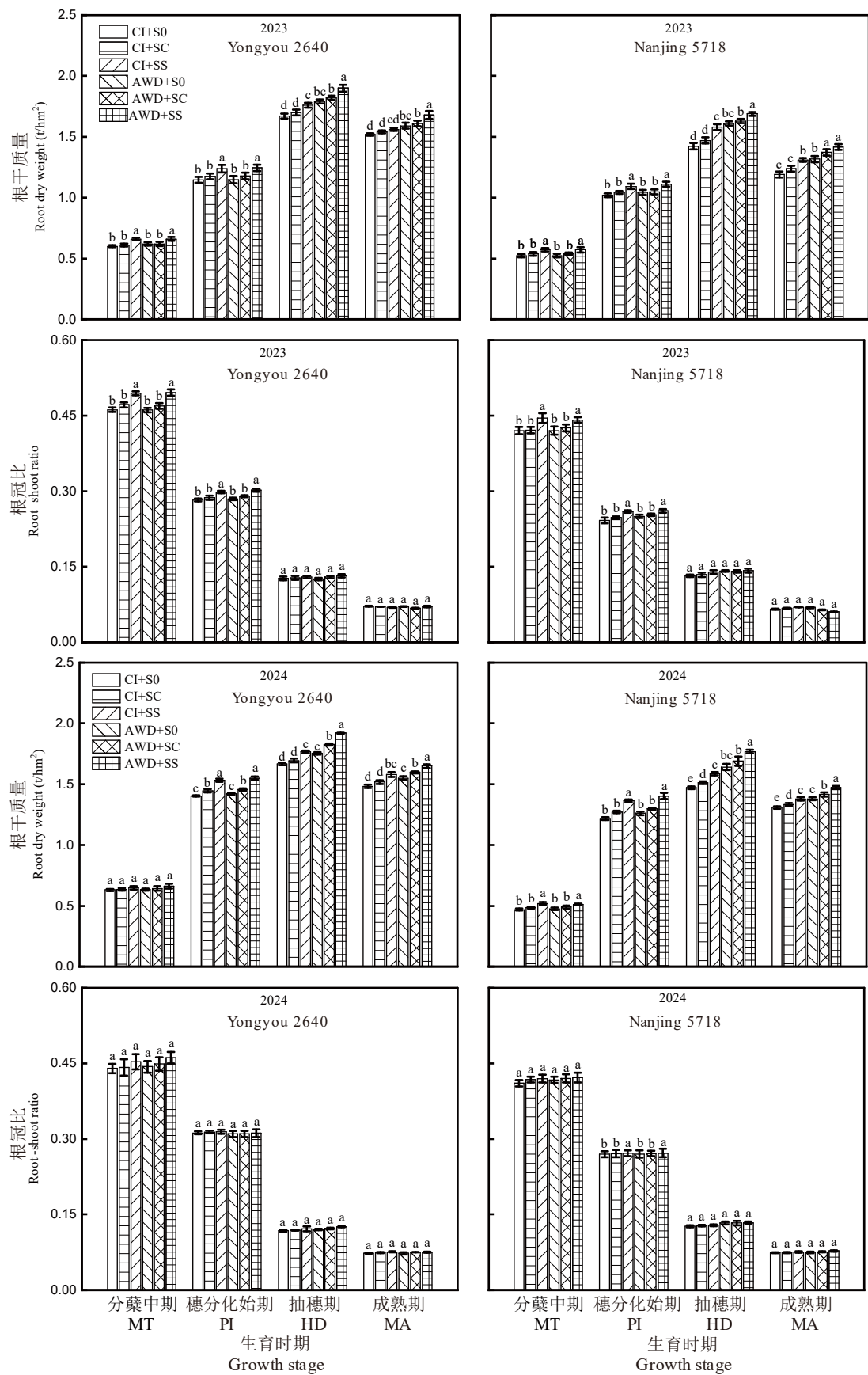


图 5 不同灌溉和秸秆还田方式对水稻主要生育时期的根干质量和根冠比的影响
Fig. 5. Effects of irrigation and straw returning methods on root dry weight and root shoot ratio in main growth stage of rice

