

灌浆结实期半深水灌溉对水稻产量、干物质转运及籽粒灌浆的影响

郭威^{1,2,3} 孙冬^{1,2} 闫治霖^{1,2} 丁蓓^{1,2} 杜跃辰^{1,2}
吴慧扬^{1,2} 徐强^{1,2,3} 窦志^{1,2,3} 高辉^{1,2,3}

(¹江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 225009, 江苏扬州; ²江苏省优质粳稻产业工程研究中心, 225009, 江苏扬州; ³扬州大学水稻产业工程技术研究院, 225009, 江苏扬州)

摘要 近年来, 稻渔综合种养扩增迅速, 成为一种重要的水稻种植制度。不少稻渔综合种养模式需在水稻种植的一定时期内形成半深水环境以满足水产动物的生长活动需求, 这与水稻单作常规浅湿灌溉方式存在较大差异。以粳型常规水稻南粳 5718 和籼型两系杂交水稻徽两优 898 为试验材料, 设置 3 种灌溉模式, 分别为常规高产栽培浅湿灌溉模式 (CK)、抽穗期至抽穗后 40 d 实施 20 cm (WD20) 和 40 cm 深的灌溉 (WD40), 研究了结实期不同灌溉深度对水稻产量、干物质积累与转运及籽粒灌浆的影响。结果表明, 与 CK 相比, WD20 和 WD40 处理造成 2 个试验品种结实率和千粒重均显著下降, 导致水稻减产, 且 WD40 的减产幅度明显大于 WD20 处理, 徽两优 898 的产量损失大于南粳 5718。经分析发现, 与 CK 相比, 半深水灌溉下水稻营养器官呈现出明显的“滞绿”现象, 叶片衰老变慢, 但光合作用生产的光合物质无法被充分转运利用, 茎秆干物质转运和籽粒灌浆明显差于 CK 处理, 收获指数呈显著下降趋势。半深水灌溉下水稻强势粒和弱势粒的灌浆速率明显降低, 导致水稻粒重显著下降, 且弱势粒灌浆受半深水灌溉的影响更大。

关键词 水稻; 半深水灌溉; 产量; 干物质转运; 籽粒灌浆

2024 年, 我国稻渔综合种养面积达 307 万 hm^2 ^[1], 约占全国水稻种植总面积的 10%, 表明稻渔综合种养已成为我国主要稻作制度之一。稻渔综合种养与水稻单作的关键环境差异在于, 为满足鱼、虾、蟹和鳖等水产品大规格、高品质生长的需求, 在水稻特定生长阶段需建立并维持较深水体, 一般灌溉深度在 20~40 cm^[2-3], 既高于常规稻田淹灌水深 (3~6 cm), 但又明显低于东南亚所谓“深水稻”的淹水深度 (50 cm 以上)^[4], 因此本文暂将其定义为“半深水灌溉”。例如, 在长江流域的稻虾共作模式中, 待水稻返青、植株增高后, 田间逐步建立 15 cm 以上水层并投放克氏原螯虾苗种, 最终维持在 20~40 cm 水层以满足虾类生长需求^[5-6]。再如, 浙江地区的稻鱼共作模式中, 水稻有效分蘖期后稻田水层会逐渐加深并长期保持在 20~35 cm^[7], 为田鱼生长活动提供适宜水深, 直至乳熟期才排水捕鱼。

水浆管理是调控水稻产量形成的重要农艺措施。高产栽培研究^[8]表明, “寸水缓苗、浅水分蘖、够苗搁田、孕穗抽穗有水、干湿交替灌浆”的水

分管理方式, 有助于促进秧苗返青与分蘖、控制无效分蘖、提高土壤氧化还原电位、增强根系与茎秆发育, 促进灌浆期间同化物向籽粒转运, 这种“浅、湿、露、晒”相结合的水浆管理模式, 能有效提高水稻生理活性、协调各产量因素, 从而实现水稻高产^[9-10]。而发生涝害或持续淹灌会抑制水稻分蘖发生^[11]、阻碍根系发育^[12]、减少干物质积累与转运^[13]、增加倒伏风险^[14], 最终导致产量与品质下降。

灌浆结实期是水稻产量形成的关键阶段, 该时期干物质转运与籽粒灌浆水平直接决定水稻产量的高低, 且部分稻渔共作模式在灌浆结实期仍实施半深水灌溉, 例如湖北和浙江地区的稻鱼共作模式^[5,7]。然而, 结实期半深水灌溉是否会对水稻产量构成显著影响, 干物质转运及籽粒灌浆对半深水灌溉又作何响应, 目前还鲜有报道。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年在安徽省天长市永丰镇稻渔综

作者简介: 郭威, 主要从事水稻栽培研究, E-mail: 1034177399@qq.com

窦志为通信作者, 主要从事水稻高产优质栽培和稻渔综合种养研究, E-mail: douzhi@yzu.edu.cn

基金项目: 天长市横向课题 (20230705000010); 国家重点研发计划 (2024YFD2300504)

收稿日期: 2025-12-12; 修回日期: 2026-03-25; 网络出版日期: 2026-04-10

合种养创新试验基地进行。试验地点位于高邮湖西岸，属季风性湿润气候区，光照充足，雨水充沛。试验田土壤为黏土，其基本理化性质为 pH 6.0、有机质 27.5 g/kg、全氮 1.83 g/kg、有效磷 17.8 mg/kg、速效钾 123 mg/kg。

1.2 试验设计

试验在专门为稻渔综合种养试验建设的水泥池小区里进行。每个水泥池长 10.0 m、宽 5.0 m、深 0.5 m，可实现不同灌溉处理方式。供试水稻品种为粳型常规水稻南粳 5718 和籼型两系杂交水稻

