

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.52029

不同节水灌溉方式对东北稻区水稻产量和群体质量的影响

叶 凡¹ 李 帅¹ 李思宇¹ 陈 云² 窦超银³ 刘立军^{1,*}

¹ 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室 / 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009; ² 扬州大学生物科学与技术学院, 江苏扬州 225009; ³ 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009

摘 要: 水资源短缺是东北黑土区水稻生产的重要限制因子, 推广应用节水灌溉技术对缓解当地用水紧张与水稻可持续发展有重要意义。本试验以常规粳稻龙粳 31 为材料, 于 2023—2024 年在黑龙江省佳木斯市建三江七星农场田间栽培条件下, 系统比较分析浅湿灌溉(SWI)、干湿交替灌溉(AWD)和控制灌溉(CI) 3 种典型节水灌溉方式对水稻产量和群体质量的影响。结果表明: (1) 与常规水层灌溉(CF)相比, SWI、AWD 和 CI 显著降低灌溉水用量, 节水率分别为 9.5%~18.9%、12.2%~23.4%和 17.0%~26.8%; 产量分别提高 10.5%~11.2%、7.4%~13.5%和 2.11%~2.25%; 灌溉水利用效率分别提高 21.7%~29.9%、22.3%~39.8%和 22.0%~29.2%。SWI 与 AWD 增产显著主要得益于总颖花量显著增加。与 SWI 相比, AWD 节水效果更加明显。(2) SWI 和 AWD 处理的茎蘖成穗率、高效叶面积指数、粒叶比、茎鞘非结构性碳水化合物(NSCs)的累积与转运效率、花后干物质积累、根系伤流量与根系活力等群体质量指标均不同程度优于 CF。此外, 上述两处理还提高了叶片 SPAD 值和抗氧化酶活性并降低了丙二醛(MDA)含量。综上, SWI 和 AWD 可在大幅度节约灌溉用水的前提下, 优化水稻群体质量指标, 显著提高水稻产量, 研究结果为推进我国东北黑土稻区的节水灌溉策略提供了理论依据。

关键词: 水稻; 节水灌溉; 产量; 群体质量; 水分利用效率

Effects of water-saving irrigation on rice yield and population quality in Northeast China

Ye Fan¹, Li Shuai¹, Li Si-Yu¹, Chen Yun², Dou Chao-Yin³, and Liu Li-Jun^{1,*}

¹ Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou University / Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, Jiangsu, China; ² Bioscience and Biotechnology College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China; ³ College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China

Abstract: Water scarcity is a major constraint on rice production in the black soil region of Northeast China, underscoring the urgent need for water-saving irrigation technologies to support sustainable cultivation. A field experiment was conducted during 2023–2024 at Jiansanjiang Qixing farm, Kiamusze, Heilongjiang province, using the conventional *japonica* cultivar Longjing 31. Three water-saving irrigation regimes—shallow-wet irrigation (SWI), alternate wetting and drying (AWD), and controlled irrigation (CI), were evaluated against continuous flooding (CF) to assess their effects on grain yield and crop population traits. (1) Compared to CF, irrigation water input was reduced by 9.5%–18.9% under SWI, 12.2%–23.4% under AWD, and 17.0%–26.8% under CI. Grain yield increased by 10.5%–11.2%, 7.4%–13.5%, and 2.11%–2.25%, respectively, while irrigation water use efficiency improved by 21.7%–29.9%, 22.3%–39.8%, and 22.0%–29.2%. Yield improvements under SWI and AWD were primarily attributed to increases in total spikelet number, with AWD exhibiting significantly higher water use efficiency than SWI. (2) Both SWI and AWD also enhanced population quality by improving the productive tiller rate, effective leaf area index, spikelets-to-leaf area ratio, non-structural carbohydrate (NSCs) accumulation and remobilization, post-anthesis dry matter production, root activity,

本研究由国家重点研发计划项目(2022YFD1500402)和扬州大学高端人才支持计划项目资助。

This study was supported by the National Key R&D Program of China (2022YFD1500402) and the High-end Talent Support Program of Yangzhou University.

* 通信作者(Corresponding author): 刘立军, E-mail: ljliu@yzu.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: DX120230124@stu.yzu.edu.cn

Received (收稿日期): 2025-08-22; Accepted (接受日期): 2025-11-18; Published online (网络出版日期): 2025-12-08.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251208.1007.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

and antioxidant defense. Additionally, they maintained higher leaf SPAD values and reduced membrane lipid peroxidation. In conclusion, SWI and AWD not only conserve irrigation water but also optimize physiological performance, thereby contributing to yield enhancement. These findings provide a theoretical foundation for the adoption of water-saving irrigation strategies in rice cultivation within the black soil region of Northeast China.

Keywords: rice (*Oryza sativa* L.); water-saving irrigation; yield; population quality; water use efficiency

水稻是我国重要的粮食作物,在保障国家粮食安全中发挥着重要作用。黑龙江省是我国粳稻的主产区,粳稻播种面积和产量均位居全国首位,其中,粳稻产量占全国总产量的比重超过 10%,为国家粮食供给和口粮安全提供了坚实支撑^[1-3]。然而,近年来随着气候变化导致水资源时空分配不均等问题加剧,黑龙江省稻作面积出现波动,水资源短缺已成为制约该地区稻米稳产增产的重要因素^[4-6]。因此,合理规划农业用水、明确黑龙江粳稻生产区节水增效的栽培措施,对于保障该区域粮食安全和推动水稻可持续发展具有重要意义。

灌溉方式是影响水稻生产的重要管理措施。长期以来,我国粳稻生产多采用全生育期淹水灌溉,虽然有利于水稻稳产,但存在耗水量大、水肥利用率低等问题,在东北黑土稻区表现尤为突出^[7-9]。近年来,浅湿灌溉(shallow wet irrigation, SWI)、干湿交替灌溉(alternate wetting and drying irrigation, AWD)、控制灌溉(controlled irrigation, CI)等节水灌溉模式被提出并推广应用。SWI 是指稻田始终保持较浅的水层或时湿时润状态,不长期深层积水,从而降低耗水量^[10-11]; AWD 则允许田面间歇落干,当土壤含水量下降到设定阈值时再灌水,优化水分供给并提高水分利用效率^[12-14]; CI 通过在不同生育期精准控制水层深浅及灌溉时机,以减少无效蒸发和渗漏^[15-16]。研究表明,这些节水灌溉方式不仅有助于降低稻田耗水量,还能通过改善根系发育和水稻群体结构,促进分蘖发生,

提高光合性能及产量形成^[11,13,17]。不同节水灌溉方式在提高水稻产量及水分利用效率方面具有一定潜力,但其作用机制和产量响应存在差异^[14,18]。

东北稻区以黑土和草甸土为主,与南方稻区在区域气候、土壤保水性和养分供应特征等方面均存在显著差异。东北地区纬度高、热量资源有限、积温低,水稻生育周期长;稻季降水时空分布不均。近年来,国内外已针对节水灌溉对水稻生长发育及产量的调控开展了大量研究,但受生态条件与品种特性等因素影响,不同灌溉模式的适应性与效果存在显著的地区差异^[19-20]。尤其在以粳稻为主的东北稻区,其独特的寒地生态条件决定了节水灌溉的适应机制可能与南方稻区不同。然而,目前关于不同节水灌溉模式对该区域水稻产量形成及关键生理特性的影响研究仍显薄弱。为此,本研究系统分析了 SWI、AWD 与 CI 三种节水灌溉模式对黑龙江粳稻群体质量、生理特性及产量构成的影响,旨在为东北黑土区粳稻高产稳产及节水高效栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与处理设置

1.1.1 供试品种与栽培概况 试验于 2023—2024 年在黑龙江省佳木斯市建三江七星农场国家科技园研发中心试验农场(132°39'E, 47°16'N)进行。当地水稻生长季气象数据如图 1 所示。试验田前茬作