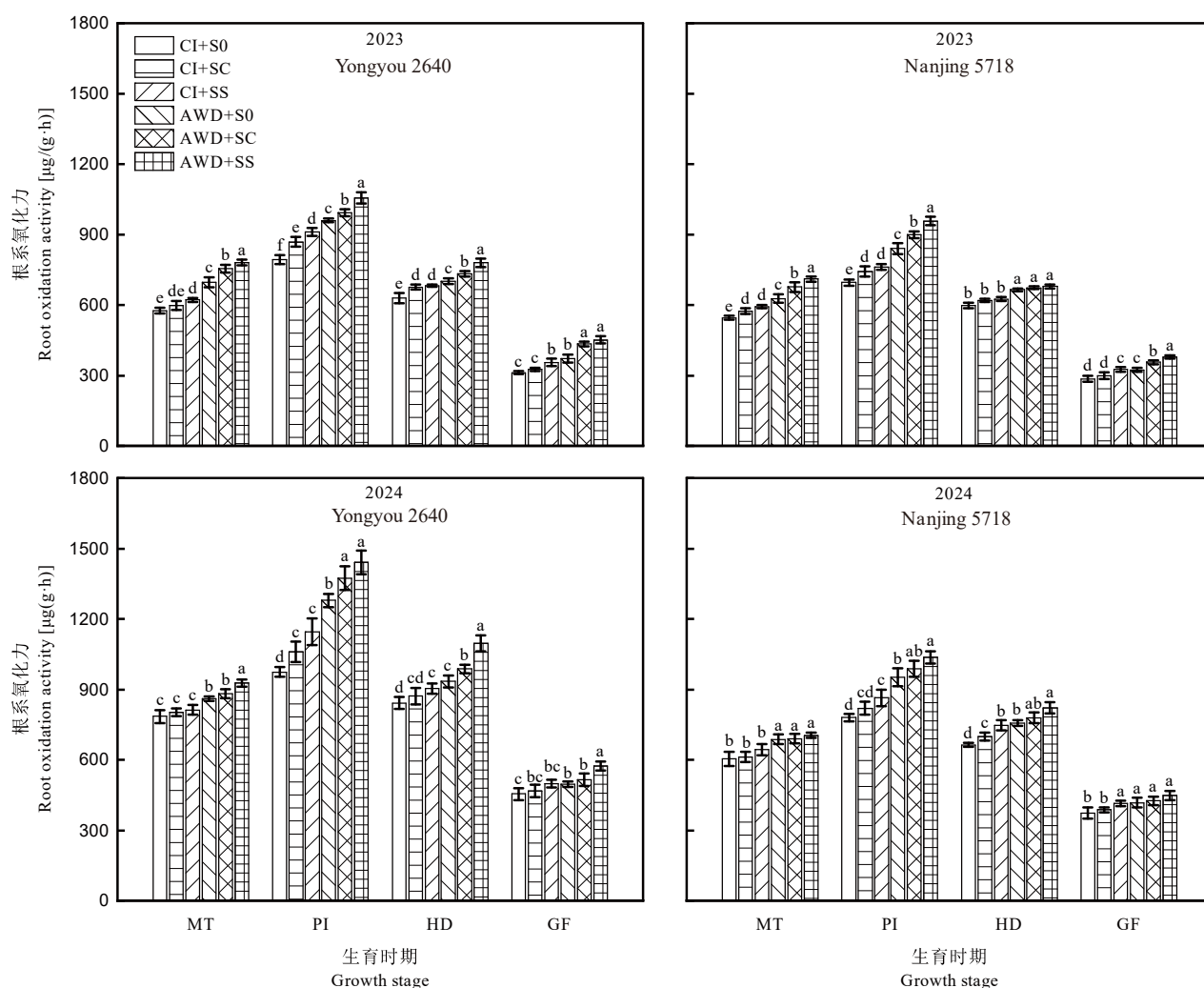


图6 不同灌溉和秸秆还田方式对水稻主要生育期的水稻根系氧化力的影响

Fig. 6. Effects of irrigation and straw returning methods on root oxidative activity of rice roots in main growth stages

率和千粒重的形成^[33]。一般认为，地上部和地下部的协同生长是作物高产的关键^[34-35]。本研究发现，SC和SS处理在AWD条件下显著增加了根系生物量和根系活力，有利于构建适宜的根冠比并促进其他生理过程，避免同化物的无效消耗，为产量的形成创造有利条件^[36]。

还需指出的是，本研究中AWD+SS处理获得最优农艺性状和产量表现，可能是因为秸秆堆腐与生物炭配合后产生了协同效应：我们在使用秸秆促腐菌剂进行秸秆堆腐预处理中，使用尿素调节了C/N，利于微生物分解秸秆，加速养分的释放^[37]；生物炭的灰分元素还能中和秸秆腐解产生的H⁺，改善根际微环境，促进生育前期根系形态生理的建成和地上部分蘖发生^[38]；生物炭的高比表面积和多孔结构为微生物群落提供生态位，同时吸附有效氮，形成缓释氮库，保持了水稻生育后期的氮素需求

[39-40]；这种“速效-缓释”的供肥机制与AWD灌溉结合后，可能产生了减少水稻冗余生长、提高抽穗至成熟期的光合生产、促进根系生长和增加同化物转运等协同效应。

3.2 干湿交替灌溉与秸秆还田的减排效应

稻田CH₄排放是产甲烷菌在厌氧条件下分解土壤有机底物产生的结果，其排放通量受水分管理模式与秸秆碳输入形态调控^[41, 44]。本研究中AWD对抑制甲烷排放的结果与前人研究一致，土壤循环往复的落干-复水过程，有助于改善土壤通气性，抑制产甲烷菌活性并促进CH₄氧化^[42]。虽然SC和SS处理表现出差异化的排放特征，但在AWD模式下的甲烷排放通量都低于CI+S0处理。本研究中SC处理减少甲烷排放的原因，可能是更多的光合物质参与构建根系生长，产生了较大的根系生物量，而不是以根系分泌碳的形式进入土壤供产甲烷菌利