徽两优 898。5 月 15 日采用塑料软盘育秧，6 月 16 日人工栽插，南粳 5718 栽插行株距为 30 cm×13 cm，每穴栽 3 苗，徽两优 898 栽插行株距为 30 cm×17 cm，每穴栽 2 苗。试验设置 3 种灌溉模式，分别为常规高产栽培浅湿灌溉模式（CK）；结实期 20 cm 水层灌溉，即自水稻抽穗至抽穗后 40 d 田间保持 20 cm 水层（WD20）；结实期 40 cm 水层灌溉，即自水稻抽穗至抽穗后 40 d 田间保持 40 cm 水层（WD40）。3 个处理具体水分管理方式见表 1。每个处理 3 次重复，采用随机区组排列。

表 1 各处理全生育期水分管理方式
Table 1 Water management methods in the whole growth period of each treatment

生育时期 Growth period	CK	WD20	WD40
缓苗期 Seedling recovering	0~2 cm 水层	0~2 cm 水层	0~2 cm 水层
分蘖期 Tillering	2~4 cm 水层	2~4 cm 水层	2~4 cm 水层
搁田期 Field drying	排干水，搁至土表有鸡爪纹	排干水，搁至土表有鸡爪纹	排干水，搁至土表有鸡爪纹
拔节孕穗期 Jointing and booting	浅湿交替	浅湿交替	浅湿交替
抽穗期-抽穗后 40 d Heading - 40 days after heading	浅湿交替	保持 20 cm 水层	保持 40 cm 水层
抽穗后 40 d-成熟期 40 days after heading - maturity	浅湿交替	浅湿交替	浅湿交替
成熟期 Maturity	收获前 7 d 左右断水	收获前 7 d 左右断水	收获前 7 d 左右断水

同一品种不同灌溉处理下的养分管理方案保持一致。南粳 5718 总施氮量为 300 kg/hm²，徽两优 898 总施氮量 225 kg/hm²，2 个品种氮肥施用比例关系均为基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3，磷钾肥的施用量均按照 N:P₂O₅:K₂O=1:0.5:0.8 的比例换算，磷肥一次性基施，钾肥分基肥和穗肥等量施用，基肥于移栽前 2 d 施用，分蘖肥于移栽后第 7 天施用，穗肥于水稻基部第一节间定长、第二节间伸长 1~2 cm 时施用。水稻病虫害防控参照当地稻渔综合种养常规方法进行，采用人工拔草方式控除杂草。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及其构成因素 于水稻成熟期每小区选取连续 30 穴植株，普查有效穗数，按照平均穗数代表性 3 穴，考查每穗颖花数、结实率和千粒重，计算理论产量。每个小区另取 50 穴水稻植株进行收割、脱粒、称重，用于计算实际产量。

1.3.2 干物质积累与转运相关指标 各小区分别于抽穗期和成熟期取样，每次每小区取长势具有代表性的水稻植株 3 穴，分成茎鞘、叶和穗，在 105 °C 下杀青 30 min 后，在 80 °C 下烘干至恒重，称重。

相关指标计算方法^[15]:

成熟期单茎地上部干重=成熟期单茎茎鞘干重+成熟期单茎叶干重+成熟期单茎穗干重;

抽穗-成熟期单茎穗干重积累量=成熟期单茎穗干重-抽穗期单茎穗干重;

抽穗-成熟期单茎茎鞘干物质输出量=抽穗期单茎茎鞘干重-成熟期单茎茎鞘干重;

茎鞘干物质输出率(%)=抽穗-成熟期单茎茎鞘干物质输出量/抽穗期单茎茎鞘干重×100;

茎鞘干物质贡献率(%)=抽穗-成熟期单茎茎鞘干物质输出量/抽穗-成熟期单茎穗干重积累量×100;

收获指数(%)=成熟期单茎穗干重/成熟期单茎地上部干重×100。

1.3.3 水稻籽粒灌浆相关指标 各小区于抽穗期一次标记同日始花、生长整齐的穗子 250 个。自抽穗期开始，每 10 d 每小区随机取标记穗 20 个。从田间取回样本后，取直接着生于穗顶部 4 个一次枝梗上的颖花，作为强势粒样本，取穗基部 4 个二次枝梗上的颖花，作为弱势粒样本。取样结束后，先在 105 °C 下烘 30 min 杀青，再于 75 °C 下连续烘 60 h，测定并计算粒重。使用 Richards 方程拟合籽粒增重过程，参照朱庆森等^[16]方法由拟合方程导出一系列一级和次级参数，对不同处理水稻籽粒灌浆过程进行生长分析。

Richards 方程:

$$W=A(1+Be^{-Kt})^{\frac{1}{N}} \quad (1)$$

式中, W 为各期生长量, 即千粒重, g ; t 为齐穗后天数, d ; A 、 B 、 K 、 N 为方程参数, 并用决定系数 (r^2) (W 依 t 的回归平方和占总平方和的比率) 表示其配合适度。

各次级参数计算公式如下:

$$R_0=K/N \quad (2)$$

$$T_{max}=(\ln B-\ln N)/K \quad (3)$$

$$GR_{mean}=AK/[2(N+2)] \quad (4)$$

$$GR_{max}=A(N+1)^{\frac{1}{N}} \quad (5)$$

$$D=[2(N+2)]/K \quad (6)$$

式中, R_0 为起始生长势, g ; T_{max} 为达到最大灌浆速率的时间, d ; GR_{mean} 为平均灌浆速率, mg/d ; GR_{max} 为最大灌浆速率, mg/d ; D 为活跃灌浆期, d 。

1.3.4 剑叶光合参数、SPAD 值 于水稻抽穗后 15 (D15) 和 35 d (D35), 在各小区选择 8 株长势一致的主茎, 用 SPAD-502 叶绿素仪 (Minolta, 日本) 测定水稻剑叶上、中、下部的叶绿素相对含量

(SPAD 值), 取平均值。

在抽穗后 15 和 35 d 各小区选择 5 株长势一致的水稻主茎植株, 用 Li-6400 便携式光合仪 (Li-Cor, 美国) 测定剑叶的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i)。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2019 处理数据和制作表格, 运用 IBM SPSS Statistics 23 进行统计分析, 根据研究设计和数据特点采用单因素方差分析并用 LSD 法进行多重比较, 使用 Origin 2021b 作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉深度对水稻产量及其构成因素的影响

