

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.32011

## 栽培优化对长江下游水稻灌浆期根系特征和稻米淀粉特性的影响

吴昊 张瑛 王琛 顾汉柱 周天阳 张伟杨 顾骏飞 刘立军  
杨建昌 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

**摘要:** 为研究不同栽培管理技术下长江下游水稻灌浆期根系特征与稻米淀粉特性的关系, 以甬优 2640、武运粳 24 号、扬稻 6 号和金香玉 1 号品种为材料进行大田试验, 设置氮空白区(0N)、当地常规(对照)、增密减氮、干湿交替灌溉和增施饼肥 5 种栽培模式处理。结果表明, 与当地常规处理(对照)相比, 甬优 2640 在增密减氮、干湿交替灌溉和增施饼肥处理下的产量增幅分别为 6.49%、11.06%和 12.72%, 武运粳 24 号分别增加 1.92%、11.10%和 17.05%, 扬稻 6 号增幅分别为 9.30%、18.50%和 22.89%, 金香玉 1 号产量增幅分别为 6.92%、14.72%和 17.89%。同时我们也观察到随着栽培技术的集成和优化, 根系形态生理特征(根干重、根长、根直径、根系氧化力、根系伤流强度、根系和根系伤流液中玉米素+玉米素核苷含量和根系分泌物中有机酸总量)以及籽粒淀粉合成关键酶(可溶性淀粉合成酶和颗粒结合型淀粉合成酶)活性、淀粉峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度、溶解度和膨胀度逐渐提高。相关分析表明, 灌浆期根系形态生理特征与产量和稻米淀粉特性关系密切。表明栽培技术的集成和优化可能通过调节地下部根系生长来改善稻米品质, 最终实现高产优质高效的目标。

**关键词:** 水稻; 栽培策略; 产量; 米质; 根系特性

## Effects of cultivation optimization on root characteristics and starch properties of rice at grain filling stage in the lower reaches of the Yangtze River

WU Hao, ZHANG Ying, WANG Chen, GU Han-Zhu, ZHOU Tian-Yang, ZHANG Wei-Yang, GU Jun-Fei, LIU Li-Jun, YANG Jian-Chang, and 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, Jiangsu, China

**Abstract:** In order to investigate the relationship between root characteristics and starch properties of rice at grain filling stage in the lower reaches of the Yangtze River under different integrative cultivation practices techniques, field experiments were carried out with Yongyou 2640, Wuyunjing 24, Yangdao 6, and Jinxiangyu 1 as the experimental materials. Five cultivation techniques were set up, including nitrogen blank area (0N), local farmers' practice (control), densification and nitrogen reduction, alternate wetting and drying irrigation and increasing application of rapeseed cake fertilizer. The results showed that compared with the local farmers' practice (control), the yield of Yongyou 2640 under the treatment of densification and nitrogen reduction, alternate wetting and drying irrigation and increasing application of rapeseed cake fertilizer increased by 6.49%, 11.06%, and 12.72%, respectively. The yield of Wuyunjing 24 increased by 1.92%, 11.10%, and 17.05%, respectively. The yield of Yangdao 6 increased by 9.30%, 18.50%, and 22.89%, respectively, and the yield of Jinxiangyu1 increased by 6.92%, 14.72%, and 17.89%, respectively.

本研究由国家自然科学基金项目(32071944, 32272197), 国家重点研发计划项目(2022YFD2300304), 江苏省六大人才高峰高层次人才项目(SWYY-151)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (32071944, 32272197), the National Key Research and Development Program of China (2022YFD2300304), the Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (SWYY-151), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD).

\* 通信作者(Corresponding author): 张耗, E-mail: haozhang@yzu.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: w18205253197@163.com

Received (收稿日期): 2023-03-27; Accepted (接受日期): 2023-08-01; Published online (网络出版日期): 2023-08-07.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20230807.1525.002>

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

At the same time, we also observed that with the integration and optimization of cultivation practices, root morphological and physiological characteristics (root dry weight, root length, root diameter, root oxidation activity, root bleeding intensity, zeatin and zeatin riboside contents in root and root bleeding sap and total organic acid content in exudates), the activity of key enzymes for starch synthesis in grains (soluble starch synthase, granule-bound starch synthase), peak viscosity, hot viscosity, breakdown, final viscosity, solubility and swelling degree gradually increased. Correlation analysis showed that the morphological and physiological characteristics of roots at grain filling stage were closely related to grain yield and starch properties. It indicated that the integration and optimization of cultivation practices might improve rice quality through regulating the growth of underground roots, and finally achieve the goals of high yield, good quality and high efficiency.