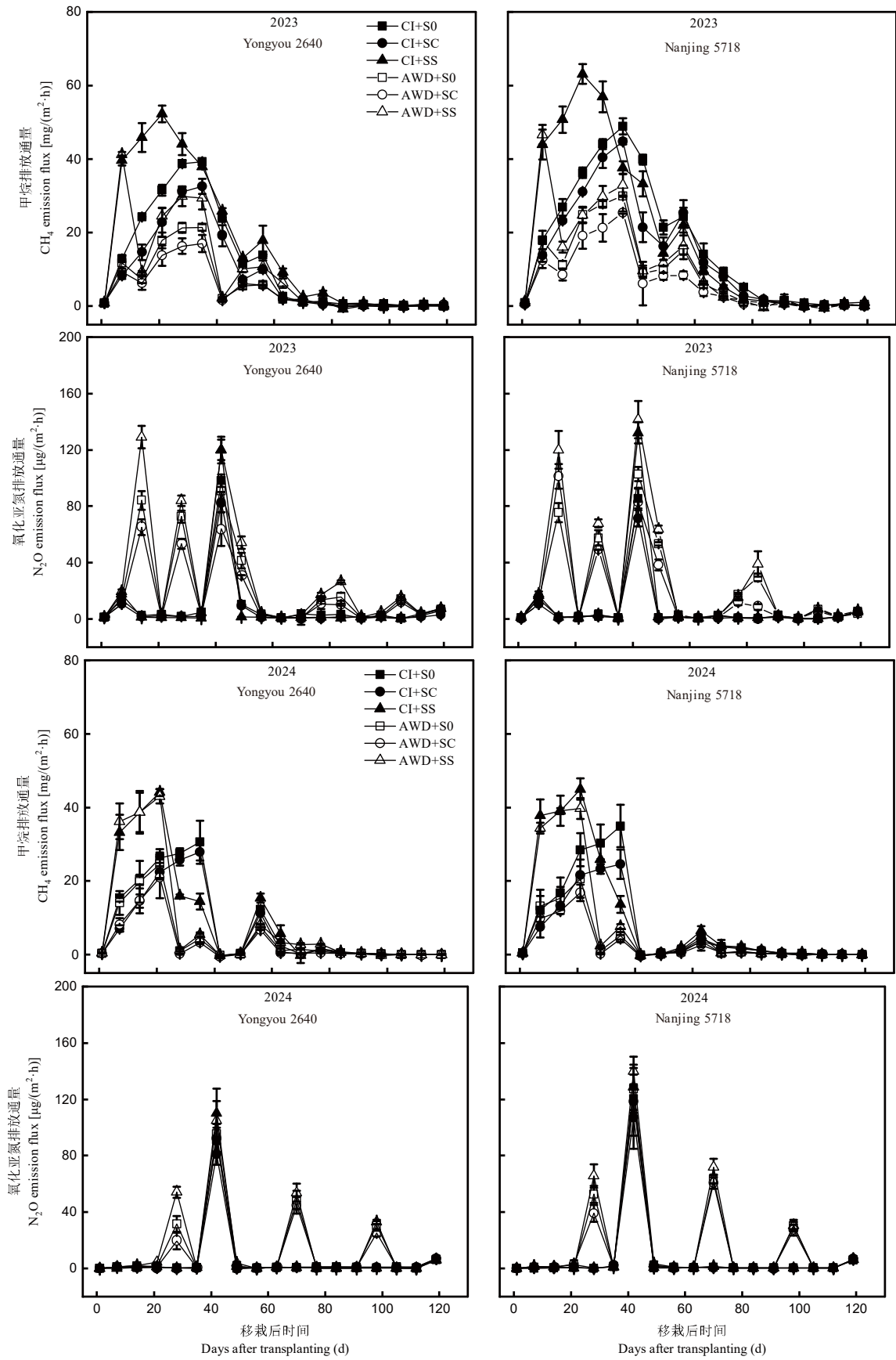
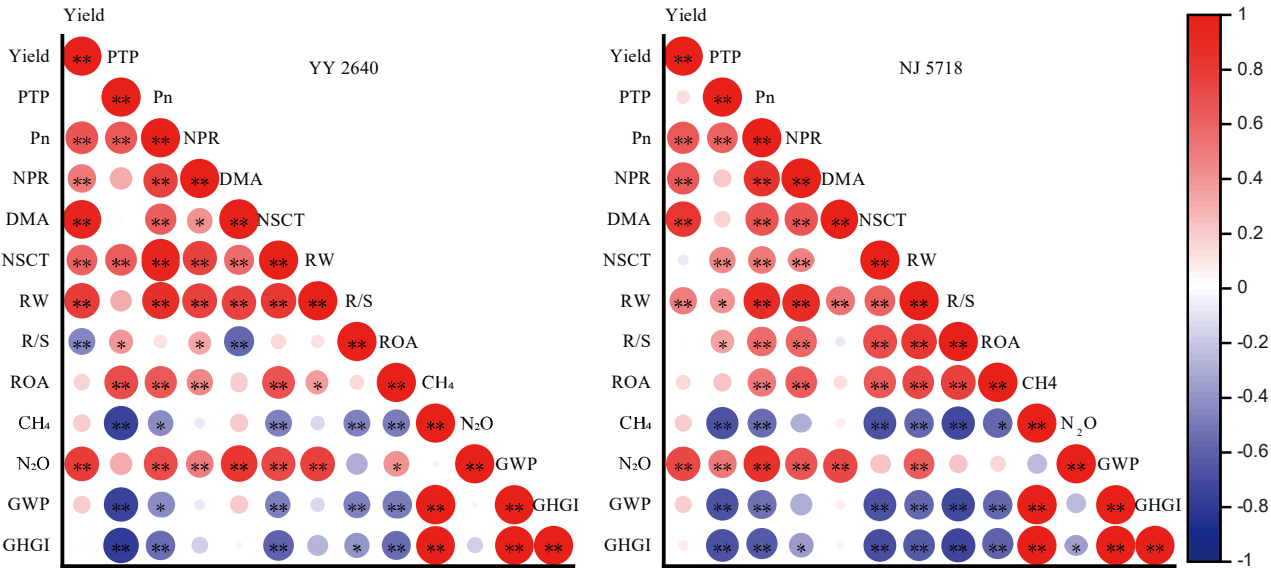