方差分析结果 (表 2) 表明, 品种和灌溉深度对每穗颖花数、结实率、千粒重、理论产量、实际产量和收获指数均有显著或极显著影响, 同时品种和灌溉深度的互作对所有产量及其构成因素均无显著影响。

表 2 结实期不同灌溉深度对水稻产量及收获指数的影响

Table 2 Effects of different irrigation depths on rice yield and harvest index during grain filling stage

品种 Variety	处理 Treatment	单位面积有效穗数 Effective panicles per unit area ($\times 10^4/hm^2$)	每穗颖花数 Spikelets per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (t/hm^2)	实际产量 Actual yield (t/hm^2)	收获指数 Harvest index (%)
南粳 5718 NG5718	CK	316.30a	168.86a	91.91a	26.44a	12.25a	12.19a	58.71a
	WD20	311.60a	159.92ab	88.60b	25.54b	11.02b	10.98b	56.93ab
	WD40	309.13a	153.73b	83.22c	25.18c	9.41c	9.31c	52.86b
徽两优 898 HLY898	CK	234.64a	242.98a	88.73a	25.80a	12.08a	12.39a	60.33a
	WD20	232.22a	234.78ab	84.19b	24.42b	10.42b	10.63b	58.16ab
	WD40	234.96a	223.82b	80.07c	23.87c	9.12c	9.05c	53.58b
方差分析 Analysis of variance	V	2453.09**	2723.53**	90.91**	46.41**	8.63*	28.82**	23.28**
	ID	2.16	82.01**	178.20**	39.41**	186.48**	33.34**	104.70**
	V×ID	1.96	2.99	1.21	1.71	1.09	0.05	2.27

同一列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上差异显著。V 表示品种, ID 表示灌溉深度, V×ID 表示品种与灌溉深度互作。下同。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$ level. “*” and “**” indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. V represents variety, ID represents irrigation depth, V×ID represents the interaction between variety and irrigation depth. The same below.

由表 2 可知, 2 个品种不同处理下的理论产量均表现出 $CK > WD20 > WD40$ 的趋势。对水稻产量构成因素分析发现, 2 个品种单位面积有效穗数在不同处理间无显著差异。与 CK 处理相比, WD20 处理下南粳 5718 的每穗颖花数、结实率和千粒重分别下降了 5.3%、3.6%和 3.4%, 并减产了 10.1%, WD40 处理每穗颖花数、结实率和千粒重分别下降了 10.1%、9.6%和 4.8%, 同时理论产量下降了 23.2%。与 CK 相比, WD20 处理使徽两优 898 每

穗颖花数、结实率和千粒重分别下降了 5.1%、5.1%和 5.3%, 理论产量下降了 13.7%; WD40 处理使徽两优 898 每穗颖花数、结实率和千粒重分别下降了 10.4%、9.8%和 7.5%, 理论产量下降了 24.5%。与 CK 处理相比, WD20 和 WD40 处理使南粳 5718 的实际产量分别下降了 9.9%和 23.6%, 使徽两优 898 的实际产量分别下降了 14.2%和 26.9%, 这一结果与理论产量变化趋势完全一致。与 CK 相比, 2 个品种的收获指数在 WD20 和 WD40 处理均表现

出下降趋势,且收获指数在CK和WD40之间差异达到显著水平。

2.2 不同灌溉深度对水稻干物质积累与转运的影响

方差分析的结果(表3)表明,品种对不同时期

水稻各器官干物质重均有极显著影响,灌溉深度对除水稻抽穗期单茎茎鞘干重、单茎叶干重和单茎穗干重以外的干物质积累与转运的各项指标均具有极显著影响,两因素交互仅对成熟期单茎穗干重

表3 结实期不同灌溉深度对水稻干物质积累与转运的影响

Table 3 Effects of different irrigation depths on dry matter accumulation and translocation of rice during grain filling stage

品种 Variety	处理 Treatment	抽穗期		抽穗期		成熟期	
		单茎茎鞘干重 SDWPS-H (g)	单茎叶干重 LDWPS-H (g)	单茎穗干重 PDWPS-H (g)	单茎地上部干重 ADWPS-H (g)	单茎茎鞘干重 SDWPS-M (g)	单茎叶干重 LDWPS-M (g)
南粳 5718 NG5718	CK	3.27a	1.17a	0.56a	5.00a	2.56b	0.49b
	WD20	3.28a	1.07a	0.58a	4.93a	2.65b	0.55ab
	WD40	3.24a	1.05a	0.57a	4.86a	2.81a	0.60a
徽两优 898 HLY898	CK	3.88a	0.93a	0.81a	5.62a	3.03b	0.59b
	WD20	3.92a	0.94a	0.79a	5.65a	3.10b	0.64b
	WD40	3.86a	0.93a	0.83a	5.60a	3.35a	0.74a
方差分析 Analysis of variance	V	87.38**	35.97**	161.88**	16.32*	62.42**	3.68**
	ID	0.83	0.82	0.45	0.47	24.91**	2.64**
	V×ID	0.12	0.77	1.36	0.38	0.05	3.71

品种 Variety	处理 Treatment	成熟期		抽穗—成熟期		茎鞘干物	
		单茎穗干重 PDWPS-M (g)	单茎地上部干重 ADWPS-M (g)	单茎穗干重积累量 PDWAPS (g)	单茎茎鞘干物质输出量 SDMOPS (g)	质转运率 SDMTR (%)	质贡献率 SDMCR (%)
南粳 5718 NG5718	CK	4.34a	7.39a	3.78a	0.71a	21.80a	21.81a
	WD20	4.08b	7.29a	3.49ab	0.62a	19.04b	17.84a
	WD40	3.82c	7.22a	3.25b	0.42b	13.15c	13.10b
徽两优 898 HLY898	CK	5.82a	9.49a	5.01a	0.85a	21.91a	17.01a
	WD20	5.39b	9.27a	4.60b	0.78a	19.81b	16.89a
	WD40	4.52c	8.44b	3.69c	0.53b	13.66c	14.29b
方差分析 Analysis of variance	V	162.47**	266.42**	74.39**	30.98**	1.93	2.29
	ID	73.18**	28.87**	60.01**	172.96**	217.86**	58.08**
	V×ID	12.34*	15.40*	10.61**	0.52	0.31	6.67*

