

节水灌溉对优良食味粳稻产量形成及根系形态的影响

赵春芳¹ 罗磊² 赵庆勇¹ 庄丽华² 管菊¹ 陈涛¹ 朱镇¹ 张亚东^{1,*} 王才林^{1,*}

(¹江苏省农业科学院 粮食作物研究所/国家耐盐碱水稻技术创新中心华东中心/国家水稻改良中心南京分中心, 南京 210014; ²淮阴工学院 生命科学与食品工程学院, 江苏 淮安 223003; *通信作者, email: zhangyd@jaas.ac.cn, clwang@jaas.ac.cn)

Effects of Water-saving Irrigation on Yield Formation and Root Morphology of High-quality *japonica* Cultivars

ZHAO Chunfang¹, LUO Lei², ZHAO Qingyong¹, ZHUANG Lihua², GUAN Ju¹, CHEN Tao¹, ZHU Zhen¹, ZHANG Yadong^{1,*}, WANG Cailin^{1,*}

(¹Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/East China Branch of National Center of Technology Innovation for Saline-Alkali Tolerant Rice/Nanjing Branch of National Rice Improvement Center, Nanjing 210014, China; ²School of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China; *Corresponding author, email: zhangyd@jaas.ac.cn, clwang@jaas.ac.cn)

Abstract: 【Objective】To explore the characteristics of yield formation and root morphology changes of two super *japonica* rice varieties with excellent eating quality under water-saving irrigation, and lay the foundation for clarifying the characteristics of drought resistance and yield stability of rice varieties and the development of water-saving cultivation techniques. 【Method】Using Nanjing 5718 and Nanjing 3908 as materials, three irrigation approaches were adopted in 2023 and 2024: flooding irrigation (W0), mild intermittent irrigation (W1), and moderate intermittent irrigation (W2). The differences in leaf color, tiller number, plant height, dry matter accumulation and transportation, yield and its components, and root morphological and physiological parameters were compared, and the correlations between each trait and yield were analyzed. 【Results】Compared with W0, there was no significant change in yield and its components for Nanjing 5718 under W1, while the yield of Nanjing 3908 decreased by 15.3% and 12.5% over two years, respectively. Panicle number and thousand-grain weight were also significantly decreased. Under W2, yield and its components of both varieties significantly decreased, with an average decrease of yield of 9.4% for Nanjing 5718 and 21.3% for Nanjing 3908 in both years. The tiller number, fertile tiller rate, dry matter accumulation, output rate and translocation rate of the stems and leaves of both varieties under W2 were significantly reduced, with the highest output and transport rates in Nanjing 5718 under W1. The leaf SPAD values of both varieties decreased with the increase of water-saving degrees, especially in the late stage of grain filling. Compared with W0, the root morphology parameters of Nanjing 3908 significantly decreased under two water-saving patterns; however, only root tip number, root length, root diameter and root surface area of Nanjing 5718 were significantly decreased under W2. Correlation analysis showed that plant height, leaf color at the late grain-filling stage, root morphological parameters were significantly positively correlated with yield. 【Conclusion】Nanjing 5718 could maintain high yield under water-saving irrigation and exhibited better water-saving effects, while Nanjing 3908 was more sensitive to water-saving irrigation and had a lower yield stability. Appropriate intermittent irrigation effectively maintained the stable yield of Nanjing 5718 by improving key indicators such as plant type, leaf color and root morphology of rice.

Keywords: *Oryza sativa*; water-saving irrigation; water stress; yield; root morphology

摘 要: 【目的】探究两个优良食味超级稻品种在节水灌溉条件下产量形成及根系形态变化的特性, 为明确品种的耐旱稳产特性及节水栽培技术研发提供依据。【方法】以南粳 5718 和南粳 3908 为材料, 在 2023 和 2024 年设置淹水灌溉(W0)、轻度间歇灌溉(W1)、中度间歇灌溉(W2)三种灌溉方式, 比较叶色、分蘖数、株高、干物质积累

收稿日期: 2025-03-09; 修改稿收到日期: 2025-04-27。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0117800); 现代农业产业技术体系项目(CARS-01)。

与转运、产量及其构成因素、根系形态生理指标等性状差异,并分析各性状与产量间的相互关系。【结果】与W0相比,W1下南粳5718的产量及构成因素无显著差异,而南粳3908产量在两年间分别降低了15.3%和12.5%,穗数和千粒重也显著降低。W2下两品种产量及部分构成因素显著降低,其中南粳5718产量两年平均减少9.4%,南粳3908产量两年平均减少21.3%。W2下两品种的分蘖数、茎蘖成穗率以及茎叶干物质积累量、输出与转化率显著降低,其中W1下南粳5718的干物质积累与转运表现最优。两品种的叶片SPAD值随节水程度增加而降低,尤其是灌浆后期表现更为明显。与W0相比,南粳3908在两种节水灌溉条件下,各根系形态指标均显著下降;而南粳5718仅在W2下根尖数、总根长、根直径、根表面积显著降低。相关性分析表明,灌浆后期水稻株高、叶色、根系形态指标与产量显著正相关。【结论】南粳5718在轻度节水灌溉下能够维持较高产量,表现出更好的节水效应,而南粳3908对节水灌溉表现较敏感,产量稳定性较差。合理的间歇灌溉通过改善水稻的株型、叶色和根系形态等关键指标,有效维持了南粳5718的产量稳定。

关键词: 水稻; 节水灌溉; 水分胁迫; 产量; 根系形态

水稻是我国重要的粮食作物之一,耗水量在农作物中占据首位。长期以来,生产上水稻的灌溉方式以常规淹水灌溉为主,用水量大且效率低^[1]。经过多年研究与实践,水稻节水灌溉技术研究已取得较好成果,总结出“浅、湿、晒”、间歇灌溉、干湿交替灌溉、控制灌溉等节水灌溉技术^[2-4]。这些技术能在保证水稻产量稳定的同时实现节水。

近年来,国内外研究者针对节水灌溉对水稻生长、产量形成及根系形态的影响开展了大量研究。研究表明,适度节水灌溉有多方面的积极作用,从植株整体发育层面,合理的节水灌溉能够加快有效分蘖形成,促使茎秆粗壮,提升有效穗数、结实率与灌浆速率,进而增加产量^[5-7]。然而,在重度干湿交替灌溉条件下,这些指标会大幅下降^[8]。在根系生长方面,相比传统淹水灌溉,干湿交替灌溉能充分激发水稻根系生长的潜力,使根系深入土壤,同时提高根系的氧化能力^[9]。总体而言,节水灌溉具备节水性和水稻高产潜力,如何明确水稻品种的耐旱稳产特性、构建适配的节水灌溉技术,已成为当前的研究热点。

在相同程度的水分胁迫下,不同水稻品种的生理反应存在明显差异。耐旱性强的品种,相较于旱敏感品种,根系更发达,抗氧化酶活性更高,叶片光合速率更强^[10]。因此,充分挖掘水稻品种的抗旱特性,并研发与之匹配的节水栽培技术,对于品种推广及水资源高效利用具有重要意义。

南粳5718和南粳3908是江苏省农业科学院粮食作物研究所选育的优良食味超级稻品种^[11-12],具有光合效率高、干物质积累与转运能力强等优势^[13],目前在江苏省广泛种植。本研究以这两个品种为试验材料,设置三种灌溉方式,探究其不同灌溉条件下产量形成及生理基础的变化规律,旨在为优良食味超级稻品种的节水稳产高效栽培技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以江苏省农业科学院粮食作物研究所培育的优良食味超级稻品种南粳5718与南粳3908作为试验材料。南粳5718属迟熟中粳稻品种,全生育期150 d左右,南粳3908属早熟晚粳稻品种,全生育期158 d左右。