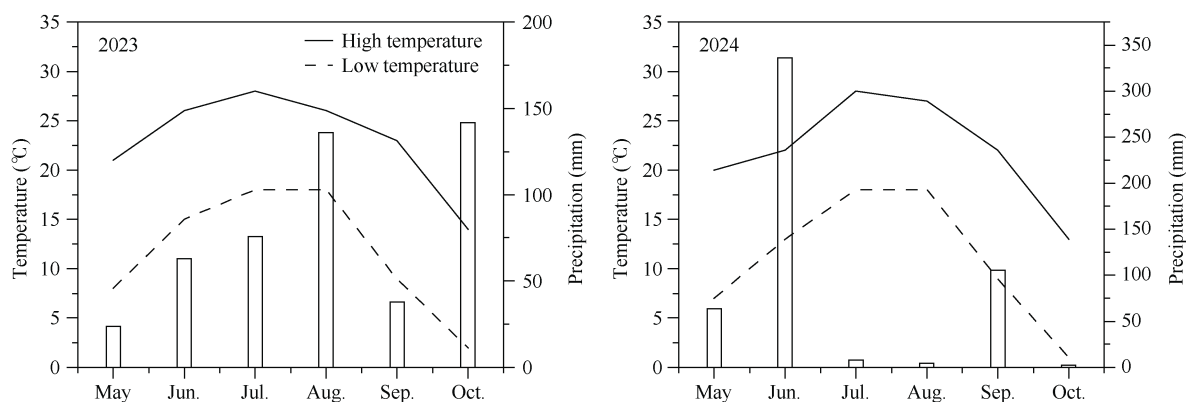


图 1 水稻生长季的气温与降水量

Fig. 1 Temperature and precipitation during the rice growth period

物为水稻, 土壤质地为草甸白浆土, 水稻移栽前土壤全氮含量为 1.64~1.71 g kg⁻¹, 有效磷含量为 35.94~37.81 mg kg⁻¹, 速效钾含量为 139.26~142.31 mg kg⁻¹, 有机质含量为 38.79~39.67 g kg⁻¹。供试品种为当地种植面积较广的常规粳稻品种龙粳 31。采用当地常规机插育秧方式。每年 4 月 15 日至 16 日播种, 5 月 19 日至 20 日采用机插秧方式进行移栽。机插株行距为 12 cm × 30 cm, 每穴 5~6 苗。

试验所用肥料为尿素(含 N 46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含 K₂O 40%)。肥料施用标准为当地施肥方法, 即氮肥(纯 N 105 kg hm⁻²)按基肥(移栽前 1 d)、分蘖肥(移栽后 7 d)和穗肥(叶龄余数 2.0) 4 : 2 : 4 的比例施入; 磷肥(P₂O₅ 60 kg hm⁻²)作为基肥一次性施入; 钾肥(K₂O 75 kg hm⁻²)按基肥和穗肥 1 : 1 比例施入。其他栽培技术、农药选择和田间管理遵循当地传统方法。

1.1.2 处理设置 试验采用随机区组设计, 以常规淹灌(CF, 当地常规灌溉方式)为对照, 设置浅湿灌溉(SWI)、干湿交替灌溉(AWD)和控制灌溉(CI) 3

种节水灌溉方式。CF 处理自移栽后 1 周起至收获前 1 周始终保持 10~80 mm 水层。SWI 处理除分蘖末期搁田和乳熟期土壤自然落干外, 自移栽开始至收获前 1 周始终保持一定水层。AWD 处理自移栽后 1 周起至收获前 1 周, 在每次灌溉后自然落干, 至土壤水势阈值时再次灌水, 再落干再灌水, 循环往复。CI 处理自移栽后 1 周起至收获前 1 周, 在每次土壤水分饱和后自然落干, 至土壤水势阈值时再次灌水, 再落干再灌水, 循环往复。每个处理重复 3 次, 小区面积为 6 m × 8 m, 周边采用 30 cm × 40 cm 田埂隔开, 以防止水分和养分侧向横流。在各节水灌溉处理小区中, 安装 5 根真空表式土壤负压计(中国科学院南京土壤研究所生产)监测土壤水势, 张力计探头 5 cm, 安装深度为 15 cm, 于每天 08:00 与 14:00 分别记录负压计读数, 当读数达到规定的土壤水势下限时, 即灌水到相应的水层深度; 对于常规淹灌处理, 每天上午 08:00 用直尺测量水层深度, 当水层深度降到规定的值时, 即灌水到相应的深度。各灌溉方式具体控水标准见表 1。

表 1 不同灌溉方式水分管理表
Table 1 Water management schedule for different irrigation methods

灌溉方式 Irrigation mode	灌水阈值 Irrigation threshold	移栽-返青 Transplanting-Regreening	返青-分蘖末 Regreening-Late tillering	分蘖末-拔节 Late tillering-Jointing	拔节-抽穗 Jointing-Heading	抽穗-成熟 Heading-Maturity
CF	上限 Upper	30 mm	80 mm	80 mm	80 mm	80 mm
	下限 Lower	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm
SWI	上限 Upper	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm
	下限 Lower	10 mm	10 mm	-20 kPa	20 mm	-10 kPa
AWD	上限 Upper	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm
	下限 Lower	10 mm	-10 kPa	-20 kPa	-10 kPa	-10 kPa
CI	上限 Upper	30 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
	下限 Lower	10 mm	-10 kPa	-20 kPa	-5 kPa	-10 kPa

CF: 常规淹水灌溉; SWI: 浅湿灌溉; AWD: 干湿交替灌溉; CI: 控制灌溉。

CF: conventional flooded irrigation; SWI: shallow wet irrigation; AWD: alternate wetting and drying irrigation; CI: controlled irrigation.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 茎蘖动态 分别于分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期每个小区定点 10 穴水稻, 调查水稻茎蘖数。茎蘖成穗率(%) = (成熟期有效穗数/高峰苗数) × 100%。

1.2.2 叶片 SPAD 值 分别于分蘖期、抽穗期、成熟期在各小区选取 10 穴水稻, 使用叶绿素仪 (SPAD-502 plus, Konica Minolta INC., 日本)测定叶片 SPAD 值, 每片测定上、中、下部 3 点, 取平均值。分蘖期测定顶部定长叶片, 抽穗与成熟期测定水稻

剑叶。

1.2.3 叶面积指数、粒叶比 在抽穗期采用长宽系数法测定所有叶片绿叶面积时, 将叶面积分为总叶面积(所有茎蘖的叶面积)和高效叶面积(有效茎蘖顶 3 叶的叶面积)。

粒叶比指标包括颖花叶面积比(cm⁻²)、实粒叶面积比(cm⁻²)、总粒重叶面积(mg cm⁻²)。各指标中颖花数、实粒数、粒重分别指总颖花数、总实粒数、产量, 叶面积以抽穗期叶面积衡量。

1.2.4 千物质重 分别于分蘖期、抽穗期、成熟

期,按每小区茎蘖数的平均数取代表性植株 6 穴,将植株分部位于 105℃下杀青 30 min,75℃下烘干至恒重,测定各器官干物质质量。

1.2.5 根系伤流量和根系氧化力 分别于分蘖期、抽穗期和灌浆期按各小区的平均茎蘖数选取代表性植株 5 穴,于 18:00 在各茎离地面约 10 cm 处剪去地上部植株,将预先称重的脱脂棉置于茎秆的剪口处,包上塑料薄膜,于第 2 天上午 06:00 取回带有伤流液的脱脂棉并称重,计算根系伤流量。采用褚光等^[13]的方法测定根系氧化力,以每克根干重每小时氧化的 Alpha 萘胺(α -NA)量表示根系氧化力。

1.2.6 叶片酶活性和丙二醛含量 于分蘖期、抽穗期、成熟期取样,将叶片在干冰中冷冻,然后置于 -70℃ 冰箱保存,使用混合球磨仪(德国莱驰 RETSCHMM400)充分研磨,采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)活性以及丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量。

1.2.7 非结构性碳水化合物(non-structural carbohydrates, NSCs) 于抽穗期、成熟期取样,将粉碎后的植株样品过 100 目筛,然后称取 0.1 g 过筛后的样品参照张伟杨等^[21]方法测定茎鞘中可溶性糖和淀粉含量,NSCs 积累量为可溶性糖含量与淀粉含量之和。

NSCs 转移量($t\text{ hm}^{-2}$) = 抽穗期茎鞘 NSCs 含量 - 成熟期茎鞘 NSCs 含量 (1)