SDWPS-H: 抽穗期单茎茎鞘干重; LDWPS-H: 抽穗期单茎叶干重; PDWPS-H: 抽穗期单茎穗干重; ADWPS-H: 抽穗期单茎地上部干重; SDWPS-M: 成熟期单茎茎鞘干重; LDWPS-M: 成熟期单茎叶干重; PDWPS-M: 成熟期单茎穗干重; ADWPS-M: 成熟期单茎地上部干重; PDWAPS: 抽穗—成熟期单茎穗干重积累量; SDMOPS: 抽穗—成熟期单茎茎鞘干物质输出量; SDMTR: 茎鞘干物质转运率; SDMCR: 茎鞘干物质贡献率。

SDWPS-H: stem-sheath dry weight per stem at heading; LDWPS-H: leaf dry weight per stem at heading; PDWPS-H: panicle dry weight per stem at heading; ADWPS-H: aboveground dry weight per stem at heading; SDWPS-M: stem-sheath dry weight per stem at maturity; LDWPS-M: leaf dry weight per stem at maturity; PDWPS-M: panicle dry weight per stem at maturity; ADWPS-M: aboveground dry weight per stem at maturity; PDWAPS: panicle dry weight accumulation per stem at heading-maturity; SDMOPS: stem-sheath dry matter output per stem at heading-maturity; SDMTR: translocation rate of stem-sheath dry matter; SDMCR: contribution rate of stem-sheath dry matter.

和成熟期单茎地上部干重有显著影响。

由表3可知,2个品种各处理下抽穗期单茎茎鞘干重和单茎叶干重差异不显著,而成熟期单茎地上部干重和抽穗—成熟期单茎穗干重积累量在CK和WD40处理之间均存在显著差异,且均表现出CK>WD20>WD40的趋势。与CK处理相比,南粳5718在WD20处理下成熟期单茎穗干重和抽穗—成熟期单茎穗干重积累量分别降低了6.0%和7.7%,WD40处理下则分别下降了11.2%和14.0%;徽两优898在WD20处理下成熟期单茎穗干重和抽穗—成熟期单茎穗干重积累量分别下降了7.4%和

8.2%,WD40处理下则分别下降了22.3%和26.4%。

不同品种水稻各处理的抽穗—成熟期单茎茎鞘干物质输出量、茎鞘干物质转运率和茎鞘干物质贡献率均呈现为CK>WD20>WD40,且任意2个处理之间茎鞘干物质转运率的差异均达到显著水平;抽穗—成熟期单茎茎鞘干物质输出量和茎鞘干物质贡献率在CK与WD40处理之间、WD20与WD40处理之间均存在显著差异,而在CK与WD20处理之间无显著差异。与CK处理相比,南粳5718在WD20处理下茎鞘干物质转运率和贡献率分别下降了12.7%和18.2%,WD40处理下则分别下降

了 39.7%和 40.0%；徽两优 898 在 WD20 处理下茎鞘干物质转运率和贡献率分别下降了 9.6%和 0.7%，WD40 处理分别下降了 37.7%和 15.9%。

2.3 不同灌溉浓度对水稻籽粒灌浆相关指标的影响

对结实期间粒重变化用 Richards 方程进行了

拟合，参数估计值和决定系数见表 4。强势粒和弱势粒的拟合度均在 0.9900 以上，说明不同粒位的籽粒灌浆过程均可用 Richards 模型描述。2 个品种各处理强、弱势粒方程形状参数 N 均大于 1.00，说明速率曲线右偏，强势粒的 N 值表现为 $CK > WD20$

表 4 籽粒灌浆过程的 Richards 方程参数估计值
Table 4 Richards equation parameter estimates for grain filling process

品种 Variety	处理 Treatment	粒位 Grain position	A	B	K	N	生长量 $W(g)$	标准差 S	决定系数 r^2
南粳 5718 NG5718	CK	强势粒	28.75	75.89	0.25	2.05	28.74	0.57	0.9994
		弱势粒	23.79	542.92	0.25	2.86	23.74	0.56	0.9992
	WD20	强势粒	26.48	54.17	0.25	1.80	26.47	1.33	0.9964
		弱势粒	21.53	2404.84	0.27	3.94	21.45	0.44	0.9993
	WD40	强势粒	24.76	14.34	0.18	1.33	24.69	0.96	0.9976
		弱势粒	19.91	5440.38	0.24	4.03	19.31	1.45	0.9917
徽两优 898 HLY898	CK	强势粒	29.46	129.16	0.27	2.87	29.45	0.9	0.9983
		弱势粒	25.42	9970.80	0.30	4.67	25.36	1.36	0.9958
	WD20	强势粒	27.59	20.10	0.20	1.82	27.54	1.16	0.9967
		弱势粒	24.60	3532.45	0.24	4.76	24.22	1.23	0.9961
	WD40	强势粒	26.42	18.74	0.18	1.80	26.33	1.06	0.9970
		弱势粒	22.65	7485.26	0.21	5.01	20.92	0.03	0.9999

>WD40，而弱势粒则相反。

由表 4 可知，2 个品种各处理下弱势粒最终粒重（生长终值量 A ）均明显低于强势粒，且强、弱势粒的生长量 W 均表现出 $CK > WD20 > WD40$ 的趋势。南粳 5718 在 WD20 处理下强势粒和弱势粒粒重分别较 CK 处理降低了 7.9%和 9.6%，WD40 处理下强势粒和弱势粒的粒重分别较 CK 降低了 13.9%和 16.3%；徽两优 898 在 WD20 处理下强势粒和弱势粒的粒重分别较 CK 处理降低了 6.4%和