1.2 试验设计

试验于2023–2024年在江苏省农业科学院水稻试验田进行。采用裂区试验设计,主区为灌溉方式,裂区为水稻品种。主区设置3种灌溉方式:淹水灌溉(W0)、轻度间歇灌溉(W1)和中度间歇灌溉(W2)。全生育期水分控制标准如图1,以水位作为田间水分控制指标,最上方数值为降雨时允许蓄水深度,中间值为灌水上限,下方数值为水位下限。灌水下限在W0、W1和W2处理下分别为0 mm、-30 mm(相当于土壤水势为-20 kPa)和-60 mm(相当于土壤水势为-40 kPa)。水分在灌水上限和水位下限之间循环进行,如降雨时小区地表水位高于最大蓄水深度,则自行排水。地表水位和土壤水势通过智能水位计(苏州佐竹机械有限公司)实时监测,每个小区安装1台。

5月15日播种,塑盘育秧,6月10日移栽,株行距为15 cm×25 cm,每穴3~4苗,小区面积为6.6 m×5.0 m,重复3次。各处理小区间用塑料隔板隔离,单独排灌。移栽15 d后开始灌溉处理,移栽后40 d进行晒田。试验区施氮量为300 kg/hm²,按 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{分蘖肥}}:m_{\text{穗肥}}=4:4:2$ 施用,其中基肥为N:P₂O₅:K₂O=16%:8%:6%的复合肥,50 kg/hm²,分蘖肥为尿素,17.4 kg/hm²,穗肥为N:P₂O₅:K₂O=16%:0:16%的复合肥,25 kg/hm²。按照大田常规管理措施进行病虫害防治和杂草管理。

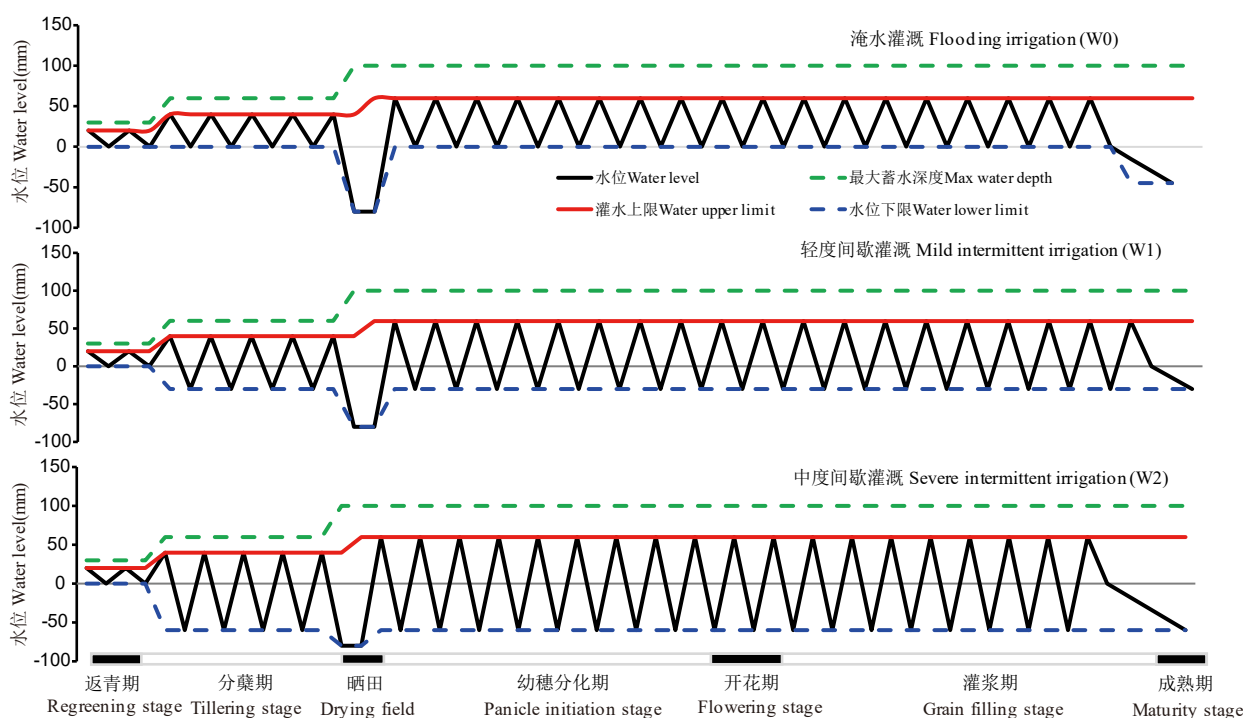


图1 水稻不同生育阶段的水分控制标准

Fig. 1. Control standard of irrigation water during different growth stages of rice

1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高与茎蘖动态

水稻移栽后, 在每个小区对角线定点两处, 每处定5株。从移栽开始, 每隔7 d测定株高。分蘖数统计选择7个主要生育时期: 返青期(移栽后3 d)、分蘖始期(移栽后14 d)、分蘖盛期(移栽后28 d)、分蘖末期(移栽后35 d)、穗分化始期(移栽后42 d)、抽穗期以及成熟期(收获前1 d)。

茎蘖成穗率=最终穗数/最高分蘖数 $\times 100\%$ 。

1.3.2 叶绿素含量

利用 SPAD-502 plus 型号的叶绿素测定仪(Soil and Plant Analyzer Development, SPAD)进行测定, 以仪器读数 SPAD 值表示。测定7个主要生育时期: 分蘖盛期、穗分化始期、孕穗期(抽穗前10 d)、抽穗期、灌浆期(花后14 d)、蜡熟期(花后28 d)以及成熟期。在剑叶抽出之前, 测定倒二叶, 待剑叶完全抽出后, 则测定剑叶。每张叶片的测定位置为上、中、下三处, 取其平均值作为该张叶片的 SPAD 值。采用五点取样法, 在每个小区选取5张叶片进行测定, 取平均值作为小区的 SPAD 值。

1.3.3 地上部干物质质量

按水稻抽穗后7 d、14 d、21 d、28 d、35 d、42 d、49 d(仅南粳3908)取完整植株, 每小区取5株, 分解为茎叶和穗, 在105℃下杀青30 min, 75℃

下烘干至恒重称取干物质质量, 计算茎叶干物质输出量、输出率和转化率。

茎叶干物质输出量(g)=齐穗期茎叶干物质质量-成熟期茎叶干物质质量;

茎叶干物质输出率(%)=茎叶干物质输出量/齐穗期茎叶干物质质量 $\times 100\%$;

茎叶干物质转化率(%)=茎叶干物质输出量/成熟期籽粒干物质质量 $\times 100\%$ 。

1.3.4 根系活力

在灌浆期(花后14 d)每个处理选取长势一致的植株3株, 挖取长宽深为20 cm $\times$ 20 cm $\times$ 20 cm的根际土块, 洗根后用根系活力试剂盒(TTC 比色法)测定活力值。

1.3.5 根系形态特征

用根系扫描仪(EPSON Expression 10000XL3.4)进行图像扫描, 通过 WinRHIZO Pro(Regent, Canada)根系分析系统分析根尖数、总根长、根表面积、根体积和根直径等数据。

1.3.6 产量指标测定

水稻成熟期选长势均匀的10穴稻株, 统计有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因素, 收割小区植株计算产量。

1.4 计算方法与数据处理

采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 22.0 和 SAS

表 1 水稻产量及其构成因素在年份间、处理间及品种间的方差分析

Table 1. Analysis-of-variance (*F*-values) for grain yield and its components of rice between/among years, treatments and varieties

变异来源	自由度	抽穗期	穗数	每穗粒数	结实率	千粒重	产量
Source of variation	<i>df</i>	Heading date	Panicle number	Grain number per panicle	Seed setting rate	Thousand grain weight	Yield
年份 Year	1	*	**	ns	*	**	**
处理 Treatment	2	ns	ns	**	*	*	**
品种 Variety	1	**	**	ns	*	**	ns
年份×处理	2	ns	**	*	ns	ns	ns
Year×Treatment							
年份×品种	1	ns	ns	**	ns	**	**
Year×Variety							
处理×品种	2	*	ns	ns	ns	ns	**
Treatment×Variety							
年份×处理×品种	4	ns	*	ns	ns	ns	ns
Year×Treatment×Variety							

*, **分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著; ns 表示无差异。
*, ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively; ns, no significant difference.