NSCs 转移率(%) = NSCs 转移量/抽穗期茎鞘 NSCs 含量 $\times 100\%$ (2)

NSCs 对产量的贡献率(%) = NSCs 转移量/水稻产量 $\times 100\%$ (3)

1.2.8 考种与计产 成熟期各小区调查 100 穴穗数,并按平均穗数取样 5 穴手工脱粒,考查水稻每穗粒数、结实率和千粒重等产量构成因素。采用水漂法测定结实率。各小区实收 2 m² 机器脱粒晒干后测定重量和含水率,按 13.5% 的含水率折算为实收产量。

1.2.9 灌溉水量和灌溉水利用效率 采用体积法测定灌溉水量,记录各小区每次实际灌水体积。各处理生育期内所有灌水量累加,得到总灌溉水量。

灌溉水量(mm) = (灌水体积/小区面积) $\times 1000$ (4)

灌溉水利用效率(kg m^{-3}) = 产量/全生育期灌水量 (5)

1.3 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 23.0 软件对本试验所有数据进行处理与统计分析,用 Origin 2024 绘图。使用 LSD 最小显著极差法分析不同处理间差异性。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

不同灌溉方式对水稻产量均产生显著影响。浅湿灌溉(SWI)和干湿交替灌溉(AWD)的产量均显著高于常规淹水灌溉(CF),而控制灌溉(CI)产量相对较低。与 CF 相比,SWI 产量提高 10.5%~11.2%,AWD 产量提高 7.4%~13.5%;而 CI 产量仅提高 2.11%~2.25%,与 CF 差异不显著。SWI 和 AWD 产量提高的主要原因是总颖花量的显著增加,分别比 CF 显著提高 3.4%~7.6%和 2.6%~8.2%。每穗粒数、结实率及千粒重在各灌溉处理间差异不大,但 SWI 在 2023 年表现出较高的每穗粒数,而 AWD 在 2024 年表现出较高的千粒重(表 2)。以上结果表明,采用 SWI 或 AWD 均有利于增加总颖花量,从而提高水稻产量。

2.2 灌溉水量和灌溉水利用效率

不同节水灌溉方式均显著降低了灌溉水量,并提高了水分利用效率。与 CF 相比,SWI、AWD 和 CI 的灌溉水量分别减少 9.5%~18.9%、12.2%~23.4%和 17.0%~26.8%,灌溉水利用效率分别提高 21.7%~29.9%、22.3%~39.8%和 22.0%~29.2% (图 2)。其中,AWD 在 2 年中均保持较低的灌溉水用量与较高的水分利用效率(water use efficiency, WUE)。总体上,合理采用节水灌溉方式有助于减少灌溉用水,并大幅度提高灌溉水分利用效率。

2.3 干物重与收获指数

不同节水灌溉方式对水稻地上部干物重产生影响(表 3)。在分蘖期,SWI 和 AWD 的地上部干物重均显著高于 CF,增幅分别为 4.6%~7.9%和 2.5%~10.2%,而 CI 略低于 CF。抽穗期和成熟期 SWI 和 AWD 处理的干物重均高于 CF,抽穗期增幅分别为 3.2%~15.0%和 4.2%~13.0%,成熟期增幅分别为 7.5%~8.2%和 7.0%~9.0%;CI 与 CF 间差异不显著。与 CF 相比,SWI 和 AWD 明显提高了抽穗至成熟期干物质积累量,提高幅度分别为 3.0%~11.4%和 1.0%~14.3%。

收获指数方面,各处理差异较小,但总体上

表 2 不同节水灌溉方式对水稻产量及其构成因素的影响
Table 2 Effects of different water-saving irrigation methods on rice yield and its components

年份 Year	灌溉方式 Irrigation mode	穗数 Panicles ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗粒数 Grains per panicle	总颖花量 Total spikelet ($\times 10^4 \text{ m}^{-2}$)	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grains weight (g)	产量 Yield (t hm^{-2})
2023	CF	568.8 b	74.3 a	422.4 b	89.6 a	25.2 a	9.5 b
	SWI	588.0 a	79.1 a	464.9 a	89.8 a	25.2 a	10.5 a
	AWD	583.4 a	77.5 a	452.0 a	89.5 a	25.2 a	10.2 a
	CI	572.1 ab	75.6 a	432.1 b	89.0 a	25.1 a	9.7 b
2024	CF	506.3 b	77.7 a	393.3 b	89.1 a	25.3 b	8.9 b
	SWI	544.6 a	79.1 a	430.9 a	90.0 a	25.5 ab	9.9 a
	AWD	548.0 a	79.7 a	437.0 a	89.9 a	25.7 a	10.1 a
	CI	520.4 b	77.9 a	405.5 b	89.0 a	25.2 b	9.1 b
方差分析 ANOVA							
年份 Year (Y)		***	*	***	*	ns	***
灌溉方式 Irrigation (I)		***	ns	***	ns	ns	***
Y×I		ns	ns	ns	ns	ns	ns

处理同表 1。同列不同字母表示同一年份不同处理在 0.05 水平下差异显著。*、***分别表示在 0.05 和 0.001 水平差异显著; ns 表示差异不显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. In the same year, different letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 level. * and *** indicate significance at the 0.05 and 0.001 levels, respectively; ns indicates no significant difference.

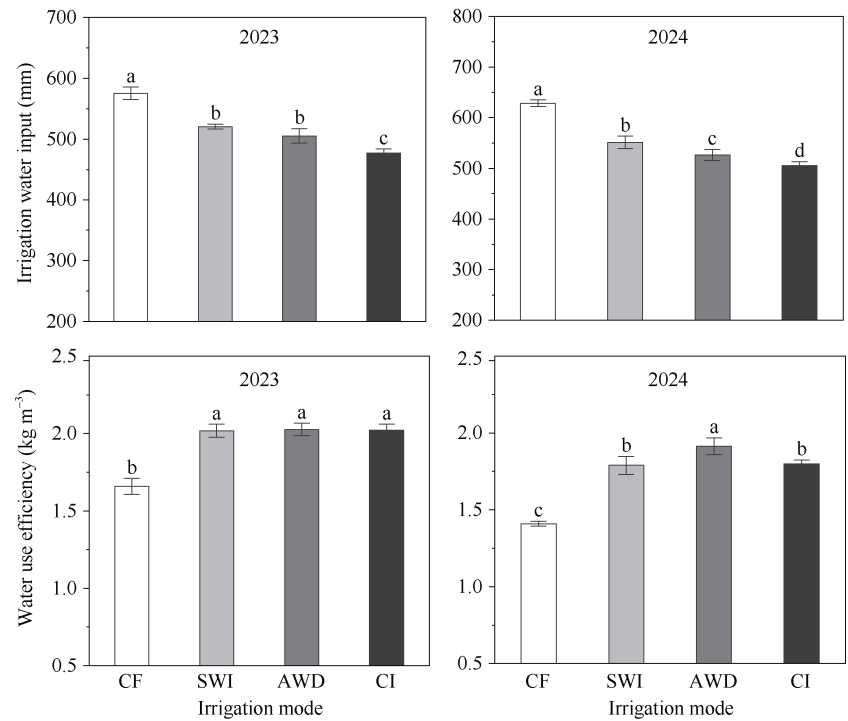


图 2 不同节水灌溉方式对水稻灌溉水量和灌溉水利用效率的影响
Fig. 2 Effects of different water-saving irrigation methods on irrigation water input and irrigation water use efficiency in rice
处理同表 1。不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. Different letters indicate significant differences at the 0.05 level.