图7 不同灌溉和秸秆还田方式对 CH_4 和 N_2O 排放通量的影响
Fig. 7. Effects of different irrigation and straw returning methods on CH_4 and N_2O emission fluxes



Yield: 产量; PTP: 茎蘖成穗率; Pn: 净光合速率; NPR: 光合势; DMA: 地上部干物质积累量; NSCT: 非结构性碳水化合物转运量; RW: 根干质量; R/S: 根冠比; ROA: 根系氧化力; CH₄: 甲烷累计排放量; N₂O: 氧化亚氮累计排放量; GWP: 全球增温潜势; GHGI: 温室气体强度。*、**分别表示在 5%、1%水平上相关性显著。

PTP, Productive tiller percentage; Pn, Net photosynthetic rate; NPR, Photosynthetic potential; DMA, Above-ground dry matter accumulation; NSCT, Non-structural carbohydrate transfer volume; RW, Root dry weight; R/S, Root to shoot ratio; ROA, Root oxidation power; CH₄, Methane cumulative emissions; N₂O, Nitrous oxide cumulative emissions; GWP, Global warming potential; GHGI, Greenhouse gas intensity. *, ** indicate significant correlation at the 5% and 1% levels, respectively.

图 8 不同灌溉和秸秆还田方式下主要农艺生理性状与产量和温室气体的相关分析
Fig. 8. Correlation analysis of major agronomic and physiological traits with yield and greenhouse gas emission under different irrigation and straw returning methods

用，并且其较大的根系氧化力还表明水稻泌氧能力强，以提高根际氧化还原电位，促进产甲烷菌活性和甲烷氧化^[43]。此外，多源研究表明，施用生物炭虽然补充了土壤碳库，但通过降低产甲烷菌底物，限制 CH₄ 生成；而且生物炭独特的多孔性和较大的比表面积以及灰分作用均可以间接提高甲烷氧化菌的活性，从而减少 CH₄ 排放^[44-47]。本研究中 SS 处理下的甲烷排放规律有所不同，不仅其排放特征曲线提前出现峰值，甲烷累计排放量也显著增加，可能是秸秆促腐处理后，秸秆碳快速向可溶性碳和微生物量碳转化，驱动微生物代谢产生甲烷^[48]。该处理达到峰值后排放量回落，而同一时间的 S0 和 SC 处理甲烷排放量仍处于持续升高状态，可能是生物炭与堆腐处理后的秸秆产生了互作效应，其机理还需要进一步深入研究。

N₂O 排放量取决于土壤 N₂O 产生、扩散和还原程度。在淹水状态下，N₂O 扩散受阻，易被反硝化为 N₂，这也是 CI 下，N₂O 排放量一直很低的原因^[49]。AWD 条件下，稻田土壤通气条件良好，硝化细菌活性增强，铵态氮向硝态氮转化过程中，N₂O 作为中间产物，排放增多^[50]。本研究中，与 S0 相

比，SC 减少了 N₂O 排放，而 SS 呈现增排现象。产生这个现象的原因可能是，秸秆生物炭有吸附硝化/反硝化底物的作用，促进了 N₂O 向 N₂ 的转化率，从而降低 N₂O 排放^[51]；而秸秆堆腐后还田，加之氮肥的大量投入，可能导致土壤中有效氮素过多，引起 N₂O 呈现增排现象^[52]。尽管甲烷和氧化亚氮的增温潜势分别是二氧化碳的 27 倍和 273 倍，AWD+SS 又大幅刺激了氧化亚氮排放，但该处理下甲烷的减排量为 10.12~136.81kg/hm²，氧化亚氮增排量仅 26.92~61.27g/hm²，两者存在数量级差异，与 CI+S0 相比，实现了 GWP 和 GHGI 的显著降低。因此，AWD+SS 能缓解稻田温室效应。

值得关注的是，长期定位试验研究表明，生物炭对甲烷氧化菌活性的促进作用会随还田年限延长呈渐进式衰减，其甲烷减排效应最终可能完全丧失^[53]。针对这一现象，研究者提出通过连续添加新鲜生物炭维持较高 *pmoA/mcrA* 比值，以实现农业系统的持续减排^[54-55]。在碳封存效应方面，现有研究存在分歧：部分学者强调生物炭中惰性碳组分可长期稳定土壤碳库储量，有效抵消温室气体排放^[56-57]；而另一些研究指出，连续施用生物炭导致的稳态碳