软件进行数据处理、统计分析与作图。产量及其构成因素用两年数据分别进行分析, 由于年份间表现趋势一致, 其他性状数据用两年的平均值表示。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

方差分析表明, 除了每穗粒数, 其余性状在年份间的差异均达到(极)显著水平; 在不同灌溉水处理间的差异, 除了抽穗期和单位面积穗数差异不显著

以外, 其余性状均达到(极)显著水平; 抽穗期、单位面积穗数、结实率和千粒重在品种间达到(极)显著差异。穗数、每穗粒数、千粒重、产量及抽穗期在年份×处理间互作、年份×品种间及处理×品种间的互作上达到(极)显著水平, 在三因素互作上, 仅穗数达到显著水平(表 1)。

不同年份与灌溉方式下, 南粳 5718 和南粳 3908 的产量及其构成因素的差异见表 2。与淹水灌溉(W0)相比, 轻度间歇灌溉(W1)下, 南粳 5718 在 2023 年和 2024 年产量及其构成因素均无显著变化。南

表 2 不同灌溉方式下两品种产量及其构成因素的差异比较

Table 2. Comparison of yield and its components of two varieties under different irrigation patterns

年份	品种	灌溉方式	抽穗期	穗数	每穗颖花数	结实率	千粒重	产量
Year	Variety	Irrigation pattern	Heading date (d)	Panicle number	Spikelet number per panicle	Seed setting rate (%)	Thousand grain weight (g)	Yield (t/hm ²)
2023	南粳 5718 Nanjing 5718	W0	93.0±0.0 ab	8.4±1.3 c	115.3±5.5 a	96.5±0.7 a	31.8±0.9 a	11.0±0.7 a
		W1	93.7±0.6 a	8.9±0.4 bc	107.9±2.2 bc	97.1±0.6 a	31.3±0.6 a	10.6±0.4 ab
		W2	93.0±1.7 ab	8.6±0.3 bc	111.0±5.2 ab	95.9±1.1 a	31.5±0.5 a	10.1±0.3 b
	南粳 3908 Nanjing 3908	W0	102.7±1.2 bc	8.5±0.2 d	111.0±4.8 ab	96.4±1.6 a	29.1±0.7 a	11.1±0.3 a
		W1	104.0±1.7 ab	10.0±0.4 cd	88.8±6.1 c	96.8±0.6 a	28.2±0.1 b	9.4±0.5 b
		W2	104.7±0.6 a	8.3±0.3 d	102.5±3.1 b	95.1±2.2 a	27.9±0.3 b	8.8±0.6 c
2024	南粳 5718 Nanjing 5718	W0	93.0±1.0 ab	9.9±0.4 ab	102.6±0.6 c	91.3±1.5 b	29.4±0.1 b	8.5±0.3 c
		W1	92.3±0.6 ab	10.3±0.4 a	103.0±3.2 c	87.8±0.8 bc	29.1±0.7 b	8.3±0.1 c
		W2	91.7±0.6 b	9.9±0.7 ab	104.6±4.2 bc	85.7±5.7 c	28.8±0.1 b	7.6±0.2 d
	南粳 3908 Nanjing 3908	W0	101.0±0.0 c	10.2±0.2 ab	112.5±4.8 ab	85.3±1.1 b	24.8±0.3 c	9.6±0.5 b
		W1	103.0±0.0 ab	10.7±0.3 a	108.7±8.7 ab	83.1±1.2 bc	24.3±0.3 c	8.4±0.6 c
		W2	102.3±0.6 bc	9.7±0.3 c	114.5±5.5 a	81.6±1.7 c	24.4±0.2 c	7.5±0.2 d

表中数据为平均数±标准差(*n*=15); 同列不同字母表示同一品种处理间的差异达显著水平(*P*<0.05)。W0: 淹水灌溉; W1: 轻度间歇灌溉; W2: 中度间歇灌溉。下同。
Data are shown as mean ±SD (*n*=15); Values flanked by different letters indicate significant difference at the 0.05 level between treatments for a rice variety. W0, Flooding irrigation; W1, Mild intermittent irrigation; W2, Moderate intermittent irrigation. The same below.

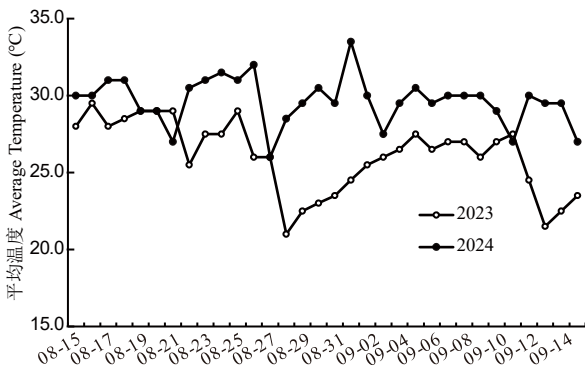


图2 2023年和2024年南京8月15日至9月15日的日平均温度
Fig. 2. Daily average temperature from August 15 to September 15 in Nanjing in 2023 and 2024

粳 3908 的产量在两年间分别降低了 15.3%和 12.5%，千粒重降低了 3.1%、每穗颖花数降低了 20.0%(2023 年)。在中度间歇灌溉(W2)下，两品种的产量及部分构成因素显著下降。南粳 5718 两年平均产量降低了 9.4%，其他性状无显著差异；而南粳 3908 两年平均产量降低了 21.3%，降幅显著高于南粳 5718，2023 年千粒重下降了 4.1%，2024 年结实率、有效穗数分别下降了 4.3%、4.9%。这表明南粳 5718 表现出更好的节水效应，能够维持较高产量，而南粳 3908 对节水灌溉较为敏感，产量稳定性较差。

此外，在相同灌溉条件下两品种在 2023 年的产量、千粒重、结实率均显著高于 2024 年，且两品种在 2024 年抽穗期提前。调查 2023 年和 2024

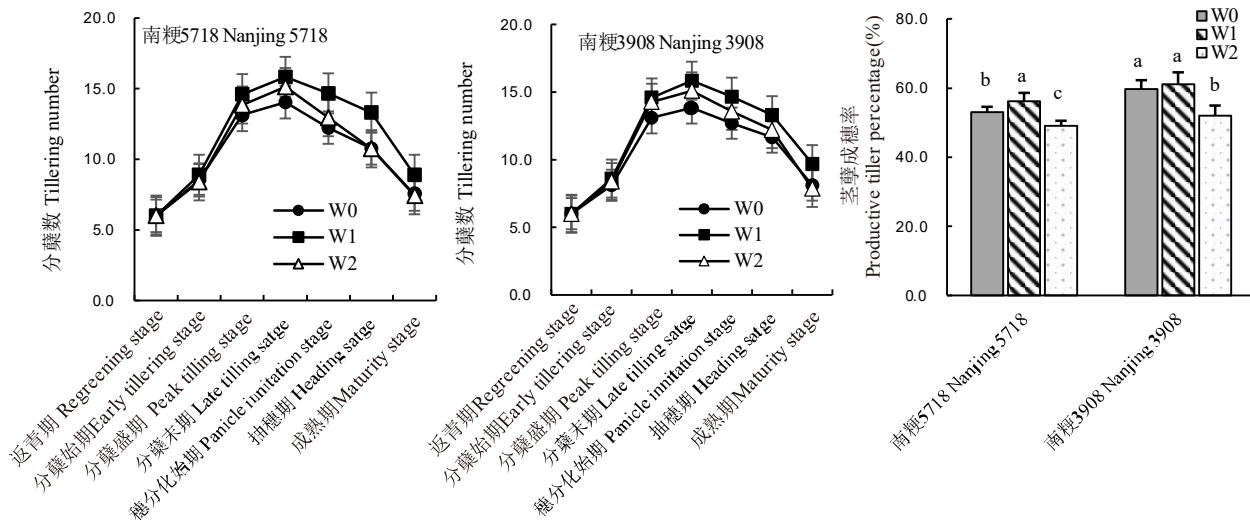
年 8 月 15 日–9 月 15 日(两品种的抽穗至灌浆期)的温度，如图 2 所示，此时间段的日平均气温在 2024 年为 26~33.5℃，显著高于 2023 年(21~29.5℃)。因此，造成年份间差异的原因是 2024 年的异常高温天气。