SWI 和 AWD 略高于 CI 和 CF, 2024 年 SWI 和 AWD 处理的收获指数分别较 CF 提高 3.6%和 4.3% (表 3)。

2.4 水稻茎蘖数与茎蘖成穗率

自分蘖期至成熟期, 水稻茎蘖数呈先升后降趋势(表 4)。不同灌溉方式下, 分蘖期的茎蘖数表现为

AWD > SWI > CF > CI。与 CF 相比, SWI 和 AWD 显著提高拔节期及成熟期的茎蘖数, 而 CI 仅在成熟期略有提高。不同节水灌溉方式影响了茎蘖成穗率, 2023 年 CI 处理茎蘖成穗率最高, 而 2024 年 SWI 和 AWD 的茎蘖成穗率显著优于 CI 和 CF, 表现出节水

灌溉整体有利于提高成穗率。

2.5 叶面积指数

不同节水灌溉方式显著影响水稻抽穗期的叶面积指数。相较于 CF, SWI 和 AWD 处理均提高了高效叶面积指数, 而 CI 处理的高效叶面积指数与 CF 相近或比 CF 略低。SWI 和 AWD 处理的低效叶面积指数也均高于 CF; 而 CI 处理的低效叶面积指数与 CF 差异不显著。总叶面积指数在各节水处理下均高

于 CF, 其中 SWI 最高, CI 最低(表 5)。

2.6 水稻粒叶比

不同灌溉方式下水稻抽穗期的粒叶比存在差异。总体上, SWI 和 AWD 在不同程度上维持或提高粒叶比, 而 CI 呈下降趋势。SWI 和 AWD 均提高了总颖花数/叶面积、实粒数/叶面积及总粒重/叶面积, 而 CI 和 CF 上述指标均较低。表明适宜的节水灌溉方式有助于促进粒叶比的提高(图 3)。

表 3 不同节水灌溉方式对水稻地上部干物重的影响

Table 3 Effects of different water-saving irrigation methods on the aboveground dry matter accumulation in rice

年份 Year	灌溉方式 Irrigation mode	分蘖期 Tillering (t hm ⁻²)	抽穗期 Heading (t hm ⁻²)	成熟期 Maturity (t hm ⁻²)	抽穗至成熟 Heading to Maturity (t hm ⁻²)	收获指数 Harvest index (%)
2023	CF	2.84 bc	10.0 b	20.1 b	10.1 a	47.4 a
	SWI	2.97 a	11.5 a	21.9 a	10.4 a	47.9 a
	AWD	2.91 ab	11.3 a	21.5 a	10.2 a	47.5 a
	CI	2.73 c	10.1 b	20.4 b	10.3 a	47.3 a
2024	CF	2.16 b	9.5 b	20.0 b	10.5 b	44.3 b
	SWI	2.33 a	9.8 a	21.5 a	11.7 a	45.9 a
	AWD	2.38 a	9.9 a	21.8 a	12.0 a	46.2 a
	CI	2.16 b	9.6 ab	20.3 b	10.7 b	44.8 ab

处理同表 1。同年同一列内不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. In the same year, different letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

表 4 不同节水灌溉方式对水稻茎蘖动态的影响

Table 4 Effects of different water-saving irrigation methods on tillering dynamics in rice

年份 Year	灌溉方式 Irrigation mode	分蘖期 Tillering (×10 ⁴ hm ⁻²)	拔节期 Jointing (×10 ⁴ hm ⁻²)	抽穗期 Heading (×10 ⁴ hm ⁻²)	成熟期 Maturity (×10 ⁴ hm ⁻²)	茎蘖成穗率 Productive tiller percentage (%)
2023	CF	419.4 ab	752.8 ab	606.5 a	568.8 b	75.6 b
	SWI	423.1 ab	773.1 a	615.7 a	588.0 a	76.1 ab
	AWD	435.2 a	765.7 a	614.8 a	583.4 a	76.2 ab
	CI	413.9 b	742.9 b	591.3 b	572.1 ab	77.0 a
2024	CF	377.8 ab	611.2 c	554.0 ab	506.3 b	82.8 b
	SWI	394.4 a	642.7 a	581.4 a	544.6 a	84.7 a
	AWD	400.9 a	646.4 a	585.6 a	548.0 a	84.8 a
	CI	366.7 b	630.3 b	530.7 b	520.4 b	82.6 b

处理同表 1。同年同一列内不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. In the same year, different letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

表 5 不同节水灌溉方式对水稻抽穗期叶面积指数的影响

Table 5 Effects of different water-saving irrigation methods on leaf area index (LAI) at heading stage

年份 Year	灌溉方式 Irrigation mode	高效 LAI High effectiveness LAI	低效 LAI Low effectiveness LAI	总 LAI Total LAI
2023	CF	4.69 b	0.92 b	5.62 b
	SWI	4.95 a	1.14 a	6.09 a
	AWD	4.86 a	1.08 ab	5.94 a
	CI	4.75 ab	0.94 b	5.69 b

(续表 5)

年份 Year	灌溉方式 Irrigation mode	高效 LAI High effectiveness LAI	低效 LAI Low effectiveness LAI	总 LAI Total LAI
2024	CF	4.71 b	0.81 b	5.53 b
	SWI	4.78 a	0.94 ab	5.72 a
	AWD	4.79 a	0.97 a	5.75 a
	CI	4.67 b	0.85 b	5.53 b

处理同表 1。同年同一列内不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. In the same year, different letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

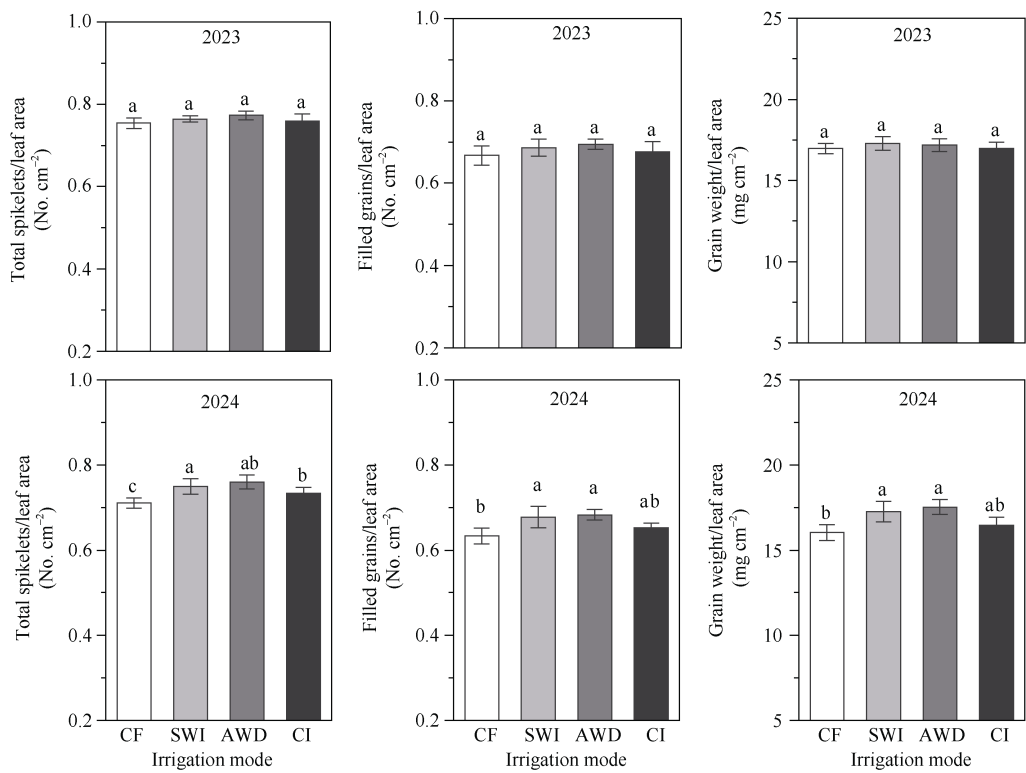


图 3 不同节水灌溉方式对水稻粒叶比的影响
Fig. 3 Effects of different water-saving irrigation methods on grain-to-leaf ratio in rice

处理同表 1。不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. Different letters indicate significant differences at the 0.05 level.