3.2%，WD40 处理下强势粒和弱势粒的粒重分别较 CK 处理降低了 10.3%和 10.9%。

表 5 显示，2 个品种籽粒灌浆的 GR_{mean} 和 GR_{max} 均表现为 $CK > WD20 > WD40$ 。由图 1 可知，2 个品种不同处理强、弱势粒的灌浆速率均表现出先上升后下降的趋势，强势粒的 GR_{max} 和 GR_{mean} 均高于相同处理下的弱势粒，且强势粒达到 GR_{max} 的时间明显早于弱势粒，强势粒的活跃灌浆期均短于同处理下的弱势粒。

表 5 结实期不同灌溉深度对水稻籽粒灌浆特征参数的影响
Table 5 Effects of different irrigation depths on grain filling characteristic parameters of rice at grain filling stage

品种 Variety	处理 Treatment	粒位 Grain position	起始生长势 R_0	达到最大灌浆速率的时间 $T_{max} (d)$	平均灌浆速率 $GR_{mean} (mg/d)$	最大灌浆速率 $GR_{max} (mg/d)$	活跃灌浆期 $D (d)$
南粳 5718 NG5718	CK	强势粒	0.1241	14.21	0.9025	1.8051	31.85
		弱势粒	0.0884	20.72	0.6189	1.2379	38.43
	WD20	强势粒	0.1367	13.83	0.8575	1.7151	30.88
		弱势粒	0.0678	24.01	0.4843	0.9686	44.45
	WD40	强势粒	0.1361	13.17	0.6721	1.3443	36.84
		弱势粒	0.0587	30.50	0.3903	0.7806	51.01
徽两优 898 HLY898	CK	强势粒	0.0950	13.93	0.8255	1.6510	35.68
		弱势粒	0.0653	25.14	0.5807	1.1614	43.77
	WD20	强势粒	0.1079	12.26	0.7084	1.4168	38.94
		弱势粒	0.0597	27.94	0.4921	0.9842	49.99
	WD40	强势粒	0.0988	13.18	0.6179	1.2358	42.75
		弱势粒	0.0427	34.12	0.3460	0.6919	65.46

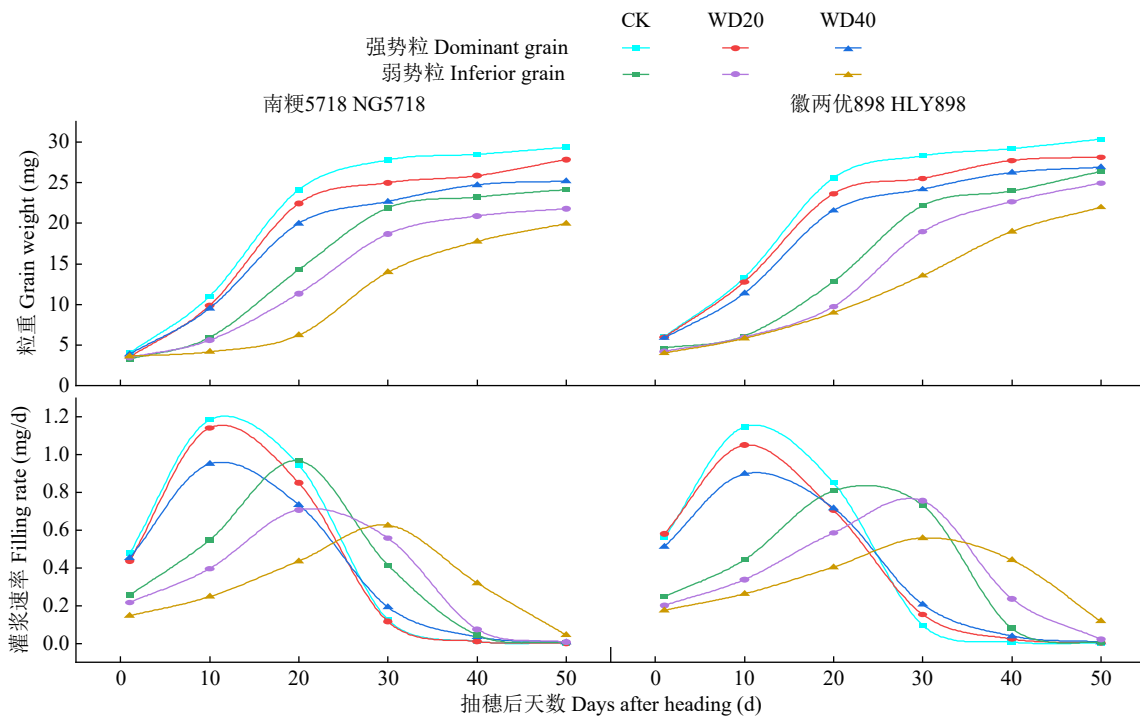


图 1 结实期不同灌溉深度下水稻籽粒粒重和灌浆速率动态

Fig.1 Grain weight and grain filling rate dynamic of rice under different irrigation depths during the grain filling stage

2 个品种不同灌溉处理下强势粒达到 GR_{max} 的时间差异较小，但弱势粒达到 GR_{max} 的时间在不同处理间存在明显差异，CK 处理明显早于 WD20 处理，WD20 处理又明显早于 WD40 处理，且 WD40 处理与 WD20 之间的差异较 WD20 与 CK 处理之间的差异更大。2 个品种强、弱势粒 GR_{max} 和 GR_{mean} 均表现出 $CK > WD20 > WD40$ 的趋势。南粳 5718 强势粒活跃灌浆期在 CK 和 WD20 处理之间无明显差异，但 WD40 处理下弱势粒活跃灌浆期较 CK 和 WD20 明显延长，WD20 处理下弱势粒活跃灌浆期明显长于 CK 处理，WD40 处理下弱势粒活跃灌浆期又明显长于 WD20 处理。徽两