2.2 茎蘖动态

分别在返青期、分蘖始期、分蘖盛期、分蘖末期、穗分化始期、抽穗期和成熟期 7 个时期进行了茎蘖动态分析。结果表明，在不同灌溉方式下，随生育进程推进，南粳 5718 和南粳 3908 的分蘖数呈先升高后降低趋势，于分蘖末期达到峰值(图 3)。整体上，两品种在 W1 处理下的分蘖动态显著高于 W2 与 W0 处理；营养生长阶段，W0 处理下分蘖数最低；生殖生长阶段，W2 与 W0 处理差异不明显。在茎蘖成穗率上，两品种均在 W1 处理下最高，W2 处理下最低。表明 W1 处理有利于水稻分蘖数与有效穗数的形成。

2.3 株高动态

两品种在三种灌溉方式下的株高动态如图 4 所示。随移栽天数增加，南粳 5718 和南粳 3908 株高均呈先上升后平稳趋势。前期株高增长快，南粳 5718 在 63 d 时达到最高值，之后保持平稳；南粳 3908 在 70 d 时达到最高值并趋于平稳。南粳 5718 在三种灌溉方式下株高差异较小，而南粳 3908 从移栽后 28 d 后，株高在三种灌溉方式中呈显著差异，表现为 W0>W1>W2。表明随节水程度提高，南粳 3908 株高受抑制作用显著增强。

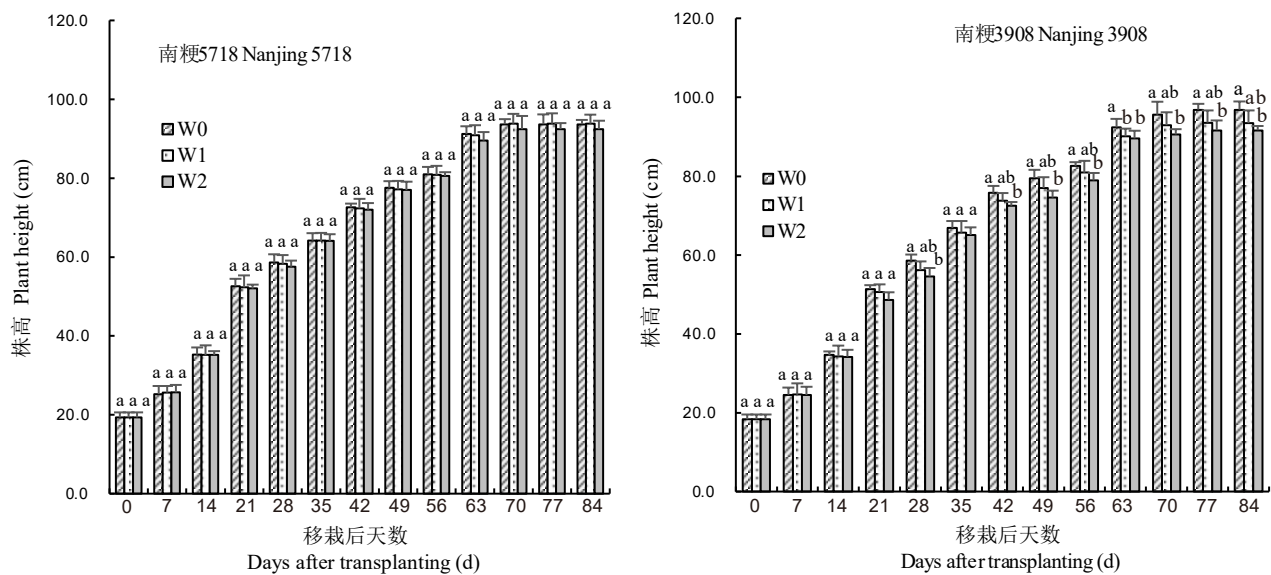


不同字母表示同一品种在 0.05 水平上的差异显著性。

Different letters indicate the significant difference for the same variety at 0.05 level.

图3 不同灌溉方式下两品种的分蘖动态和茎蘖成穗率

Fig. 3. Tillering dynamics and fertile tiller rate of two varieties under different irrigation patterns



不同字母表示同一品种不同处理间的差异显著 ($P<0.05$)。
Different letters indicate the significant difference among different treatments for the same variety ($P<0.05$).

图4 不同灌溉方式下两品种的株高动态
Fig. 4. Plant height dynamics of two varieties under different irrigation patterns

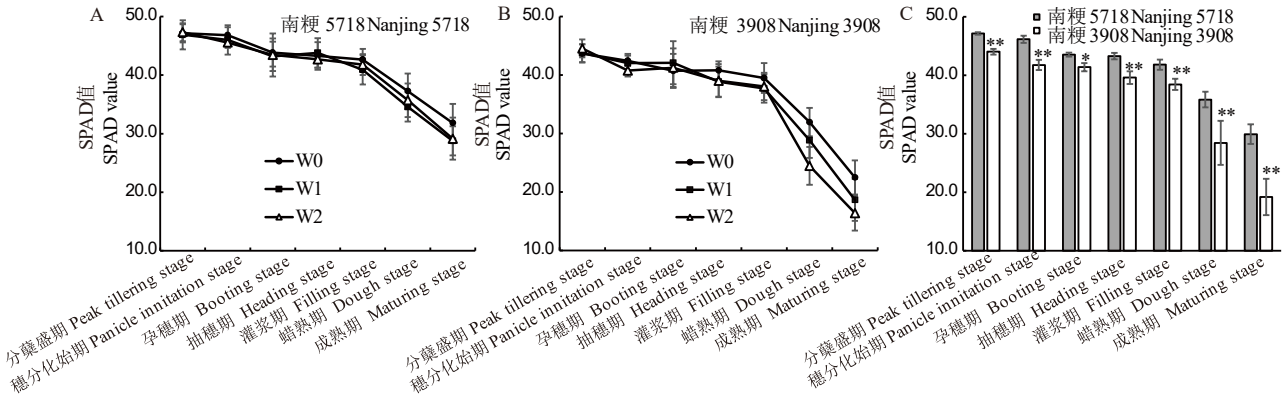
2.4 叶色动态

针对分蘖盛期、穗分化始期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、蜡熟期和成熟期7个主要生育阶段,分析了不同灌溉方式下两品种的叶色动态,结果如图5-A~B所示。随生育进程推进,南粳5718和南粳3908在三种灌溉方式下,叶片SPAD值均逐渐降低。与W0处理相比,在W1和W2处理下,南粳5718从灌浆期开始,叶片SPAD值显著下降;南粳3908则从抽穗期就开始下降,且下降幅度大于南粳5718,后期下降幅度越大。在成熟期,南粳5718在W1和W2处理下,SPAD值分别降低9.7%和

8.4%;南粳3908降幅分别为17.1%和27.2%,表明南粳3908在生育后期叶片衰老更快。从三种灌溉方式下叶片SPAD值均值来看,南粳5718显著高于南粳3908(图5-C)。

2.5 抽穗后地上部干物质积累与转运

由图6可知,随抽穗后籽粒灌浆进程推进,两品种茎叶干物质质量逐渐下降,而穗干物质质量则逐渐上升。与W0处理相比,在W1处理下,南粳5718灌浆前期茎叶干物质质量较高,灌浆后期较低;穗干物质质量除灌浆前期略低于W0,灌浆后期稍有增加。W2处理下,南粳5718灌浆前期茎叶干物质质量较低,



A: 南粳5718的SPAD值动态; B: 南粳3908的SPAD值动态; C: 两品种在三种灌溉方式下的SPAD值均值比较。*和**表示0.05和0.01水平上的差异显著性(t 测验)。

A, SPAD value dynamics of Nanjing 5718; B, SPAD value dynamics of Nanjing 3908; C, Mean comparison of SPAD values of two varieties under three irrigation patterns. * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 by the Student's t -test, respectively.