2.7 水稻叶片 SPAD 值

分蘖期不同灌溉方式处理间叶片 SPAD 值差异不显著; 抽穗期 SPAD 值总体升高, SWI 和 AWD 与 CF 差异不大, 而 CI 略低于 CF。成熟期各处理 SPAD 值均下降, 其中 CI 处理 SPAD 值低于 CF; AWD 与 CF 持平; 2024 年 SWI 处理较 CF 略有升高, 而 2023 年无显著差异。总体而言, SWI 有助于提高抽穗期的叶片 SPAD 值(图 4)。

2.8 叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量

不同节水灌溉方式显著影响水稻叶片的抗氧化酶活性及丙二醛(MDA)含量。在分蘖期, 各处理间抗氧化酶活性差异不显著, 但 SWI 的 MDA 含量低

于 CF, AWD 和 CI 与 CF 差异不大。抽穗期, SWI 和 AWD 显著提高 CAT、POD、SOD 活性, 均显著高于 CF, 而 CI 与 CF 差异不大。同时, SWI 和 AWD 显著降低 MDA 含量, 优于 CI 和 CF 处理。成熟期各处理 CAT、POD、SOD 活性较抽穗期下降, MDA 含量升高。AWD 在 CAT 和 POD 活性上仍维持较高水平, SWI 次之, CI 与 CF 差异不大。总体上, SWI 和 AWD 均能增强叶片抗氧化酶活性, 降低 MDA 含量, 尤其在抽穗期表现最为显著(图 5)。

2.9 水稻茎鞘非结构性碳水化合物

不同节水灌溉方式显著影响水稻茎鞘非结构性碳水化合物(NSCs)的积累与转运。总体来看, 抽穗

期 NSCs 积累量、NSCs 转运量、NSCs 转运率及 NSCs 对产量的贡献率均表现出 $SWI \approx AWD > CI$ 的规律。与 CF 相比, SWI、AWD 和 CI 处理的 NSCs 转运量分别提高 32.3%~54.1%、33.3%~55.4% 和 2.2%~

14.9%; NSCs 对产量的贡献率则分别提高 20.4%~38.7%、24.8%~36.8% 和 0.8%~11.6% (表 6)。因此, 合理采用节水灌溉有助于增加抽穗期 NSCs 积累, 提升 NSCs 转运效率, 从而促进产量提高。

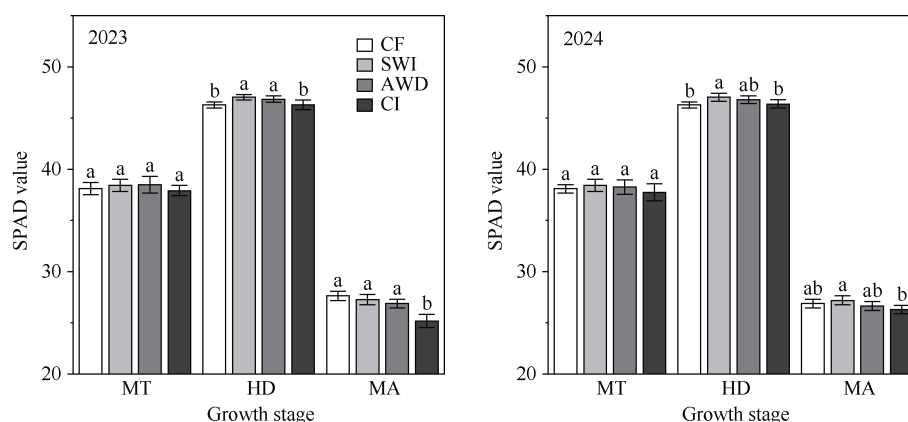


图 4 不同节水灌溉方式对水稻叶片 SPAD 值的影响

Fig. 4 Effects of different water-saving irrigation methods on leaf SPAD values in rice

处理同表 1。MT: 分蘖期; HD: 抽穗期; MA: 成熟期。不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. MT: tillering stage; HD: heading stage; MA: maturity stage. Different letters indicate significant differences at the 0.05 level.

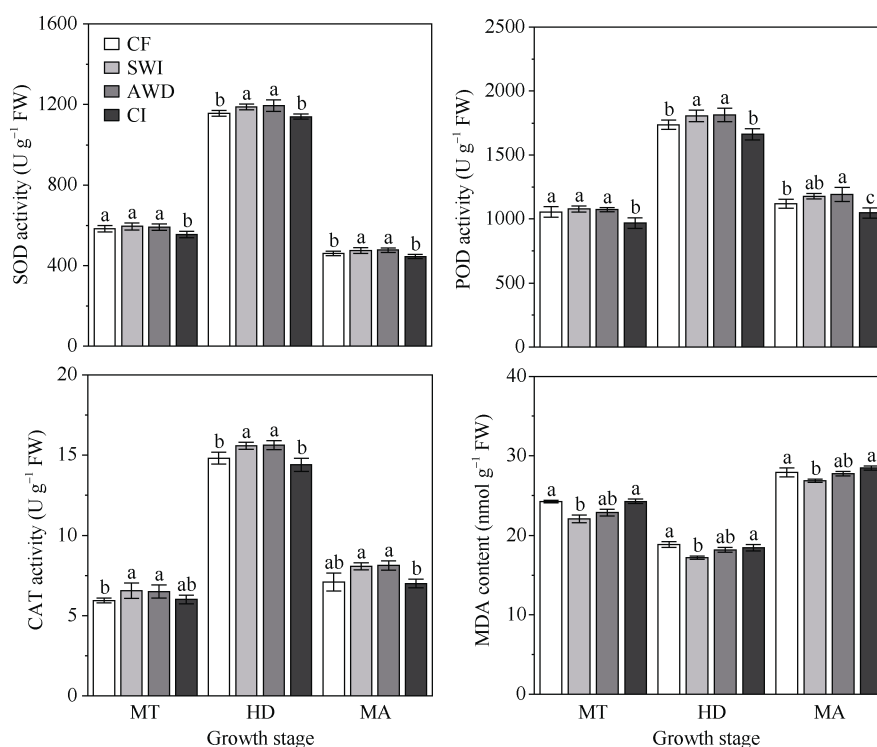


图 5 不同节水灌溉方式对水稻叶片抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响(2024)

Fig. 5 Effects of different water-saving irrigation methods on antioxidant enzyme activity and malondialdehyde content in rice leaves (2024)

处理同表 1。MT: 分蘖期; HD: 抽穗期; MA: 成熟期。SOD: 超氧化物歧化酶; POD: 过氧化物酶; CAT: 过氧化氢酶; MDA: 丙二醛。不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. MT: tillering stage; HD: heading stage; MA: maturity stage. SOD: superoxide dismutase; POD: peroxidase; CAT: catalase; MDA: malondialdehyde. Different letters indicate significant differences at the 0.05 level.

表 6 不同节水灌溉方式对水稻非结构性碳水化合物(NSCs)的影响
Table 6 Effects of different water-saving irrigation methods on non-structural carbohydrates (NSCs) in rice

年份 Year	灌溉方式 Irrigation mode	抽穗期 Heading (t hm ⁻²)	成熟期 Maturity (t hm ⁻²)	NSCs 转运量 NSCs translocation amount (t hm ⁻²)	NSCs 转运率 NSCs translocation efficiency (%)	NSCs 对产量的贡献率 NSCs contribution to grain yield (%)
2023	CF	1.94 b	1.01 a	0.93 b	47.74 b	9.74 b
	SWI	2.18 a	0.95 a	1.23 a	56.42 a	11.73 a
	AWD	2.19 a	0.94 a	1.24 a	56.85 a	12.16 a
	CI	1.97 b	1.02 a	0.95 b	47.09 b	9.82 b
2024	CF	1.75 b	1.01 a	0.74 c	42.31 b	8.38 b
	SWI	2.10 a	0.96 a	1.14 a	54.47 a	11.62 a
	AWD	2.10 a	0.95 a	1.15 a	54.94 a	11.46 a
	CI	1.81 b	0.96 a	0.85 b	41.84 b	9.35 ab

处理同表 1。同年同一列内不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. In the same year, different letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

2.10 根系伤流量和氧化活性

不同节水灌溉方式对水稻根系伤流量及氧化活力均产生显著影响。分蘖期各处理间根系伤流量差异不显著, SWI 略高于其他处理。抽穗期, SWI 和 AWD 根系伤流量显著高于 CF, 而 CI 与 CF 差异不大; SWI 与 AWD 差异较小, 均高于 CI 和 CF。灌浆期 SWI 和 AWD 的根系伤流量仍高于 CF, 但差异缩小, CI 与 CF 相近。