积累可能使土壤提前达到“碳饱和”临界点,反而限制其减排潜力^[58-59]。同时,关于生物炭对微生物群落的调控机制也存在科学争议,既有研究证实其能优化微生物群落结构并显著提升多样性指数^[60],也有证据表明长期施用可能诱导微生物群落向特定功能类群定向演替,最终导致生物多样性下降^[61-62]。综合生物炭的长短期效应以及经济效益,我们建议采取“低剂量,高频次”的生物炭施用方法,以实现农田的持续减排。此外,还有研究表明生命周期分析(LCA)在评估农业温室气体减排中发挥重要作用,因此,本研究未来还需要结合农业活动中的碳输入(肥料、除虫、剂、电能等)综合估算碳足迹,以持续关注生物炭在干湿交替下的长期减排效益。此外,本研究中两个品种的产量和温室气体排放对处理的响应是一致的,为了将干湿交替灌溉配合秸秆还田技术进行推广,未来可开展更多品种、更多地点的研究,以验证本研究结果在水稻高产、低排等方面的效益。

4 结论

干湿交替灌溉技术配合秸秆还田技术较常规灌溉下秸秆不还田可以实现稻田高产与减缓温室效应的双重目标。提高的地上部生产与转运能力(干物质积累量、叶面积指数、叶片净光合速率、光合势和茎鞘 NSC 转运)以及改善的根系农艺与生理性状(根干重和根系氧化力)是干湿交替灌溉技术配合秸秆还田技术下产量得到提升的重要原因。同时,土壤通气状况的改善以及根系农艺生理性状的增强有助于促进稻田甲烷氧化,抑制甲烷排放。因此,采用干湿交替灌溉技术配合秸秆还田技术可为长江中下游地区的稻田高产减排提供理论依据和实践指导。

参考文献:

- [1] Zhu X, Ji Y, Huang Q, Shen W, Wei Z, Ma J, Zhang G, Xu H. Temporal variation of methanogenic pathways in rice fields under three different cropping systems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2024, 60(6): 743-756.
- [2] Li R C, Tian Y G, Wang F, Sun Y F, Lin B J, Dang Y P, Zhao X, Zhang H L, Xu Z Y. Optimizing the rate of straw returning to balance trade-offs between carbon emission budget and rice yield in China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 47: 166-177.
- [3] Li Y, Shao X, Sheng Z, Guan W, Xiao M. Water conservation and nitrogen loading reduction effects with controlled and mid-gathering irrigation in a paddy field[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(3): 1085-1091.
- [4] 顾希, 刘昆, 高捷, 刘立军. 节水灌溉技术及其对水稻产量影响的研究进展[J]. 杂交水稻, 2022, 37(2): 7-13. Gu X, Liu K, Gao J, Liu L J. Research advances of water-saving irrigation methods and their influences on rice yield[J]. *Hybrid Rice*, 2022, 37(2): 7-13. (in Chinese with English abstract)
- [5] Maneepitak S, Ullah H, Paothong K, Kachenchart B, Datta A, Shrestha R P. Effect of water and rice straw management practices on yield and water productivity of irrigated lowland rice in the Central Plain of Thailand[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 89-97.
- [6] Zhang Y, Wang W, Li S, Zhu K, Hua X, Harrison M T, Liu K, Yang J, Liu L, Chen Y. Integrated management approaches enabling sustainable rice production under alternate wetting and drying irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 281: 108265.
- [7] Carrijo D R, Lundy M E, Linquist B A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 173-180.
- [8] Gao R, Zhuo L, Duan Y, Yan C, Yue Z, Zhao Z, Wu P. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield, water-saving, and emission reduction in rice fields: A global meta-analysis[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 353: 110075.
- [9] Wei Q, Xu J, Sun L, Wang H, Lv Y, Li Y, Hameed F. Effects of straw returning on rice growth and yield under water-saving irrigation[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2019, 79(1): 66-74.
- [10] Shao J, Gao C, Afi Seglah P, Xie J, Zhao L, Bi Y, Wang Y. Analysis of the available straw nutrient resources and substitution of chemical fertilizers with straw returned directly to the field in China[J]. *Agriculture*, 2023, 13(6): 1187.
- [11] 秦子元, 张忠学, 郑和祥, 赵文博, 刘祥. 秸秆还田下灌溉模式对水稻产量及水氮利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(9): 191-199. Qin Z Y, Zhang Z X, Zheng H X, Zhao W B, Liu X. Effects of irrigation modes under straw returning to field on rice yield and water and nitrogen utilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(9): 191-199. (in Chinese with English abstract)
- [12] Liu C, Lu M, Cui J, Li B, Fang C. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [13] Jin P H, Chen Z, Wang H, Lü R J, Hu T L, Zhou R, Zhang J G, Lin X W, Liu Q, Xie Z B. 12-year continuous biochar application: Mitigating reactive nitrogen loss in