优 898 强势粒与弱势粒活跃灌浆期均表现为 $CK < WD20 < WD40$ ，且弱势粒活跃灌浆期在不同处理间差异大于强势粒。

2.4 不同灌溉深度对水稻剑叶光合参数的影响

本试验测定了抽穗后 15 和 35 d 水稻剑叶光合参数和 SPAD 值（表 6）。方差分析结果表明，品种对 D35 的 C_i 和 D15 的 T_r 具有显著影响，而灌溉深度对 2 个时期的 P_n 、D15 的 G_s 和 2 个时期的 T_r 均具有显著影响，品种和灌溉深度均对 D15 和 D35 的剑叶 SPAD 值具有极显著影响，两因素互作除了对 D15 的 SPAD 值有显著影响外，对其他不同时期剑叶光合参数和 SPAD 值均无显著影响。

表 6 结实期不同灌溉深度对水稻抽穗后 15 和 35 d 剑叶光合参数和 SPAD 值的影响
Table 6 Effects of different irrigation depths during the grain filling stage on photosynthetic parameters and SPAD values of flag leaves at 15 and 35 days after heading

品种 Variety	处理 Treatment	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		G_s [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)		T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		SPAD 值 SPAD value	
		D15	D35	D15	D35	D15	D35	D15	D35	D15	D35
南粳 5718 NG5718	CK	27.76a	14.90a	0.44a	0.29a	373.00a	294.67a	8.57a	3.27b	44.77a	36.50a
	WD20	24.60ab	13.10a	0.39ab	0.31a	359.00b	298.00b	8.39ab	3.95a	49.50a	38.67a
	WD40	22.59b	19.73b	0.33b	0.35a	351.33b	324.67b	7.53b	4.43a	47.17a	43.83b
徽两优 898 HLY898	CK	25.60a	11.14a	0.38a	0.32a	379.00a	342.00a	9.47a	3.63a	43.03a	26.20a
	WD20	25.53a	10.60a	0.36a	0.29a	374.67a	330.33a	9.19ab	3.84a	41.70a	31.77ab
	WD40	23.47b	13.76b	0.32b	0.36a	371.00a	338.33a	8.21b	3.27b	41.80a	35.07b
方差分析 Analysis of variance	V	0.52	6.95*	2.89	0.06	0.55	8.55*	6.80*	1.12	37.34**	99.70**
	ID	8.44*	5.51*	8.70*	0.09	0.57	0.42	4.82*	5.90*	12.22**	11.92**
	V×ID	3.17	1.78	1.71	0.22	0.13	0.40	0.07	3.51	7.28*	0.64

南粳 5718 与徽两优 898 的光合参数在不同灌溉处理下表现出明显的响应差异。在 D15 时期, 南粳 5718 剑叶的 P_n 在 WD20 和 WD40 处理下较 CK 处理分别降低了 11.4% 和 18.6%, 徽两优 898 的 P_n 在 CK 与 WD20 处理之间无显著差异, 但该品种 WD40 下的 P_n 较 CK 处理降低了 8.6%; 剑叶 G_s 和 C_i 在不同水稻品种中均呈现出 CK > WD20 > WD40 的趋势, 但在 WD20 与 WD40 处理之间无显著差异; 南粳 5718 剑叶 T_r 在 WD20 和 WD40 处理下较 CK 分别下降了 2.1% 和 12.1%, 而徽两优 898 的 T_r 在 WD20 和 WD40 处理下较 CK 分别下降了 2.9% 和 16.9%。D15 时期 2 个品种剑叶 SPAD 值在不同灌溉处理之间无显著差异, 随着灌浆进行, 2 个品种剑叶 SPAD 值在 D35 时期均明显小于 D15, 在 D35 时期, 2 个品种剑叶 SPAD 值均表现为 WD40 > WD20 > CK, 且 WD40 处理与 CK 之间的差异达到了显著水平。图 2 是抽穗后 35 d 植株形态照片, 可知 WD40 处理下水稻植株整体最绿, 其次是 WD20 处理, 最后是 CK 处理。

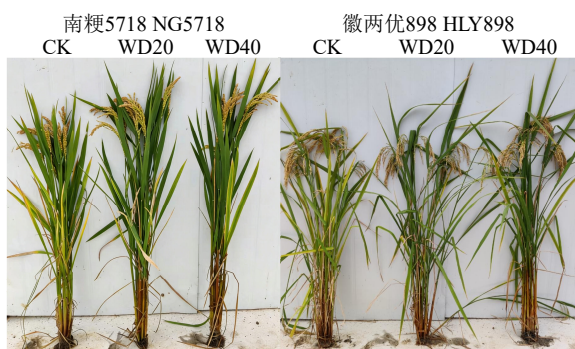


图 2 抽穗后 35 d 不同灌溉深度下水稻植株形态

Fig.2 Rice plant morphology under different irrigation depths 35 days after heading

3 讨论

水浆管理是调控水稻生长发育的重要农艺措施。水稻高产栽培研究^[8-9,17]表明, 分蘖期和孕穗期浅湿交替为主、结实期干湿交替的灌溉方式既能满足水稻生理和生态需水, 也能促进水稻高产优质形成。近年来, 在水稻价格持续不振的背景下, 稻渔综合种养因其经济效益好、生态环境友好而得到大面积推广^[18], 稻虾、稻鱼和稻蟹等稻渔共作模式均需在水稻生长期建立较深的水层来为水产动物创造适宜的生长环境, 所以半深水灌溉是稻渔共作农事管理区别于水稻单作生产的一个重要特征^[2],

因此, 必须要重视半深水灌溉之于水稻生长的效应, 而灌浆结实期是水稻产量形成至关重要的阶段, 该阶段光合物质生产及其转运利用直接关系到水稻籽粒灌浆水平^[15,19]。本研究结果表明, 结实期 20 和 40 cm 灌溉深度均降低了水稻产量, 且灌水越深, 产量降幅越大, 结实率和千粒重下降是深水灌溉下水稻减产的主要原因, 而 WD40 处理下每穗颖花数相较 CK 也出现了一定程度下降。南粳 5718 千粒重下降幅度小于徽两优 898。