在根系氧化力方面, 分蘖期 SWI 和 AWD 显著高于 CF, CI 与 CF 差异不显著。抽穗期各处理根系氧化力下降, 但 SWI 和 AWD 仍高于 CF, 差异不显著。灌浆期根系氧化力进一步下降, SWI 与 AWD 略高于 CF, CI 最低, 但差异较小。总体来看, SWI 和 AWD 有助于提高水稻根系活力, 增加根系伤流量,

尤其在抽穗期表现较为显著(图 6)。

3 讨论

3.1 不同节水灌溉方式对水稻群体质量的影响

水稻群体质量(包括群体茎蘖数、叶面积指数及干物质积累等)是产量形成的重要物质与结构基础^[14,22]。本研究结果表明, 浅湿灌溉(SWI)和干湿交替灌溉(AWD)在多个群体质量指标上均优于常规淹水灌溉(CF)和控制灌溉(CI), 有利于改善水稻群体结构与物质生产能力。

在茎蘖动态上, SWI 和 AWD 两种节水灌溉方式不仅提高了各生育时期茎蘖数, 还显著提高了茎蘖成穗率和群体穗数(表 2 和表 4), 说明在东北稻区实施 SWI 与 AWD 有助于增强分蘖能力, 从而促进产

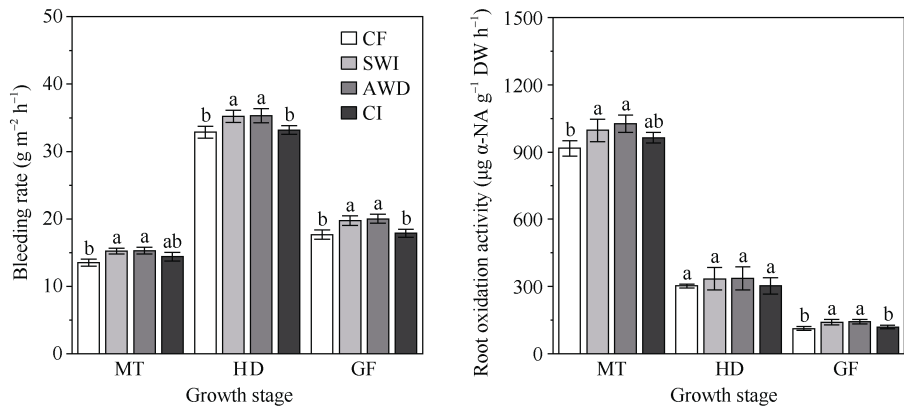


图 6 不同节水灌溉方式对水稻根系伤流量和根系氧化力的影响(2024)
Fig. 6 Effects of different water-saving irrigation methods on root bleeding sap and root oxidizing activity in rice (2024)
处理同表 1。MT: 分蘖期; HD: 抽穗期; GF: 灌浆期。不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. MT: tillering stage; HD: heading stage; GF: grain filling stage. Different letters indicate significant differences at the 0.05 level.

量形成。水稻营养生长阶段, 过度淹水和干旱都会限制分生组织细胞分裂, 抑制分蘖芽的萌发与伸长, 降低分蘖发生^[23-25]。SWI 在分蘖期始终保持浅水层, 减少了积水和干旱波动; AWD 则在土壤水势下降至 -10 kPa 时及时复水, 避免了过度干旱。在南方稻区, 干湿交替灌溉(-15 kPa)可减少营养生长阶段的无效分蘖, 促进养分向有效穗的分配, 从而提高茎蘖成穗率, 但各生育期的茎蘖数略有下降^[21,26]。本研究结果与之不同, 其可能原因是东北稻区白浆土黏粒高、保水性好, 弱化了排水对分蘖的抑制作用, 表明控水阈值对分蘖发生的影响存在区域适应性。相比之下, CI 处理下水稻有效茎蘖数减少, Feng 等^[24]在黑龙江稻区的研究也指出, 分蘖期节水灌溉控水程度越强(-10 kPa 以下), 茎蘖数越少。

叶面积指数(LAI)是反映群体冠层大小和光截获能力的重要指标, 是水稻产量形成的物质基础^[27]。本研究显示, SWI 和 AWD 均增加了抽穗期的总 LAI 及高效 LAI, 这与 Wang 等^[28]认为 AWD 可显著提高叶面积指数的研究结果一致。此外, 有研究表明, 节水灌溉可通过优化冠层结构, 提高上层功能叶比例和冠层透光性, 改善下层叶片的光照环境, 提升群体光能利用效率^[29], 这也与本研究中高 LAI 增加的结果一致。本研究中, CI 处理抽穗期茎蘖数相比 CF 下降, 但总 LAI 和高效 LAI 无显著差异, 表明尽管群体规模缩小, 单穗光合面积却有所增加, 提高了茎蘖成穗率。粒叶比是衡量群体源库协调性的重要功能指标, 体现作物光合产物从源(叶片)向库(籽粒)的转运效率。本研究表明, SWI 和 AWD 均能维持或提高粒叶比, 而 CI 则有降低粒叶比趋势。2024 年 SWI 和 AWD 均显著提高了总颖花数/叶面积、实粒数/叶面积及总粒重/叶面积, 说明东北稻区 SWI 和 AWD 不仅能增加群体 LAI, 还能提高单位叶面积对应的籽粒负载, 从而优化源库关系, 促进光合产物向籽粒分配, 这与南方稻区适度节水灌溉可优化粒叶比、提高穗粒重及茎蘖成穗率的结论一致^[26,28]。

在干物质积累方面, 本研究观察到 SWI 和 AWD 主要生育期地上部干物重均显著高于 CF, 尤其是在分蘖期和抽穗期表现突出; 而 CI 在多数生育时期的干物重低于 CF。东北稻区 CI 处理无水层灌溉, 降低了水稻茎蘖数和碳同化产物的积累, 从而限制了群体生物量形成。此外, 虽然收获指数在不同处理间差异不显著, 但 SWI 和 AWD 在 2024 年均较 CF 略有提高(分别提高 3.6%和 4.3%), 表明 2 种

节水灌溉方式不仅提升了源端碳同化形成, 还一定程度上促进了库端干物质向籽粒的分配。这与 Hua 等^[30]关于节水灌溉促进干物质积累及优化碳分配格局的研究结果一致。结合源-库理论来看, SWI 和 AWD 的优势在于同时提高了源的产能(较高的 LAI 与干物质积累)和库的容纳能力(较高的粒叶比与籽粒库容), 从而在源库协调上实现双向优化, 这也是 SWI 和 AWD 在产量形成上优于 CF 与 CI 的重要原因。

3.2 不同节水灌溉方式对水稻产量的影响及其机理分析

在较优群体质量的基础上, SWI 和 AWD 通过有效调控水稻的生理特性和物质转运过程, 最终实现较高的水稻产量和水分利用效率(WUE)。在本研究中, SWI 和 AWD 均显著提高了水稻产量, 分别较 CF 提高 10.5%~11.2%和 7.4%~13.5%, 而 CI 增产效果不明显。SWI 和 AWD 两处理增产主要源于单位面积穗数和总颖花量的增加, 而每穗粒数、结实率及千粒重总体差异不大, 仅在部分年份表现差异。这与张伟杨等^[21]关于轻度节水灌溉促进总颖花量增加、进而提高产量的研究结论一致。值得注意的是, 本研究还观察到年度间产量存在显著差异。2023 年水稻生长季降水较均匀, 整体产量较高, 且 SWI 的增产效应更为显著; 而在 2024 年水稻分蘖期降水较多, AWD 的增产优势更加突出。

合理的节水灌溉能够通过调控 NSCs 动态, 实现对产量形成的正向调节。已有研究指出, 适度的节水灌溉不仅能增加花前 NSCs 的积累, 还能在灌浆期显著提高 NSCs 的转运率^[31-32]。本研究表明, SWI 和 AWD 提高了水稻 NSCs 的积累与籽粒的转运效率, 显著增强了灌浆期碳源供应, 有利于促进籽粒灌浆。这与 Chu 等^[33]报道的重度 AWD 抑制 NSCs 积累和产量形成的结论形成对比, 也进一步验证了轻度控水有利于增强 NSCs 转运和提高灌浆速率的观点。SWI 和 AWD 在抽穗期均能提高剑叶 SPAD 值, SPAD 值通常与净光合速率和氮素利用效率密切相关^[24,34]。SPAD 值改善表明功能叶“持绿”特性延长, 有助于延长灌浆期的光合碳同化过程^[35], 这也与本研究 SWI 和 AWD 促进 NSCs 积累的结果一致。