**Keywords:** rice; cultivation strategy; yield; grain quality; root characteristics

稻米是中国最主要的粮食作物之一, 中国有一半以上人口以其为主食<sup>[1]</sup>。探索能实现水稻产量和优质协同提高的栽培管理技术, 对实际农业生产具有重要意义。为此, 科学家开发了合理密植、调整肥料运筹、优化灌溉模式和有机肥配施管理等一系列栽培管理模式<sup>[2-9]</sup>。稻米品质由基因和环境共同决定<sup>[10-11]</sup>, 种植密度、施肥和灌溉制度等不同栽培技术, 都会极大地影响稻米品质, 尤其是在水稻灌浆期<sup>[12-13]</sup>。淀粉作为稻米主要组成成分, 决定着稻米的理化特性。研究表明, 稻米胚乳中淀粉的直链淀粉和支链淀粉含量对稻米的食味品质影响较大<sup>[14-15]</sup>。有关栽培优化对稻米淀粉理化结构和性质研究报道较少。

根系作为水稻吸收水分和营养的重要部位, 为地上部生长发育提供基本物质和能量。根系形态生理特征与地上部的生长发育、产量形成密切相关, 尤其是在灌浆期。良好的根系特征能使水稻充分从土壤中吸收养分以满足籽粒灌浆所需<sup>[16-17]</sup>。同时, 根系的功能也会影响稻米品质的形成<sup>[18]</sup>。相关研究表明, 根干重、总根长、根表面积、根直径、根体积与稻米糙米率和蛋白质含量呈显著或极显著正相关<sup>[19]</sup>, 稻米垩白度和垩白粒率与根系活性呈显著负相关<sup>[20]</sup>, 灌浆中后期根系中玉米素和玉米素核苷浓度与稻米蒸煮食味品质密切相关<sup>[21]</sup>。本课题组前期围绕栽培优化重点研究了水稻高产形成的群体质量、水肥利用效率、稻米品质、土壤理化特性等方面, 但关于如何通过栽培技术的整合与优化来改善稻米淀粉特性的研究还较少。

针对上述问题, 本研究以甬优2640、武运粳24、扬稻6号和金香玉1号4个品种为材料, 研究了不同栽培管理措施对其灌浆期根系特征的影响, 并分析了根系特征与产量和稻米淀粉特性的关系, 以期水稻优质高产育种与栽培提供理论依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验品种与试验设计

试验于2019—2020年在扬州大学农学院实验农场进行试验。大田前茬作物为小麦, 土壤质地为沙壤土, 含有机质 24.4 g kg<sup>-1</sup>、碱解氮 106 mg kg<sup>-1</sup>、速效磷 34.5 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾 68.5 mg kg<sup>-1</sup>。2019 年供试品种为籼粳杂交稻甬优 2640 (Yongyou 2640, Y2640)和常规粳稻武运粳 24 (Wuyunjing 24, W24), 5 月 22 日播种, 6 月 12 日移栽; 为验证栽培技术的品种适应性, 2020 年供试品种为常规籼稻扬稻 6 号 (Yangdao 6, YD6)和常规粳稻金香玉 1 号 (Jinxiangyu 1, JXY1), 于 5 月 22 日播种, 6 月 11 日移栽。上述 4 个品种在长江下游均有较大种植面积。设置 5 种栽培措施处理, 每处理重复 3 次。试验采用裂区设计, 以处理为主区, 品种为副区(小区), 小区面积 30 m<sup>2</sup>, 小区间筑埂覆膜防肥水串灌。施磷量(过磷酸钙, 含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 13.5%) 90 kg hm<sup>-2</sup>, 于移栽前作为基肥一次施入。施钾量(氯化钾, 含 K<sub>2</sub>O 63%) 120 kg hm<sup>-2</sup>, 分基肥和拔节肥(促花肥)两次使用, 前后 2 次的比例为 6 : 4。设置 5 种栽培措施处理: (1) 0N: 氮空白区。不施氮肥。栽插株行距为 13.3 cm × 30.0 cm。水分管理方式为常规灌溉(conventional irrigation, CI), 即除生育中期排水搁田外, 其余时期保持水层至收获前一周断水。(2) LFP (local farmers' practice): 当地常规栽培(对照)。总施氮量(纯氮, 下同)为 300 kg hm<sup>-2</sup>, 按基肥(移栽前) 分蘖肥(移栽后 5~7 d) 促花肥(叶龄余数 3.5) 保花肥(叶龄余数 1.2) = 5 : 2 : 1, 栽插株行距为 13.3 cm × 30.0 cm。水分管理方式同 0N 处理, 与当地农户习惯种植相同。(3) ICP1 (integrative cultivation practice 1): 增密减氮。氮肥较 LFP 处理减 10%, 即 270 kg hm<sup>-2</sup>。水分管理方式同 0N 处理。采用以下关键栽培技术: I 增密。栽插株行距为 10.7 cm × 30.0 cm。II 前氮后移。氮肥按基肥(移