- paddy fields but without rice yield enhancement[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 375: 109223.
- [14] Shaghaleh H, Zhu Y, Shi X, Alhaj H Y, Ma C. Co-effects of nitrogen fertilizer and straw-decomposing microbial inoculant on decomposition and transformation of field composted wheat straw[J]. *Life*, 2023, 13(10): 1993.
- [15] Li H, Liu Y, Jiao X, Li J, Liu K, Wu T, Zhang Z, Luo D. Response of soil nutrients retention and rice growth to biochar in straw returning paddy fields[J]. *Chemosphere*, 2023, 312(1): 137244.
- [16] 于宗波, 杨恒山, 萨如拉, 李媛媛, 罗方, 郭晓旭. 不同质地土壤玉米秸秆还田配施腐熟剂效应的研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 234-240.
- Yu Z B, Yang H S, Sa R L, Li Y Y, Luo F, Guo X X. Effect of maize straw returning combined with maturation agent in different texture soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 234-240. (in Chinese with English abstract)
- [17] 肖治林, 王琛, 张瑛, 景文疆, 张伟杨, 顾骏飞, 刘立军, 王志琴, 杨建昌, 张耗. 控释氮肥施用策略对稻茬小麦产量和氮肥吸收利用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(4): 472-484.
- Xiao Z L, Wang C, Zhang Y, Jing W J, Zhang W Y, Gu J F, Liu L J, Wang Z Q, Yang J C, Zhang H. Effect of controlled-released nitrogen fertilizer application strategy on yield and nitrogen uptake and utilization of wheat following rice stubble[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(4): 472-484. (in Chinese with English abstract)
- [18] 顾汉柱, 王琛, 吴昊, 张瑛, 肖治林, 景文疆, 张耗. 减氮方式对不同穗型粳稻产量和品质的影响[J]. *作物研究*, 2023, 37(5): 448-460.
- Gu H Z, Wang C, Wu H, Zhang Y, Xiao Z L, Jing W J, Zhang H. Effects of nitrogen reduction on yield and quality of Japonica rice with different panicle type[J]. *Crop Research*, 2023, 37(5): 448-460. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张耗, 余超, 陈可伟, 孔祥胜, 刘海浪, 陈俊义, 顾骏飞, 刘立军, 王志琴, 杨建昌. 直播方式对水稻生理性状和产量的影响及其成本分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 58-64.
- Zhang H, Yu C, Chen K W, Kong X S, Liu H L, Chen J Y, Gu J F, Liu L J, Wang Z Q, Yang J C. Effect of direct-seeding methods on physiological characteristics and grain yield of rice and its cost analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 58-64. (in Chinese with English abstract)
- [20] 景文疆, 顾汉柱, 张小祥, 吴昊, 张伟杨, 顾骏飞, 刘立军, 王志琴, 杨建昌, 张耗. 中籼水稻品种改良过程中米质和根系特征对灌溉方式的响应[J]. *中国水稻科学*, 2022, 36(5): 505-519.
- Jing W J, Gu H Z, Zhang X X, Wu H, Zhang W Y, Gu J F, Liu L J, Wang Z Q, Yang J C, Zhang H. Response of grain quality and root characteristics to irrigation methods during mid-season indica rice varieties improvement[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(5): 505-519. (in Chinese with English abstract)
- [21] 邓亚萍. 水稻耐低磷的机理与栽培调控技术[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- Deng Y P. Mechanism in tolerance to low phosphorus and cultivation regulation techniques of rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [22] 马义虎, 顾道健, 刘立军, 王志琴, 张耗, 杨建昌. 玉米秸秆源有机肥对水稻产量与温室气体排放的影响[J]. *中国水稻科学*, 2013, 27(5): 520-528.
- Ma Y H, Gu D J, Liu L J, Wang Z Q, Zhang H, Yang J C. Effects of the organic fertilizers made from maize straw on grain yield of rice and emission of greenhouse gases from paddy fields[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(5): 520-528. (in Chinese with English abstract)
- [23] IPCC. Climate change 2023: Synthesis report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [24] Zhu K, Zhou T, Li Z, Zhang W, Wang Z, Gu J, Yang J. Controlled irrigation can mitigate the greenhouse effects of rice paddy fields with long-term straw return and stimulate microbial necromass carbon accumulation[J]. *Field Crops Research*, 2024, 317: 109571.
- [25] Dai W, Bao Z, Meng J, Chen T, Zhang W, Chen Y, Lin L, Su X, Jiang X. Biochar incorporation increases grain yield, net ecosystem CO₂ exchange, and decreases CH₄ emissions in an alternate wetting and drying paddy ecosystem[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 34: 103577.
- [26] Bo Y, Wang X, van Groenigen K J, Linquist B A, Müller C, Li T, Yang J, Jägermeyr J, Qin Y, Zhou F. Improved alternate wetting and drying irrigation increases global water productivity[J]. *Nature Food*, 2024, 5(12): 1005-1013.
- [27] Huang M, Yang L, Qin H, Jiang L, Zou Y. Quantifying the effect of biochar amendment on soil quality and crop productivity in Chinese rice paddies[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154: 172-177.
- [28] Liu Y, Li J, Jiao X, Li H, Hu T, Jiang H, Mahmoud A. Effects of biochar on water quality and rice productivity under straw returning condition in a rice-wheat rotation region[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 819: 152063.
- [29] Sun H, Zhang H, Xiao H, Shi W, Müller K, Van Zwieten L, Wang H. Wheat straw biochar application increases ammonia volatilization from an urban compacted soil giving a short-term reduction in fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,