SWI 和 AWD 均显著提高了水稻根系伤流量和氧化活力, 尤其在抽穗期表现最为明显。这表明节水灌溉有助于增强根系的水分与养分吸收能力。已

有研究表明, AWD 能通过优化根际氧环境, 改善土壤通气性, 从而促进根系活力的提升^[29,36]。此外, SWI 和 AWD 显著提高了叶片 CAT、POD、SOD 等抗氧化酶活性, 并降低了 MDA 含量, 说明适度的水分调控能够有效清除活性氧(reactive oxygen species, ROS), 减缓膜脂过氧化, 从而维护叶片功能。ROS 过度积累会导致光系统 II (PSII) 的损伤, 而增强抗氧化酶活性有助于平衡叶片光合电子传递, 提高光利用效率与光合产物积累^[37-38]。

SWI、AWD 和 CI 的灌溉用水量均显著低于 CF, 且 $CI < AWD < SWI$; 在水分利用效率方面, SWI、AWD 和 CI 均显著高于 CF, 且 AWD 在 2 年中均表现出较高水平, 尤其在 2024 年表现最优。节水灌溉可通过减少水分消耗, 维持产量甚至增产, 显著提高稻田 WUE^[18]。与南方稻区相比, 东北稻区的温度低、昼夜温差大、水稻生长期较短, 白浆土保水性强、渗漏量小, 这些环境特征影响了控水阈值差异。SWI 与 AWD 相较 CI 均提高了水稻产量与 WUE, 表明在东北稻区采用较浅水层(30~40 mm)的节水灌溉方式有利于减少深层渗漏, 并兼顾水稻节水与稳产。

AWD 和 SWI 提高 WUE 的机制可能是改善了根际氧环境, 增强了根系活力和水分吸收能力^[17,29], 进而协调水分供应与干物质积累, 使得单位水分消耗带来的产量效应更高。相比之下, CI 处理尽管显著降低了灌溉水量并提高了 WUE, 但由于控水强度过大, 限制了分蘖发生和碳同化^[24,33], 从而在产量形成上表现不及 SWI 和 AWD。这提示在东北稻区, 过度节水会牺牲产量, 不利于水稻生产稳产发展。东北稻区轻度干湿交替灌溉能通过增强根系活力等生理活性提高总分蘖数^[39], 与南方稻区以抑制无效分蘖、提高茎蘖成穗率为主的响应机制有所不同^[26,40]。这种不同可能源于白浆土较高的保水性, 减弱了排水期的干旱胁迫; 同时东北稻区较低的蒸散量, 使轻度控水在提高水稻根系活性的同时更有利于物质积累与转运, 进而提高产量和 WUE。

以往对节水灌溉的研究多关注于单一灌溉模式或多以产量为主, 本研究较为系统地比较了 SWI、AWD 和 CI 三种节水灌溉方式下水稻群体结构、生理特征与产量变化。SWI 和 AWD 均通过优化群体结构、扩大光合面积、增强物质积累与功能维持, 显著改善了群体质量并促进了产量形成; 相比之下, CI 虽能进一步节水, 但因抑制群体生长与活力而不

利于产量增长。因此, 东北稻区采用 SWI 和 AWD 更有利于保持群体活力和产量稳定, 而 AWD 在提升水分利用效率方面更具优势。2 种节水灌溉方式通过增强源库协调、促进 NSCs 积累与转运、维持叶片功能和根系活力等多种生理途径, 共同支撑了水稻“稳产-节水”的协同效应。未来结合 SWI 与 AWD 的优势, 探索兼顾稳产与高效的综合灌溉模式, 将为实现东北黑土稻区高产高效与可持续生产提供重要支撑。

4 结论

与当地常规灌溉(CF)相比, 浅湿灌溉(SWI)和干湿交替灌溉(AWD)在大幅度节约灌溉用水的同时, 显著增加东北黑土区水稻产量, 产量增加主要得益于总颖花量的显著增加。与 SWI 相比, AWD 节水效果更佳。茎蘖成穗率、高效叶面积指数、粒叶比、茎鞘非结构性碳水化合物(NSCs)的累积与转运效率、花后干物质积累、根系伤流量与根系活力等群体质量指标较优, 叶片 SPAD 值、抗氧化酶活性高以及丙二醛含量低是 SWI 和 AWD 两处理增产的重要基础。

References

- [1] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴 2024. 黑龙江: 中国统计出版社, 2024.
Heilongjiang Bureau of Statistics. Heilongjiang Statistical Yearbook 2024. Heilongjiang: China Statistics Press, 2024 (in Chinese).
- [2] 刘立超, 谢树鹏, 门龙楠, 等. 黑龙江粳稻品质育种现状及对策. 中国稻米, 2022, 28(4): 19–22.
Liu L C, Xie S P, Men L N, et al. Current situation and countermeasures of quality breeding of japonica rice in Heilongjiang province. China Rice, 2022, 28(4): 19–22 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王思宇, 谷英楠, 王敬元, 等. 黑龙江省水稻产业发展形势与战略对策. 农业展望, 2024, 20(7): 98–104.
Wang S Y, Gu Y N, Wang J Y, et al. Development situation and strategic countermeasures of rice industry in Heilongjiang province. Agric Outlook, 2024, 20(7): 98–104 (in Chinese with English abstract).
- [4] 范从龙, 戴长雷, 周广平. 水足迹视角下黑龙江省水资源利用评价. 黑龙江水利科技, 2024, 52(10): 68–70.
Fan C L, Dai C L, Zhou G P. Evaluation of water resources utilization in Heilongjiang province from perspective of water footprint. Heilongjiang Hydraul Sci Technol, 2024, 52(10): 68–70 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王秋菊, 来永才. 试论黑龙江省水稻生产与水资源持续利用的对策与建议. 中国稻米, 2010, 16(4): 25–28.
Wang Q J, Lai Y C. Countermeasures and suggestions for rice production and sustainable water resources utilization in Heilongjiang