栽前) 分蘖肥(移栽后 5~7 d) 促花肥(叶龄余数 3.5) 保花肥(叶龄余数 1.2)=4 2 2 2 施用。(4) ICP2 (integrative cultivation practice 2): 干湿交替灌溉。氮肥较 LFP 处理减 10%, 即  $270 \text{ kg hm}^{-2}$ 。采用以下关键栽培技术: I 增密, 栽插株行距为  $10.7 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ ; II 前氮后移, 同 ICP1; III 干湿交替灌溉 (alternate wetting and drying irrigation, AWD), 即自移栽后 10 d 至成熟期, 自浅水层自然落干至土壤水势 ( $15 \pm 5$ ) kPa ( $15 \sim 20 \text{ cm}$  深), 然后灌  $1 \sim 2 \text{ cm}$  水层, 再落干, 如此循环。在小区安装真空表式土壤负压计监测  $15 \sim 20 \text{ cm}$  深土壤水势。在进水管安装水表用以监测用水量。(5) ICP3 (integrative cultivation practice 3): 增施饼肥栽培。氮肥较 LFP 处理减 10%, 即  $270 \text{ kg hm}^{-2}$ 。采用以下关键栽培技术: I 增密。栽插株行距为  $10.7 \text{ cm} \times 30.0 \text{ cm}$ 。II 前氮后移。同 ICP1。III 干湿交替灌溉。同 ICP2。IV 基肥增施菜籽饼肥(含 N 5%)  $2250 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

## 1.2 测定项目与方法

1.2.1 产量及其构成因素 成熟期按照平均穗数取 10 穴(各个小区), 重复 2 次, 用于理论产量的测定, 并分别考察每穗粒数、结实率和千粒重, 各小区通过实收计产。

1.2.2 根干重、根长、根直径和根冠比 在抽穗开花后第 1 天、第 14 天、第 26 天和第 39 天, 每小区取样 5 穴稻株, 以基部为中心, 挖取  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  的土块, 装于 70 目的筛网袋中, 先用流水冲洗, 然后用农用压缩喷雾器将根冲洗干净, 在  $75^\circ\text{C}$  下烘干至重量恒定, 测定植株地下部根系干重。我们前期研究表明,  $20 \text{ cm}$  土层根系取样基本能代表植株根系真实情况<sup>[22]</sup>。将根依次放在玻璃皿中(盛有一薄层水), 先用扫描仪进行图像扫描, 后用 Win RHIZO 根系分析系统进行分析, 测定根长和根直径, 将部分根烘干至恒重, 测定其干重。根冠比=根干重/地上部干重。

1.2.3 根系氧化力和根系伤流强度及玉米素+玉米素核苷(zeatin + zeatin riboside, Z + ZR)测定 在抽穗开花后第 1 天、第 14 天、第 26 天和第 39 天, 按照上述方法取根, 在测定时期内取部分鲜根用  $\alpha$ -NA 法<sup>[23]</sup>测定水稻根系氧化力。进行伤流液收集前, 将脱脂棉称重, 各小区选取 3 穴, 在距地面处  $12 \text{ cm}$  处剪去地上部植株, 用脱脂棉包裹好茎的剪口, 然后套上塑料薄膜并用皮筋扎紧, 时间统一为  $12 \text{ h}$ , 之后取回脱脂棉并称重, 挤出伤流液测定伤流量。采