- 19(4): 1624-1631.
- [30] 苏扬, 商小兰, 钱忠明, 吴林根, 黄佳琦, 庄海峰, 赵宇飞, 党洪阳, 徐立军. 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[J]. *浙江农业学报*, 2025, 37(5): 1139-1148.
- Su Y, Shang X L, Qian Z M, Wu L G, Huang J Q, Zhuang H F, Zhao Y F, Dang H Y, Xu L J. Effects of synergistic enhancement of straw returning to the field with decomposition agent and biochar on soil quality and rice growth[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2025, 37(5): 1139-1148. (in Chinese with English abstract)
- [31] Wang Z, Zhang W, Beebout S S, Zhang H, Liu L, Yang J, Zhang J. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates[J]. *Field Crops Research*, 2016, 193: 54-69.
- [32] Zhang W, Yu J, Xu Y, Wang Z, Liu L, Zhang H, Gu J, Zhang J, Yang J. Alternate wetting and drying irrigation combined with the proportion of polymer-coated urea and conventional urea rates increases grain yield, water and nitrogen use efficiencies in rice[J]. *Field Crops Research*, 2021, 268: 108165.
- [33] Zhang H, Jing W, Zhao B, Wang W, Xu Y, Zhang W, Gu J, Liu L, Wang Z, Yang J. Alternative fertilizer and irrigation practices improve rice yield and resource use efficiency by regulating source-sink relationships[J]. *Field Crops Research*, 2021, 265: 108124.
- [34] 杨颖. 不同籼稻品种的农艺生理特征对干湿交替灌溉的响应[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- Yang Y. Response of agronomic and physiological characteristics of different indica rice varieties to alternating dry and wet irrigation [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [35] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 王志琴, 杨建昌. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(7): 1026-1036.
- Chu G, Zhan M F, Zhu K Y, Wang Z Q, Yang J C. Effects of alternating dry and wet irrigation on rice yield and water use efficiency [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(7): 1026-1036. (in Chinese with English abstract)
- [36] 徐国伟, 赵喜辉, 江孟孟, 陆大克, 陈明灿. 轻度干湿交替灌溉协调水稻根冠生长、提高产量及氮肥利用效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1388-1396.
- Xu G W, Zhao X H, Jiang M M, Lu D K, Chen M C. Mild dry and wet alternating irrigation harmonizes root shoot growth, improves yield and nitrogen use efficiency of rice [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2021, 27(8): 1388-1396. (in Chinese with English abstract)
- [37] Ma Y, Liu D L, Schwenke G, Yang B. The global warming potential of straw-return can be reduced by application of straw-decomposing microbial inoculants and biochar in rice-wheat production systems[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252: 835-845.
- [38] Zulfikar F, Wei X, Shaikat N, Chen J, Raza A, Younis A, Nafees M, Abideen Z, Zaid A, Latif N, Naveed M, Siddique K H M. Effects of biochar and biochar-compost mix on growth, performance and physiological responses of potted *Alpinia zerumbet*[J]. *Sustainability*, 2021, 13(20): 11226.
- [39] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, Masiello C A, Hockaday W C, Crowley D. Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [40] 张伟明, 修立群, 吴迪, 孙媛媛, 顾闻琦, 张鉉贵, 孟军, 陈温福. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. *作物学报*, 2021, 47(1): 1-18.
- Zhang W M, Xiu L Q, Wu D, Sun Y Y, Gu W Q, Zhang H G, Meng J, Chen W F. Review of biochar structure and physicochemical properties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [41] 颜永毫, 王丹丹, 郑纪勇. 生物炭对土壤 N_2O 和 CH_4 排放影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(8): 140-146.
- Yan Y H, Wang D D, Zheng J Y. Advances in effects of biochar on the soil N_2O and CH_4 emissions[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(8): 140-146. (in Chinese)
- [42] 蔡炜, 秦缘, 陈浩田, 林晨语, 杨建昌, 张伟阳. 干湿交替灌溉和生物质炭施用对稻田碳汇与甲烷排放的影响及其机理研究进展[J]. *中国稻米*, 2024, 30(6): 7-14.
- Cai W, Qin Y, Chen H T, Lin C Y, Yang J C, Zhang W Y. Research advances in the mechanism underlying alternating wet and dry irrigation and biochar affect carbon sequestration and methane emissions in paddy field[J]. *China Rice*, 2024, 30(6): 7-14. (in Chinese with English abstract)
- [43] 张瑛, 顾嘉怡, 张旻昊, 刘彬彬, 王琛, 张耗. 水稻根系特征与稻田甲烷排放的关系研究进展[J]. *杂交水稻*, 2024, 39(6): 1-8.
- Zhang Y, Gu J Y, Zhang M H, Liu B B, Wang C, Zhang H. Research progress on the relationship between rice root characteristics and methane emission from paddy fields[J]. *Hybrid Rice*, 2024, 39(6): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [44] 王静, 丁树文, 程益涵, 万水霞, 吴萍萍, 廖斌. 化肥减量配施生物炭和秸秆对砂姜黑土区水稻产量、养分吸收和土壤碳的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2024, 43(5): 116-125.
- Wang J, Ding S W, Cheng Y H, Wan S X, Wu P P, Liao B. Effects of reducing chemical fertilizers combined with applying biochar and straw on yield of rice and nutrient absorption and carbon in soil in lime concretion black soil