图5 不同灌溉方式下水稻主要生育阶段叶片SPAD值的动态
Fig. 5. SPAD value dynamics of rice during main developmental stages under different irrigation patterns

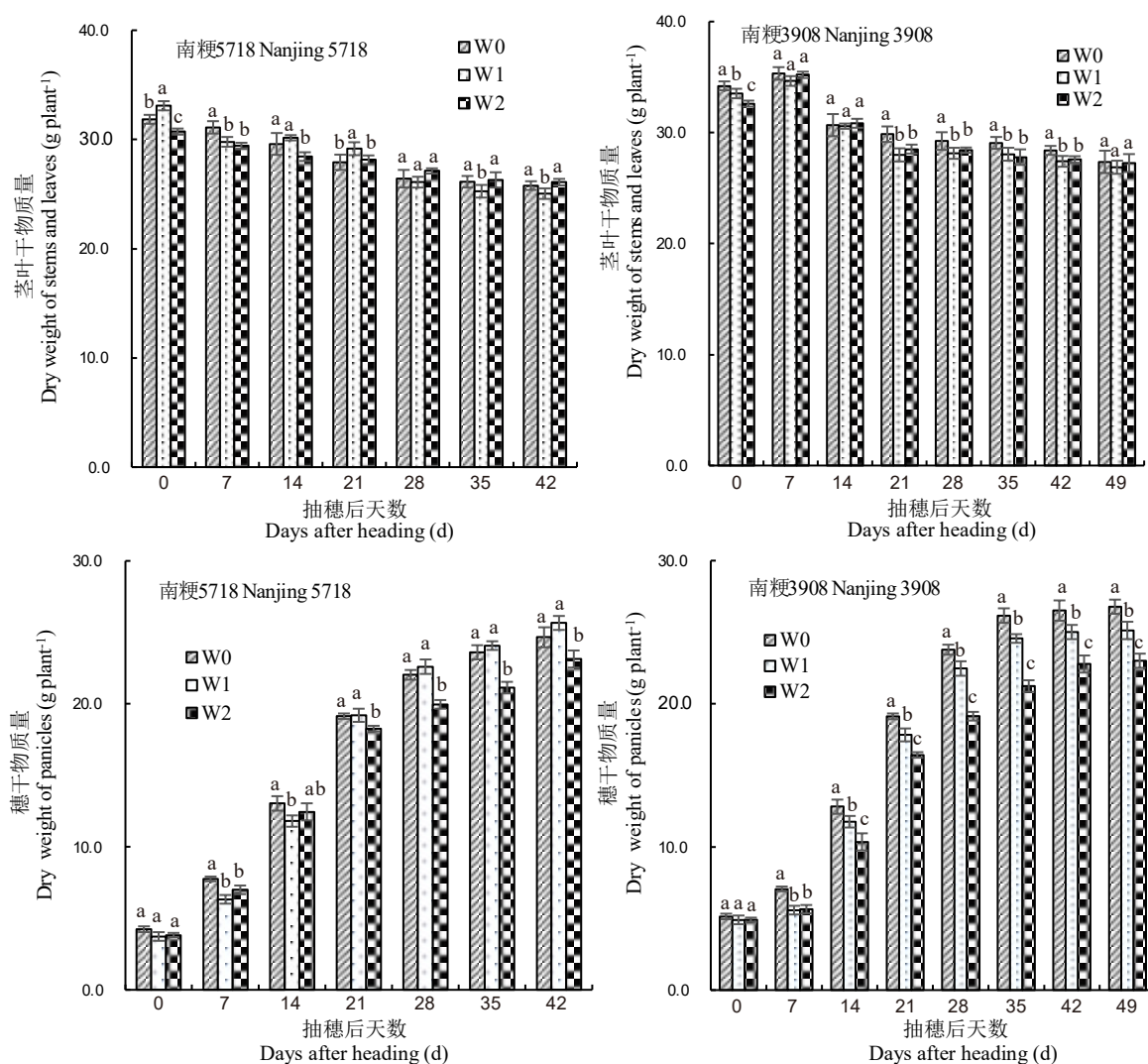


图6 不同灌溉方式下两品种抽穗后地上部干物质质量积累的动态

Fig. 6. Shoot dry matter accumulation dynamics of two varieties after heading under different irrigation patterns

灌浆后期与 W0 相当, 穗干物质在灌浆后期显著下降。对于南粳 3908, 在 W1 和 W2 处理下, 茎叶干物质质量从灌浆开始至中后期明显下降, 穗干物质质量在 W0、W1、W2 处理中依次显著降低。在穗干物质总量降低比例上, 南粳 5718 在 W1、W2 处理下分别为 0.9% 和 7.6%, 南粳 3908 则为 6.9% 和 16.2%。这表明与南粳 3908 相比, 南粳 5718 在节水条件下能维持较高的地上部生物量, 尤其是穗干物质质量。

由表 3 可知, 南粳 5718 在三种灌溉方式下, 茎叶干物质质量的输出量、输出率及转化率呈现出 W1>W0>W2 的趋势, 且三个处理间差异显著。南粳 3908 的输出量与输出率在 W0 和 W1 处理下基本相当, 显著高于 W2 处理; 而在转化率上, 三种灌溉处理间无显著差异。

2.6 根系形态与活力

良好的根系形态与活力是水稻抗旱稳产形成

的重要原因。为探究南粳 5718 和南粳 3908 在节水灌溉下产量形成差异的原因, 本研究在灌浆期调查了两品种在三种灌溉方式下的根系生理形态特征。与 W0 相比, W1 处理下, 南粳 5718 的各根系性状及根干质量均无显著变化; W2 处理下, 根尖数、总根长、根直径、根表面积显著下降。南粳 3908 在 W1 和 W2 处理下, 各根系指标均显著下降, 且 W2 处理下的降幅大于 W1 处理(表 4)。

品种间比较发现, 在根尖数、根体积和根干质量等指标上, 南粳 3908 显著高于南粳 5718, 表明其根系更发达。从图 7 可知, 两品种在不同灌溉方式下根系活力无显著差异, 但南粳 5718 根系活力显著高于南粳 3908。这表明相比南粳 3908, 南粳 5718 根系在节水灌溉下适应能力更强, 活力值更高。