- province. *China Rice*, 2010, 16(4): 25–28 (in Chinese).
- [6] Zhuang Y H, Zhang L, Li S S, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China. *Agric Water Manag*, 2019, 217: 374–382.
- [7] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国水稻区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究. *中国农业大学学报*, 2016, 21(9): 1–13.
- Wu L Q, Wu L, Cui Z L, et al. Studies on recommended nitrogen, phosphorus and potassium application rates and special fertilizer formulae for different rice production regions in China. *J China Agric Univ*, 2016, 21(9): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王光耀, 刘巍, 雷波, 等. 不同节水灌溉方式下的黑龙江省水稻节水减排潜力评估. *节水灌溉*, 2023(11): 34–38.
- Wang G Y, Liu W, Lei B, et al. Water-saving and emission reduction potential of rice in Heilongjiang province under different water-saving irrigation methods. *Water Sav Irrig*, 2023(11): 34–38 (in Chinese with English abstract).
- [9] Wang Z, Zhang X Y, Liu L, et al. Estimates of methane emissions from Chinese rice fields using the DNDC model. *Agric For Meteorol*, 2021, 303: 108368.
- [10] 梁燕菲, 张潇潇, 李伏生. “薄浅湿晒”灌溉稻田土壤微生物量碳、氮和酶活性研究. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19: 1403–1410.
- Liang Y F, Zhang X X, Li F S. Soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in paddy soil under “thin-shallow-wet-dry” irrigation method. *J Plant Nutr Fert*, 2013, 19: 1403–1410 (in Chinese with English abstract).
- [11] 秦子元. 不同水氮管理模式黑土稻田氮磷迁移转化利用及化学计量研究. 东北农业大学博士学位论文, 黑龙江哈尔滨, 2022.
- Qin Z Y. Nitrogen and Phosphorus Transfer, Utilization and Stoichiometry in Black Soil Paddy Fields under Different Water and Nitrogen Management Modes. PhD Dissertation of Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang, China, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘立军, 薛亚光, 孙小淋, 等. 水分管理方式对水稻产量和氮肥利用率的影响. *中国水稻科学*, 2009, 23: 282–288.
- Liu L J, Xue Y G, Sun X L, et al. Effects of water management methods on grain yield and fertilizer-nitrogen use efficiency in rice. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23: 282–288 (in Chinese with English abstract).
- [13] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 等. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响. *作物学报*, 2016, 42: 1026–1036.
- Chu G, Zhan M F, Zhu K Y, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1026–1036 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张自常, 徐云姬, 褚光, 等. 不同灌溉方式下的水稻群体质量. *作物学报*, 2011, 37: 2011–2019.
- Zhang Z C, Xu Y J, Chu G, et al. Population quality of rice under different irrigation regimes. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 2011–2019 (in Chinese with English abstract).
- [15] 丁国华, 曹良子, 周劲松, 等. 控制灌溉对寒地水稻产量及品质的影响. *中国稻米*, 2021, 27(5): 93–96.
- Ding G H, Cao L Z, Zhou J S, et al. Effects of controlled irrigation on yield and quality of water-saving and drought-resistance rice in cold region. *China Rice*, 2021, 27(5): 93–96 (in Chinese with English abstract).
- [16] Dong B, Mao Z, Cui Y L, et al. Controlled irrigation for paddy rice in China. *Irrig Drain*, 2020, 69: 61–74.
- [17] 李婷婷, 冯钰枫, 朱安, 等. 主要节水灌溉方式对水稻根系形态生理的影响. *中国水稻科学*, 2019, 33: 293–302.
- Li T T, Feng Y F, Zhu A, et al. Effects of main water-saving irrigation methods on morphological and physiological traits of rice roots. *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 293–302 (in Chinese with English abstract).
- [18] Yu Q, Dai Y L, Wei J, et al. Rice yield and water productivity in response to water-saving irrigation practices in China: a meta-analysis. *Agric Water Manag*, 2024, 302: 109006.
- [19] Zhang S X, Rasool G, Guo X P, et al. Effects of different irrigation methods on environmental factors, rice production, and water use efficiency. *Water*, 2020, 12: 2239.
- [20] Li S Y, Wu F, Zhou Q, et al. Adopting agronomic strategies to enhance the adaptation of global rice production to future climate change: a meta-analysis. *Agron Sustain Dev*, 2024, 44: 23.
- [21] 张伟杨, 任维晨, 于吉祥, 等. 轻干湿交替灌溉促进水稻茎中碳同化物积累与转运的机制. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 42(6): 9–16.
- Zhang W Y, Ren W C, Yu J X, et al. The mechanism underlying alternate wetting and moderate soil drying irrigation enhancing carbon assimilates accumulation and remobilization in rice stems. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci Edn)*, 2021, 42(6): 9–16 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张洪程, 王夫玉. 中国水稻群体研究进展. *中国水稻科学*, 2001, 15: 51–56.
- Zhang H C, Wang F Y. Recent progress on research of rice population in China. *Chin J Rice Sci*, 2001, 15: 51–56 (in Chinese with English abstract).
- [23] Zhu G L, Chen Y T, Ella E S, et al. Mechanisms associated with tiller suppression under stagnant flooding in rice. *J Agron Crop Sci*, 2019, 205: 235–247.
- [24] Feng Z J, Qi Z J, Zhang Z X, et al. Effective tiller numbers, photosynthetic and yield response of rice (*Oryza sativa*) to shallow wet-dry irrigation water controlled at tillering stage in black soil area. *Agric Res*, 2021, 10: 97–104.
- [25] Okami M, Kato Y, Kobayashi N, et al. Morphological traits associated with vegetative growth of rice (*Oryza sativa* L.) during the recovery phase after early-season drought. *Eur J Agron*, 2015, 64: 58–66.
- [26] 张彬, 黄庆, 刘怀珍, 等. 不同水分管理模式下华南双季超级稻群体生长及物质生产特征. *中国稻米*, 2013, 19(4): 30–34.
- Zhang B, Huang Q, Liu H Z, et al. Characteristics of population growth and dry matter production in double-cropping super rice under different water management patterns in south China. *China Rice*, 2013, 19(4): 30–34 (in Chinese with English abstract).
- [27] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 等. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. *中国农业科学*, 2006, 39: 1336–1345.
- Yang J C, Du Y, Wu C F, et al. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39: 1336–1345 (in Chinese with English abstract).
- [28] Wang C, Fa X T, Meng Q H, et al. Comparison of agronomic and physiological characteristics for rice varieties differing in water use efficiency under alternate wetting and drying irrigation.

- Agronomy, 2024, 14: 1986.
- [29] 曹小闯, 刘晓霞, 马超, 等. 干湿交替灌溉改善稻田根际氧环境进而促进氮素转化和水稻氮素吸收. 植物营养与肥科学报, 2022, 28: 1–14.
- Cao X C, Liu X X, Ma C, et al. Alternative dry-wet irrigation improves the rhizospheric oxygen environment and nitrogen transformation, and increases nitrogen absorption by rice plants. J Plant Nutr Fert, 2022, 28: 1–14 (in Chinese with English abstract).
- [30] Hua K J, Yang P, Zhou J Y, et al. Enhancing rice yield, quality, and resource utilisation with slow-release fertiliser in alternate wetting and drying irrigation. Plant Soil Environ, 2024, 70: 253–262.
- [31] Xue Y G, Duan H, Liu L J, et al. An improved crop management increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in rice. Crop Sci, 2013, 53: 271–284.
- [32] Zang Y G, Wu G Z, Li Q Q, et al. Irrigation regimes modulate non-structural carbohydrate remobilization and improve grain filling in rice (*Oryza sativa* L.) by regulating starch metabolism. J Integr Agric, 2024, 23: 1507–1522.
- [33] Chu G, Chen T T, Chen S, et al. The effect of alternate wetting and severe drying irrigation on grain yield and water use efficiency of *indica-japonica* hybrid rice (*Oryza sativa* L.). Food Energy Secur, 2018, 7: e00133.
- [34] Thakur A K, Mandal K G, Mohanty R K, et al. Rice root growth, photosynthesis, yield and water productivity improvements through modifying cultivation practices and water management. Agric Water Manag, 2018, 206: 67–77.
- [35] 付景, 马梦娟, 张骐飞, 等. 干湿交替灌溉和施氮量对梗稻光合特性和氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2024, 50: 1787–1804.
- Fu J, Ma M J, Zhang Q F, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation and different nitrogen application levels on photosynthetic characteristics and nitrogen absorption and utilization of *japonica* rice. Acta Agron Sin, 2024, 50: 1787–1804.
- [36] Chu G, Wang Z Q, Zhang H, et al. Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. Food Energy Secur, 2015, 4: 238–254.
- [37] Gao C, Lin M W, He L, et al. The impact of water-saving irrigation on rice growth and comprehensive evaluation of irrigation strategies. Agronomy, 2024, 14: 1363.
- [38] Zhang Y, Meng Q H, Zhang N, et al. Yield and water use efficiency were enhanced under alternate wetting and drying irrigation in rice through improving leaf morphology and physiology. J Agron Crop Sci, 2025, 211: e70068.
- [39] 武志垒, 司振江, 黄彦, 等. 节水灌溉条件下寒区水稻光合产物形成的影响. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(9): 10–14.
- Wu Z L, Si Z J, Huang Y, et al. Effect of water-saving irrigation on the formation of photosynthetic products in rice of cold regions. Hydro Sci Cold Zone Eng, 2024, 7(9): 10–14 (in Chinese).
- [40] 孙仕宽. 西南稻区水稻粳籼亚种对水氮调控的响应特征研究. 西华大学硕士学位论文, 四川成都, 2024.
- Sun S K. Response Characteristics of *Japonica* and *Indica* Rice Subspecies to Water and Nitrogen Regulation in Southwest China. MS Thesis of Xihua University, Chengdu, Sichuan, China, 2024 (in Chinese with English abstract).