- areas[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(5): 116-125. (in Chinese with English abstract)
- [45] Zhang K, Zhang Z, Sui Y. The application years of biochar affect CH₄ emission by negatively methanogens and increased rice yield[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2025, 38: 104099.
- [46] 汪勇, 吕茹洁, 黎星, 胡水秀, 商庆银. 生物炭与氮肥施用对双季稻田温室气体排放的影响[J]. *中国稻米*, 2021, 27(1): 20-26.
- Wang Y, Lü R J, Li X, Hu S X, Shang Q Y. Effects of biochar and nitrogen incorporation on greenhouse gas emissions in double rice-cropping system[J]. *China Rice*, 2021, 27(1): 20-26. (in Chinese with English abstract)
- [47] Zhao X, Li R C, Liu W X, Liu W S, Xue Y H, Sun R H, Wei Y X, Chen Z, Lal R, Dang Y P, Xu Z Y, Zhang H L. Estimation of crop residue production and its contribution to carbon neutrality in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 203: 107450.
- [48] Liu G, Yu H, Ma J, Xu H, Wu Q, Yang J, Zhuang Y. Effects of straw incorporation along with microbial inoculant on methane and nitrous oxide emissions from rice fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 518/519: 209-216.
- [49] Lin Y, Ding W, Liu D, He T, Yoo G, Yuan J, Chen Z, Fan J. Wheat straw-derived biochar amendment stimulated N₂O emissions from rice paddy soils by regulating the AmoA genes of ammonia-oxidizing bacteria[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 89-98.
- [50] Verhoeven E, Decock C, Barthel M, Bertora C, Sacco D, Romani M, Sleutel S, Six J. Nitrification and coupled nitrification-denitrification at shallow depths are responsible for early season N₂O emissions under alternate wetting and drying management in an Italian rice paddy system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 58-69.
- [51] van den Heuvel R N, Bakker S E, Jetten M S M, Hefting M M. Decreased N₂O reduction by low soil pH causes high N₂O emissions in a riparian ecosystem[J]. *Geobiology*, 2011, 9(3): 294-300.
- [52] 马煜春, 周伟, 刘翠英, 孙丽英, 杨波, 郑向群. 秸秆腐熟剂对秸秆还田稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(2): 159-165.
- Ma Y C, Zhou W, Liu C Y, Sun L Y, Yang B, Zheng X Q. Effects of straw decomposing inoculants on methane and nitrous oxide emissions in paddy fields incorporated with straw[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(2): 159-165. (in Chinese with English abstract)
- [53] Nan Q, Xin L, Qin Y, Waqas M, Wu W X. Exploring long-term effects of biochar on mitigating methane emissions from paddy soil: A review[J]. *Biochar*, 2021, 3(2): 125-134.
- [54] Nan Q, Wang C, Wang H, Yi Q, Wu W. Mitigation methane emission via annual biochar amendment paralyzed with rice straw from the same paddy field[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 746(1): 141351.
- [55] Nan Q, Speth D R, Qin Y, Chi W, Milucka J, Gu B, Wu W. Biochar application using recycled annual self straw reduces long-term greenhouse gas emissions from paddy fields with economic benefits[J]. *Nature Food*, 2025, 6(5): 456-465.
- [56] Liu C, Chen T, Zhang F, Han H W, Yi B J, Chi D C. Soil carbon sequestration increment and carbon-negative emissions in alternate wetting and drying paddy ecosystems through biochar incorporation[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 300: 108908.
- [57] Gross A, Bromm T, Polifka S, Fischer D, Glaser B. Long-term biochar and soil organic carbon stability - Evidence from field experiments in Germany[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954:176340.
- [58] Qin Z, Huang Y, Zhuang Q. Soil organic carbon sequestration potential of cropland in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, 27(3): 711-722.
- [59] Nazir M J, Li G, Nazir M M, Zulfikar F, Siddique K H M, Iqbal B, Du D. Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 237: 105959.
- [60] Rasul M, Cho J, Shin H S, Hur J. Biochar-induced priming effects in soil via modifying the status of soil organic matter and microflora: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150304.
- [61] Xu Y, He L, Chen J, Lyu H, Wang Y, Yang L, Yang S, Liu Y. Long-term successive biochar amendments alter the composition and α -diversity of bacterial community of paddy soil in rice-wheat rotation[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 921766.
- [62] Chen Y, Du Z, Weng Z H, Sun K, Zhang Y, Liu Q, Yang Y, Li Y, Wang Z, Luo Y, Gao B, Chen B, Pan Z, Van Zwieten L. Formation of soil organic carbon pool is regulated by the structure of dissolved organic matter and microbial carbon pump efficacy: A decadal study comparing different carbon management strategies[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(18): 5445-5459.