2.7 相关性分析

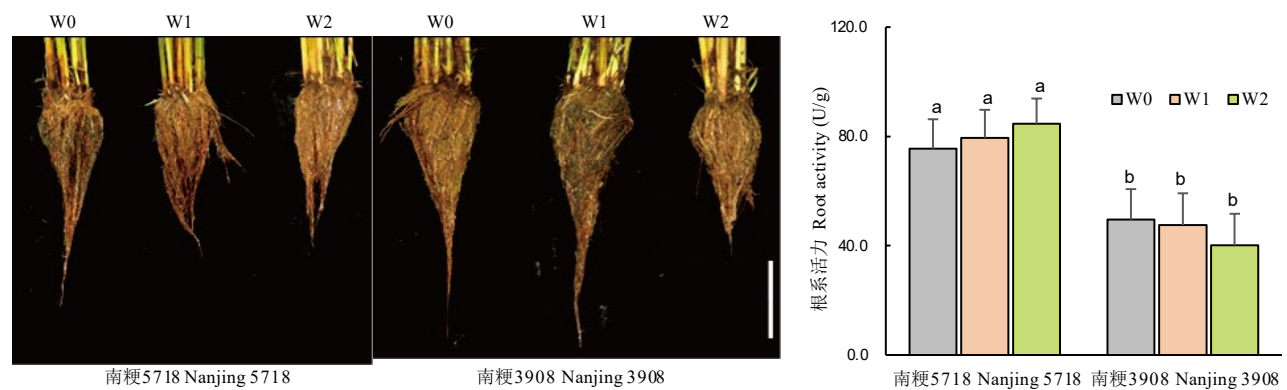
通过各性状与产量的相关性分析(表 5), 株高、

表 3 不同灌溉方式下两品种茎叶干物质量的输出与转运

Table 3. Output and translocation of dry matter of stems and leaves of two varieties under different irrigation patterns				
品种 Variety	灌溉方式 Irrigation pattern	输出量 Output amount (g)	输出率 Output rate (%)	转化率 Translocation rate (%)
南粳 5718 Nanjing 5718	W0	6.07±0.40 b	19.05±1.57 b	24.61±0.95 b
	W1	8.05±0.42 a	24.32±1.44 a	31.37±1.02 a
	W2	4.62±0.27 c	15.05±0.79 c	19.98±0.45 c
南粳 3908 Nanjing 3908	W0	6.84±0.61 a	20.00±1.35 a	25.60±1.05 a
	W1	6.64±0.52 a	19.81±1.02 ab	25.40±1.26 a
	W2	5.88±0.46 b	18.03±1.26 b	24.89±0.68 a

表 4 不同灌溉方式下两品种根系形态参数的差异比较

Table 4. Comparison of differences in root morphology parameters between two varieties under different irrigation patterns							
品种 Variety	灌溉方式 Irrigation pattern	根尖数 Root tip number	总根长 Total root length (m)	根直径 Root diameter (mm)	根表面积 Root surface area (cm ²)	根体积 Root volume (cm ³)	根干质量 Root dry weight (g)
南粳 5718	W0	478.3±59.0 a	8.1±0.4 a	0.48±0.03 a	213.9±25.9 a	3.7±0.5 a	2.3±0.4 a
Nanjing 5718	W1	473.3±47.4 a	7.6±0.5 a	0.45±0.04 a	200.7±6.3 a	3.7±0.2 a	2.2±0.3 a
	W2	389.0±53.0 b	6.8±0.5 b	0.39±0.02 b	185.9±9.8 b	3.6±0.3 a	2.0±0.4 a
南粳 3908	W0	665.0±56.2 a	8.3±0.3 a	0.58±0.01 a	224.7±10.9 a	5.1±0.1 a	4.6±0.6 a
Nanjing 3908	W1	570.7±41.7 b	7.5±0.5 b	0.48±0.05 b	174.2±19.0 b	3.9±0.4 b	3.5±0.2 b
	W2	487.8±43.0 c	5.7±0.3 c	0.41±0.02 c	126.6±12.6 c	2.6±0.8 c	2.9±0.2 c



标尺=8 cm。不同字母表示显著差异 ($P<0.05$)。
Bar=8 cm. Difference letters indicate the significant difference ($P<0.05$).

图 7 不同灌溉方式下两品种的根系形态和活力表现

Fig. 7. Root morphology and activity of two varieties under different irrigation patterns

表 5 各性状与产量间的相关系数

Table 5. Correlation coefficients between the investigated traits and yield								
抽穗期 Heading date	株高 Plant height	SPAD 值 SPAD value				茎叶干物质 Dry mass of stems and leaves		
		抽穗期	灌浆期	蜡熟期	成熟期	输出量	输出率	转化率
		Heading	Filling	Dough	Maturing	Output	Output	Transform
		stage	stage	stage	stage	amount	rate	rate
0.351	0.916*	0.741	0.701	0.840*	0.761	0.567	0.473	0.367
根系形态 Root morphology						根系活力		
直径 Diameter	总根长 Total root length	根尖数 Root tip number	根表面积 Surface area	根体积 Root volume	根干质量 Root dry weight	Root activity		
0.989**	0.794	0.910*	0.670	0.891*	0.808	-0.096		

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上的相关显著性。
*and ** represent the significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

SPAD 值(蜡熟期)与产量呈显著正相关;根系形态特征参数中根直径、根尖数、根体积亦与产量呈显著或极显著正相关,说明节水灌溉下保持良好的根系特征有利于产量稳定。

3 讨论

3.1 节水灌溉对水稻产量形成的影响

水分是影响水稻生长发育的关键因素,灌水量对水稻株高、分蘖、光合、籽粒充实等有显著影响。一般随灌水量增加,株高上升,茎粗减少,叶绿素积累增加^[14]。较多研究表明,适宜节水有助于水稻产量的提升^[15],但也有研究指出,水分胁迫(尤其在灌浆期)往往降低籽粒的结实率与千粒重,导致水稻减产^[8,16]。这主要由于试验材料及其抗旱性、胁迫程度、土壤环境和光温条件不同,而产生不同结果。因此,针对目标材料,特别是拥有自主知识产权的主推品种,探索适宜的节水灌溉条件,可为形成高产高效栽培技术提供重要依据。

本研究中对比淹水灌溉(W0)发现,南粳 3908 在轻度间歇灌溉(W1)下,两年产量平均下降了 13.9%,而在中度间歇灌溉(W2)下平均下降了 21.3%,主要是由于每穗粒数、结实率、千粒重等降低,表明节水灌溉(即使轻度节水)不利于其产量稳定。而节水灌溉对南粳 5718 产量及其构成因素影响较小,仅 W2 处理下产量显著降低,降幅远低于南粳 3908,说明南粳 5718 在节水灌溉下能维持高产,属于较耐旱品种,而南粳 3908 对节水灌溉较敏感。在地上部干物质积累与转运方面,南粳 5718 的茎叶干物质质量及茎叶干物质积累、输出与转化率,在 W1 处理下显著高于 W0 和 W2 处理,表明轻度间歇灌溉在一定程度上提高茎叶干物质积累与转运率,增加籽粒干物质占比。诸多研究证实,适宜干湿交替灌溉相比重度干湿交替灌溉和淹水灌溉,可以显著提升成穗率、干物质积累与转运效率,增加产量^[17-20],进一步说明轻度节水条件下,南粳 5718 较高的转运率是其能稳定高产的一个重要原因。当然,也有不同结论。彭劲舟等^[21]表明控制灌溉模式对水稻茎叶干质量存在抑制作用,这可能与所选试验材料不耐旱有关,如本研究中南粳 3908 产量以及干物质积累与转运对节水灌溉敏感。

控制灌溉或旱作处理可显著提高叶片 SPAD 值、净光合速率和转化效率,促进地上部干物质积累^[22-23]。本研究中,两品种叶片 SPAD 值随节水程度增加而逐渐降低,南粳 3908 降幅高于南粳 5718,

主要差异体现在灌浆中后期。这可能与试验所选品种类型有关,以往研究多选用耐旱性较好的籼稻或杂交稻品种^[6, 24-25]。南粳 5718 相比南粳 3908,叶片 SPAD 值较高,灌浆中后期下降较少,则可为籽粒输送更多的光合有机物。因此,较高的叶绿素含量可能是南粳 5718 在节水灌溉下产量稳定的又一个原因。此外,本研究通过全生育期分蘖和株高动态监测发现,两品种分蘖数在 W1 处理下最高,其次为 W2 处理, W0 处理最低; W1 处理下两品种茎蘖成穗率最大,说明轻度间歇灌溉能有效抑制无效分蘖,促使有效分蘖,提升产量^[26]。