水稻籽粒灌浆的同化物主要来源于 2 个部分, 其一是抽穗前茎鞘积累的非结构性碳水化合物 (non-structural carbohydrates, NSC), 灌浆启动后 NSC 被分解成可溶性糖, 然后被动员、运输到籽粒中, 这部分约占籽粒灌浆来源物质的 30%^[20]; 本研究发现, 相较常规灌溉方式, 结实期半深水灌溉下水稻成熟期穗干重、茎鞘物质输出量和转运率明显下降, 且茎鞘物质输出率和转运率在 WD40 和 WD20 之间的差异明显大于 WD20 和 CK 之间, 而成熟期茎鞘干重显著高于 CK, 这说明半深水灌溉抑制了茎鞘和叶片干物质向籽粒的转运及利用, 且灌溉深度达 40 cm 时加重了这一效应。其二是抽穗后功能叶片光合作用生产的蔗糖运输到籽粒中, 在一系列酶的作用下合成淀粉和蛋白质, 从而完成粒重的积累^[21]。本研究发现, 抽穗后 35 d 剑叶的 SPAD 值和 P_n 较抽穗后 15 d 明显下降, 表明随着灌浆进行, 水稻叶片逐渐衰老, 叶片光合能力显著下降, 抽穗后 15 d CK 和 WD20 的 SPAD 值和 P_n 无显著差异, 而 WD40 的 P_n 和 G_s 相较 CK 和 WD20 均明显下降, 而在抽穗后 35 d 两个品种在 WD40 下的 P_n 均明显高于 CK 和 WD20, 同时 SPAD 值表现出 WD40 > WD20 > CK 的趋势, 且成熟期半深水灌溉处理下叶片干重较 CK 处理高, 但半深水灌溉下水稻籽粒灌浆和茎鞘转运却明显差于常规灌溉处理, 再结合图 2 中半深水灌溉下水稻植株明显较常规灌溉下更深绿的表型, 说明半深水灌溉下水稻存在明显的“滞绿”现象, 即虽然水稻叶片衰老过慢, 但其虽有较高的光合速率但生产的光合物质却无法被充分转运利用。Zang 等^[22]研究发现, 叶片“滞绿”的水稻籽粒灌浆时淀粉合成相关酶活性明显低于叶片正常衰老的水稻, 导致粒重下降, 这与本研究半深水灌溉下的“叶绿粒轻”的现象相似, 推测库活性不足可能是半深水灌溉下水

稻籽粒灌浆变差的原因。同时期同一灌溉处理下南粳 5718 的 SPAD 值和 P_n 始终高于徽两优 898, 表明南粳 5718 叶片的光合能力强于徽两优 898 且衰老速度更慢, 这可能是南粳 5718 在半深水灌溉下粒重下降幅度相对较小的原因。

水稻颖花根据其着生位置可分为强势粒和弱势粒, 位于上部和一次枝梗上的强势粒相比位于基部和二次枝梗上的弱势粒开花更早, 强势粒通常结实率高、灌浆快且籽粒重, 而弱势粒结实率低、灌浆慢且籽粒轻^[23]。本研究对强势粒和弱势粒灌浆过程分析发现, 半深水灌溉相较常规灌溉并未明显改变水稻强势粒的灌浆启动势, 但明显降低了强势粒的 GR_{max} 和 GR_{mean} , 而弱势粒的灌浆启动势、 GR_{mean} 和 GR_{max} 在 WD20 和 WD40 处理下均明显下降, 虽然半深水灌溉下水稻籽粒活跃灌浆期有所延长, 但不足以弥补灌浆速率下降的损失, 这导致粒重显著下降, 水稻在 40 cm 灌溉下相较 20 cm 灌溉下籽粒灌浆速率进一步下降, 且弱势粒 GR_{mean} 和粒重相较强势粒在半深水灌溉下表现出更大的降幅, 其他研究^[26-28]也发现, 在面对非生物胁迫时弱势粒灌浆往往比强势粒表现差^[24-25], 笔者认为这可能与弱势粒灌浆启动晚、其快速灌浆阶段水稻根系活力已明显下降有关, 因为水稻进入灌浆结实期后就不再长新根, 而长期淹水灌溉下水稻根系缺氧造成大量有毒还原性物质积累、根系活力下降过快, 这导致弱势粒灌浆的动能被进一步削弱。

半深水既是稻渔共作主动采取的灌溉深度, 也可能是水稻生产被动遭遇的场景, 2024 年 8-10 月我国南方地区台风暴雨频发, 而南方水稻正大量处于灌浆结实期^[29], 持续强降雨可能会引发稻田被动处于半深水环境。本研究明确了半深水灌溉对水稻籽粒灌浆和产量具有负面影响, 且灌水越深, 负效应越大, 因此稻渔综合种养应尽可能规避于水稻灌浆结实期进行半深水灌溉, 如确有半深水养殖水产动物的需要, 也应尽可能降低灌溉深度和选择对半深水环境相对钝感的水稻品种。

4 结论

灌浆结实期半深水灌溉降低了水稻结实率、千粒重和产量, 叶片及植株滞绿、光合物质转运利用低、籽粒灌浆不良是结实期半深水灌溉下千粒重、结实率和产量低的重要原因, 灌溉深度增加会进一