3.2 节水灌溉对水稻根系形态及活力的影响

根系作为作物吸收养分与水分的关键器官,与地上部生长发育及产量形成密切相关^[27]。研究表明,控制灌溉较淹水灌溉可以使水稻增产。其主要机制在于,控制灌溉可以充分激发水稻生长的补偿效应,光合产物优先分配给根系,促使根系伸长、根毛增多、活力增强等,远优于常规淹水灌溉下的水稻根系^[28-31]。然而,重度节水条件往往致使水稻根长缩短、根系有机酸分泌减少^[32]。不同水稻品种在根系形态与代谢特性上差异显著,对环境因素特别是干旱、盐碱等非生物胁迫的响应也各不相同^[33]。

本研究中,与 W0 处理相比, W1 处理下南粳 5718 的根系形态指标无明显变化,南粳 3908 的根系形态指标却显著下降。在 W2 处理下,两品种的根系指标均显著下降,且南粳 3908 的降幅远高于南粳 5718。此外,南粳 3908 的根系活力值显著低于南粳 5718。相关性分析显示,各根系指标与产量(显著)正相关。进一步表明,在节水灌溉条件下,南粳 5718 能够稳定产量,得益于其更强的根系耐节水胁迫能力和更高的根系活力。而南粳 3908 虽然根系较为发达,根干质量、根体积较大,但对节水灌溉仍表现较为敏感。该结果与侯丹平等^[34]研究结果一致,即在轻度节水灌溉条件下,抗旱稻品种的根系形态生理指标保持稳定,而旱敏感品种会显著下降。

4 结论

与常规淹水灌溉相比,南粳 5718 在轻度间歇灌溉下,产量、产量构成因素及根系形态指标无显著变化,分蘖数与茎蘖成穗率更高,茎叶干物质质量输出与转化率提升。在中度间歇灌溉下,南粳 5718 仅有效穗数与结实率稍有降低,产量降幅较小,表

现出良好的节水灌溉效应,属于耐旱性较好品种。在同等节水灌溉条件下,南粳 3908 的产量及其构成因素均显著下降,且降幅较大,对节水灌溉表现敏感,产量稳定性较差。良好的根系活力、较高的茎叶干物质转运率以及较高的叶绿素含量,是南粳 5718 在节水灌溉下稳产的重要生理基础。

参考文献:

- [1] Yu Q, Dai Y, Wei J, Wang J, Liao B, Cui Y. Rice yield and water productivity in response to water-saving irrigation practices in China: A meta-analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 302: 109006.
- [2] Bouman B A M, Peng S B, Castañeda A R, Visperas R M. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 74(2): 87-105.
- [3] 马世浩, 杨丞, 王贵兵, 张赓, 李小坤. 水稻节水灌溉技术模式研究进展[J]. 节水灌溉, 2021(8): 19-24.
Ma S H, Yang C, Wang G B, Zhang G, Li X K. Research progress of rice water-saving irrigation technology mode[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(8): 19-24. (in Chinese)
- [4] 黎宇钦, 王平章, 黄必善, 王述斌, 熊威, 何军, 陈真雄. 不同栽培方式和灌溉模式对水稻生长特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2024(8): 11-16, 23.
Li Y Q, Wang P Z, Huang B S, Wang S B, Xiong W, He J, Chen Z X. Effects of different cultivation methods and irrigation modes on growth characteristics, yields and water use efficiency of rice[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(8): 11-16, 23. (in Chinese with English abstract)
- [5] Zhang H, Xue Y, Wang Z, Yang J, Zhang J. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice[J]. *Crop Science*, 2009, 49(6): 2246-2260.
- [6] 付景, 刘洁, 曹转勤, 王志琴, 张耗, 杨建昌. 结实期干湿交替灌溉对 2 个超级稻品种结实率和粒重的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(6): 1056-1065.
Fu J, Liu J, Cao Z Q, Wang Z Q, Zhang H, Yang J C. Effects of alternate wetting and drying irrigation during grain filling on the seed-setting rate and grain weight of two super rice cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(6): 1056-1065. (in Chinese with English abstract)
- [7] Chen Z K, Yang X L, Song W Z, Khan A, Najeeb U, Li P, Cao C G. Water-saving cultivation plus super rice hybrid genotype improves water productivity and yield[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(3): 1764-1777.
- [8] 朱宽宇, 展明飞, 陈静, 王志琴, 杨建昌, 赵步洪. 不同氮肥水平下结实期灌溉方式对水稻弱势粒灌浆及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(2): 155-168.
Zhu K Y, Zhan M F, Chen J, Wang Z Q, Yang J C, Zhao B H. Effects of irrigation regimes during grain filling under different nitrogen rates on inferior spikelets grain-filling and grain yield of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(2): 155-168. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhuang Y, Zhang L, Li S, Liu H, Zhai L, Zhou F, Ye Y, Ruan S, Wen W. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 374-382.
- [10] Li Y, Zheng S, Xiao M, Xia Y, Wang W, Cai J. Effect on physiological growth and water utilization of rice under different varieties and irrigation modes[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, 31(6): 5125-5137.
- [11] 陈涛, 张亚东, 赵庆勇, 朱镇, 姚姝, 周丽慧, 赵凌, 赵春芳, 王波, 王才林. 优良食味抗病高产晚粳稻新品种南粳 3908 的选育和栽培技术[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 72-74.
Chen T, Zhang Y D, Zhao Q Y, Zhu Z, Yao S, Zhou L H, Zhao L, Zhao C F, Wang B, Wang C L. Breeding and cultivation techniques of Nanjing 3908, a new late japonica rice variety with excellent taste, disease resistance, and high yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(19): 72-74. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张亚东, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 冯凯华, 姚姝, 周丽慧, 赵凌, 赵春芳, 梁文化, 路凯, 王才林. 优良食味粳稻南粳 5718 的选育及主要特征特性[J]. 中国稻米, 2020, 26(4): 100-102.
Zhang Y D, Zhu Z, Chen T, Zhao Q Y, Feng K H, Yao S, Zhou L H, Zhao L, Zhao C F, Liang W H, Lu K, Wang C L. Breeding and main characteristics of Nanjing 5718, a japonica rice variety with excellent eating quality[J]. *China Rice*, 2020, 26(4): 100-102. (in Chinese with English abstract)
- [13] 魏晓东, 宋雪梅, 王宁, 赵庆勇, 朱镇, 陈涛, 赵凌, 王才林, 张亚东. 南粳系列超级稻品种灌浆期光合产物的分配特性[J]. 中国农业科学, 2024, 57(12): 2309-2321.
Wei X D, Song X M, Wang N, Zhao Q Y, Zhu Z, Chen T, Zhao L, Wang C L, Zhang Y D. Distribution characteristics of photosynthetic products of Nanjing series of super rice during filling stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(12): 2309-2321. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郝树荣, 董博豪, 周鹏, 潘永春, 王子欣. 水分胁迫对超级稻生长发育和抗倒伏能力的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9): 1-8.
Hao S R, Dong B H, Zhou P, Pan Y C, Wang Z X. The effects of water stress on growth and resistance of super rice against lodging[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(9): 1-8. (in Chinese with English abstract)