步加剧半深水灌溉对水稻籽粒灌浆和产量的负面影响。南粳 5718 较徽两优 898 对半深水灌溉钝感, 弱势粒灌浆较强势粒对半深水灌溉更加敏感。

参考文献

- [1] 全国水产技术推广总站. 中国稻渔综合种养产业发展报告 (2025). 中国水产, 2025(8): 11-17.
- [2] 窦志, 张耀元, 郭威, 等. 稻渔综合种养对土壤和水稻影响的研究进展. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 836-845.
- [3] 许辉, 赵阳阳, 孙东岳, 等. 稻虾共作模式研究进展. 中国农业科技导报, 2022, 24(2): 160-168.
- [4] Kende H, van der Knaap E, Cho H T. Deepwater rice: A model plant to study stem elongation. *Plant Physiology*, 1998, 118(4): 1105-1110.
- [5] 湖北省市场监督管理局. 稻虾共作模式下优质稻机插栽培技术规程: DB42/T 1606-2020. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [6] 江苏省市场监督管理局. 稻虾综合种养技术规范: DB 32/T 4852-2024. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [7] 浙江省市场监督管理局. 稻鱼共生技术规范: DB 33/T 2539-2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [8] 凌启鸿. 水稻精确定量栽培理论与技术. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [9] Yao F X, Huang J L, Cui K H, et al. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*, 2012, 126: 16-22.
- [10] 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 等. 水稻超高产栽培研究与探讨. 中国稻米, 2012, 18(1): 1-14.
- [11] Zhu G, Chen Y, Ella E S, et al. Mechanisms associated with tiller suppression under stagnant flooding in rice. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2019, 205(2): 235-247.
- [12] Mishra A, Salokhe V M. Flooding stress: the effects of planting pattern and water regime on root morphology, physiology and grain yield of rice. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2010, 196(5): 368-378.
- [13] 林贤青, 朱德峰, 李春寿, 等. 水稻不同灌溉方式下的高产生理特性. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 328-332.
- [14] Gao H, Dou Z, Chen L R, et al. Effects of semi-deep water irrigation on hybrid indica rice lodging resistance. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1038129.
- [15] 顾俊荣, 董明辉, 赵步洪, 等. 不同水氮管理对水稻干物质积累和茎鞘物质运转及产量的影响. 核农学报, 2016, 30(2): 347-354.
- [16] 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析. 作物学报, 1988, 14(3): 182-193.
- [17] Norton G J, Shafaei M, Travis A J, et al. Impact of alternate wetting and drying on rice physiology, grain production, and grain quality. *Field Crops Research*, 2017, 205: 1-13.
- [18] 章家恩, 韦生宝, 刘兴, 等. 稻渔综合种养研究进展与展望. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 812-824, 808.
- [19] 刘奇华, 孙召文, 信彩云, 等. 孕穗期施硅对高温下扬花灌浆期水稻干物质转运及产量的影响. 核农学报, 2016, 30(9): 1833-1839.
- [20] 潘俊峰, 李国辉, 崔克辉. 水稻茎鞘非结构性碳水化合物再分配及其在稳产和抗逆中的作用. 中国水稻科学, 2014, 28(4): 335-342.
- [21] Fu J, Huang Z H, Wang Z Q, et al. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice. *Field Crops*

- Research, 2011, 123(2): 170-182.
- [22] Zang Y G, Yao Y J, Xu Z S, et al. The relationships among “STAY-GREEN” trait, post-anthesis assimilate remobilization, and grain yield in rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(22): 13668.
- [23] Yang J C, Zhang J H. Grain-filling problem in ‘super’ rice. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(1): 1-5.
- [24] Tsukaguchi T, Tanaka R, Inoue H, et al. Effects of high temperature and shading on grain abscisic acid content and grain filling pattern in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 2018, 21(4): 407-412.
- [25] Wang X P, Fu J X, Min Z S, et al. Response of rice with overlapping growth stages to water stress by assimilates accumulation and transport and starch synthesis of superior and inferior grains. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(19): 11157.
- [26] 李玉昌, 李阳生, 李绍清. 淹涝胁迫对水稻生长发育危害与耐淹性机理研究的进展. *中国水稻科学*, 1998, 12(增 1): 70-76.
- [27] 赵锋, 王丹英, 徐春梅, 等. 水稻氧营养的生理、生态机制及环境效应研究进展. *中国水稻科学*, 2009, 23(4): 335-341.
- [28] Chu G, Chen T T, Wang Z Q, et al. Reprint of “Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice”. *Field Crops Research*, 2014, 165: 36-48.
- [29] 韩丽娟, 宋迎波, 赵晓凤. 2024 年秋收作物生长季农业气象条件评价. *中国农业气象*, 2025, 46(2): 275-280.

Influence of Semi-Deep Water Irrigation during Grain-Filling Period on Rice Yield, Dry Matter Transportation and Grain-Filling

Guo Wei^{1,2,3}, Sun Dong^{1,2}, Yan Zhilin^{1,2}, Ding Bei^{1,2}, Du Yuechen^{1,2},
Wu Huiyang^{1,2}, Xu Qiang^{1,2,3}, Dou Zhi^{1,2,3}, Gao Hui^{1,2,3}

¹Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, Jiangsu, China;

²Jiangsu High-Quality Japonica Rice Industrial Engineering Research Center, Yangzhou 225009, Jiangsu, China;

³Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

Abstract In recent years, the rapid expansion of integrated rice-fish farming has become an important rice planting system. Many integrated rice-fish farming systems need to form a semi-deep water environment during a certain period of rice planting to meet the needs of aquatic animal growth activities, which is quite different from the conventional shallow wet irrigation method of rice monoculture. In this study, *japonica* conventional rice Nangeng 5718 (NG5718) and *indica* two-line hybrid rice Huiliangyou 898 (HLY898) were used as experimental materials, and three irrigation modes were conducted: conventional shallow wet irrigation (CK); 20 (WD20) and 40 cm (WD40) irrigation depth from heading stage to 40 days after heading. This research investigated the effects of different irrigation depths during grain period on rice yield, dry matter translocation and accumulation, and grain filling. The results showed that, compared with CK, WD20 and WD40 treatments significantly decreased the seed-setting rate and 1000-grain weight of the two test varieties, resulting in a decrease in rice yield. The yield reduction effect of WD40 was significantly greater than that of WD20 treatment, and the yield loss of Huiliangyou 898 was greater than that of Nanjing 5718. The analysis showed that, compared with the CK, the vegetative organs of rice under semi-deep water irrigation showed obvious ‘stay green’ phenomenon. The leaf senescence slowed down but the photosynthetic substances could not be fully transported and utilized. The dry matter transport and grain filling of stem and sheath were significantly worse than those of CK treatment, and the harvest index showed a significant downward trend. The grain filling rate of superior and inferior grains of rice under semi-deep water irrigation was significantly reduced, resulting in a significant decrease in grain weight, and the grain filling of inferior grains was more severely affected.

Key words Rice; Semi-deep water irrigation; Yield; Dry matter transportation; Grain filling