- [15] 李俊峰, 杨建昌. 水分与氮素及其互作对水稻产量和水肥利用效率的影响研究进展[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(3): 327-334.
Li J F, Yang J C. Research advances in the effects of water, nitrogen and their interaction on the yield, water and nitrogen use efficiencies of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(3): 327-334. (in Chinese with English abstract)
- [16] Yang X, Wang B, Chen L, Li P, Cao C. The different influences of drought stress at the flowering stage on rice physiological traits, grain yield, and quality[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 3742.
- [17] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 顾春梅, 那永光, 解保胜. 灌溉方式对寒地水稻产量及籽粒灌浆的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4493-4506.
Zhao L M, Li M, Zheng D F, Gu C M, Na Y G, Xie B S. Effects of irrigation regimes on yield and grain filling of rice (*Oryza sativa* L.) in cold region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(22): 4493-4506. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王志军, 叶春秀, 董永梅, 李有忠, 田又升, 陈林, 孙国清, 谢宗铭. 滴灌和淹灌栽培模式下水稻光合生理、荧光参数及产量构成因素分析[J]. 植物生理学报, 2016, 52(5): 723-735.
Wang Z, Ye C, Dong Y, Li Y, Tian Y, Chen L, Sun G, Xie Z. Analysis of photosynthetic physiology, fluorescence parameters, and yield components of rice under drip irrigation and flooding cultivation modes[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(5): 723-735. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王志军, 叶春秀, 董永梅, 李有忠, 田又升, 陈林, 孙国清, 谢宗铭. 滴灌和淹灌栽培模式下水稻光合生理、荧光参数及产量构成因素分析[J]. 植物生理学报, 2016, 52(5): 723-735.
Wang Z J, Ye C X, Dong Y M, Li Y Z, Tian Y S, Chen L, Sun G Q, Xie Z M. Photosynthetic physiology, chlorophyll fluorescence parameters and yield components of rice under drip irrigation with plastic film mulching and continuous flooding[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(5): 723-735. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吴龙龙, 虞轶俊, 田仓, 张露, 黄晶, 朱练峰, 朱春权, 孔亚丽, 张均华, 曹小闯, 金千瑜. 干湿交替灌溉下施氮模式对水稻光合产物和氮转运的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(3): 295-307.
Wu L L, Yu Y J, Tian C, Zhang L, Huang J, Zhu L F, Zhu C Q, Kong Y L, Zhang J H, Cao X C, Jin Q Y. Effects of different nitrogen application regimes on translocation of rice photosynthetic products and nitrogen under alternate wetting and drying irrigation[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(3): 295-307. (in Chinese)
- [21] 毛心怡, 王为木, 郭相平, 卢昕宇. 不同节水灌溉模式对水稻生理生长和产量形成的影响[J]. 节水灌溉, 2020, 33(1): 25-28.
Mao X, Wang W, Guo X, Lu X. Effects of different water-saving irrigation modes on physiological growth and yield formation of rice[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020, 33(1): 25-28. (in Chinese with English abstract)
- [22] 彭劲舟, 孙书洪, 薛铸, 邱菁华, 张鹏飞, 杨嘉润. 不同控制灌溉模式对水稻主要农艺性状及品质的影响[J]. 天津农学院学报, 2024, 31(2): 25-30.
Peng J Z, Sun S H, Xue Z, Qiu J H, Zhang P F, Yang J R. Effects of different control irrigation modes on the main agronomic characters and quality of rice[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2024, 31(2): 25-30. (in Chinese with English abstract)
- [23] Gao C, Lin M, He L, Tang M, Ma J, Sun W. The impact of water-saving irrigation on rice growth and comprehensive evaluation of irrigation strategies[J]. *Agronomy*, 2024, 14(7): 1363.
- [24] 杨晓龙, 王彪, 汪本福, 张枝盛, 张作林, 杨蓝天, 程建平, 李阳. 不同水分管理方式对旱直播水稻产量和稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(3): 285-294.
Yang X L, Wang B, Wang B F, Zhang Z S, Zhang Z L, Yang L T, Cheng J P, Li Y. Effects of different water management on yield and rice quality of dry-seeded rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(3): 285-294. (in Chinese with English abstract)
- [25] Chu G, Chen T, Chen S, Xu C, Wang D, Zhang X. The effect of alternate wetting and severe drying irrigation on grain yield and water use efficiency of indica-japonica hybrid rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Food and Energy Security*, 2018, 7(2): e00133.
- [26] 殷春渊, 王书玉, 刘贺梅, 孙建权, 胡秀明, 王和乐, 田芳慧, 马朝阳, 张栩, 张瑞平, 马晓红. 节水灌溉与常规灌溉对旱直播水稻叶片生理特性、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(18): 1-9.
Yin C Y, Wang S Y, Liu H M, Sun J Q, Hu X M, Wang H L, Tian F H, Ma C Y, Zhang X, Zhang R P, Ma X H. Effects on leaf physiological characteristics, yield and quality of dry seeding rice: Water-saving irrigation and conventional irrigation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(18): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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.
- [28] 法晓彤, 孟庆好, 王琛, 顾汉柱, 景文疆, 张耗. 水稻根系形态生理对干湿交替灌溉方式的响应研究进展[J]. 作物杂志, 2024(6): 1-8.
Fa X T, Meng Q H, Wang C, Gu H Z, Jing W J, Zhang H. Research progress on response of rice root morphology

- and physiology to alternate wetting and drying irrigation[J]. *Crops*, 2024(6): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [29] 甄博, 周新国, 郭树龙, 李彩霞, 郭冬冬. 控制灌溉条件下灌水周期对水稻生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S2): 25-28.
Zhen B, Zhou X G, Guo S L, Li C X, Guo D D. Effect of irrigation cycle on rice growth under controlled irrigation conditions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(S2): 25-28. (in Chinese with English abstract)
- [30] 孙小淋, 杨立年, 杨建昌. 水稻高产节水灌溉技术及其生理生态效应[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3): 253-257.
Sun X L, Yang L N, Yang J C. Water-saving and high-yielding irrigation techniques of rice and their physiological and ecological effects[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(3): 253-257. (in Chinese)
- [31] 邓环, 曹凑贵, 程建平, 蔡明历, 汪金平. 不同灌溉方式对水稻生物学特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 602-606.
Deng H, Cao C G, Cheng J P, Cai M L, Wang J P. Impact of different irrigation methods on biological characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 602-606. (in Chinese with English abstract)
- [32] 徐冉, 杨文叶, 朱均林, 陈松, 徐春梅, 刘元辉, 章秀福, 王丹英, 褚光. 不同灌溉模式对籼粳杂交稻甬优1540 产量与水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(2): 425-439.
Xu R, Yang W Y, Zhu J L, Chen S, Xu C M, Liu Y H, Zhang X F, Wang D Y, Chu G. Effects of different irrigation regimes on grain yield and water use efficiency in Japonica-indica hybrid rice cultivar Yongyou 1540[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(2): 425-439. (in Chinese with English abstract)
- [33] 徐国伟, 吕强, 陆大克, 王贺正, 陈明灿. 干湿交替灌溉耦合施氮对水稻根系性状及籽粒库活性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(10): 1495-1505.
Xu G W, Lü Q, Lu D K, Wang H Z, Chen M C. Effect of wetting and drying alternative irrigation coupling with nitrogen application on root characteristic and grain-sink activity[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(10): 1495-1505. (in Chinese with English abstract)
- [34] 汪妮娜, 黄敏, 陈德威, 徐世宏, 韦善清, 江立庚. 不同生育期水分胁迫对水稻根系生长及产量的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(9): 1650-1656.
Wang N N, Huang M, Chen D W, Xu S H, Wei S Q, Jiang L G. Effects of water stress on root and yield of rice at different growth stages[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(9): 1650-1656. (in Chinese with English abstract)
- [35] 侯丹平, 谭金松, 毕庆宇, 张安宁, 刘毅, 王飞名, 刘国兰, 余新桥, 毕俊国, 罗利军. 水分胁迫对节水抗旱稻产量形成和根系形态生理特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(1): 27-37.
Hou D P, Tan J S, Bi Q Y, Zhang A N, Liu Y, Wang F M, Liu G L, Yu X Q, Bi J G, Luo L J. Effects of water stress on yield formation and root morphological and physiological characteristics of water-saving and drought-resistant rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(1): 27-37. (in Chinese with English abstract)