用高效液相色谱法(HPLC)测定 Z + ZR 含量<sup>[24]</sup>。

1.2.4 根系分泌物中有机酸总量 在抽穗开花后第 1 天、第 14 天、第 26 天和第 39 天。各处理取样 3 穴植株, 用自来水和蒸馏水洗涤后, 再放入装有去离子水的大烧杯( $800 \text{ mL}$ )内并封上烧杯口部, 每杯放 1 穴。在光下(光强为  $700 \sim 800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 冠层温度  $28 \sim 30^\circ\text{C}$ )培养  $4 \text{ h}$ , 收集烧杯中的溶液, 分别吸取  $10 \mu\text{L}$ , 参照徐国伟等<sup>[25]</sup>的方法用高效液相色谱(HPLC, Waters)测定有机酸总量(苹果酸、酒石酸、琥珀酸、柠檬酸和乳酸)。

1.2.5 淀粉的提取 随机选取  $10 \text{ g}$  的稻米, 磨成米粉, 放入  $50 \text{ mL}$  离心管中, 用 NaOH 溶液和碱性蛋白酶浸泡, 用超纯水洗涤除去离子和杂质, 然后依次用乙醇、氯仿、甲醇和丙酮脱脂, 干燥, 过 200 目筛, 干燥保存备用。

1.2.6 籽粒淀粉合成关键酶活性 在抽穗开花后第 1 天、第 14 天、第 26 天和第 39 天, 各取  $15 \sim 20$  个标记穗, 液氮冷冻。用德国莱奇 RETSCHMM400 混合球磨机充分研磨后, 储存于  $-70^\circ\text{C}$  待测。由苏州科铭生物技术有限公司生产的相关试剂盒测定可溶性淀粉合成酶(soluble starch synthase, SSS)和颗粒结合型淀粉合成酶(granule-bound starch synthase, GBSS)的活性。

1.2.7 淀粉黏滞性特征图谱(RVA) 采用 3-D 型快速黏度分析仪(澳大利亚 Newport Scientific)测定稻米淀粉 RVA 谱, 用 TCW (Thermal Cycle for Windows)配套软件进行分析。

1.2.8 淀粉结晶度(XRD)和淀粉傅里叶红外光谱分布(FTIR) 采用德国 Bruker-AXS 公司生产的 D8 Super Speed 型 X 射线衍射分析仪测定淀粉的 X-射线衍射谱, 用 Jade 6.5 软件作图, 参照陈翠兰等<sup>[26]</sup>进行计算分析淀粉结晶度。参照周天阳<sup>[27]</sup>的方法利用 FTIR 分光光度计进行测定。

1.2.9 淀粉膨胀度与溶解度 准确称取  $35 \text{ mg}$  ( $m_0$ )的淀粉样品放入已称重的离心管( $m_1$ )中, 加入超纯水, 经震荡、水浴离心后, 倒掉上清液称取总质量( $m_2$ ), 烘干后称取总质量( $m_3$ ), 以黏附于离心管上的胶状为其吸水膨胀的质量, 并通过下列公式计算: 溶解的质量  $m_4 = [m_0 - (m_3 - m_1)]$ ; 溶解度(%) =  $m_4/m_1 \times 100$ ; 膨胀度(g/g) =  $(m_2 - m_1)/(m_3 - m_1)$ 。

## 1.3 计算方法与数据分析

氮肥农学利用率( $\text{kg kg}^{-1}$ ) = (施氮区产量-空白区产量)/施氮量; 氮肥吸收利用率(%) = (施氮区地

上部分吸氮量-空白区地上部吸氮量)/施氮量 $\times 100$ ;  
氮肥生理利用率( $\text{kg kg}^{-1}$ ) = (施氮区产量-空白区产量)/(施氮区地上部吸氮量-空白区地上部吸氮量);  
氮肥偏生产力( $\text{kg kg}^{-1}$ ) = 水稻产量/施氮量; 氮素稻  
谷生产率( $\text{kg kg}^{-1}$ ) = 产量/成熟期水稻植株吸氮量。  
本试验所有数据用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS  
27.0 软件进行处理与统计分析, 平均数显著性检验  
采用  $P=0.05$  最小显著极差法(LSD<sub>0.05</sub>), 用 Origin  
2021 和 RStudio (Version 4.2.1)绘图。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

4 个品种的产量变化趋势均为 0N<当地常规

(LFP)<增密减氮(ICP1)<干湿交替灌溉(ICP2)<增施  
饼肥(ICP3)。在 ICP3 处理下甬优 2640、武运粳 24  
号、扬稻 6 号和金香玉 1 号的产量相较于 LFP 处理  
分别增加了 12.72%、17.05%、22.89%和 17.89%。  
与 LFP 相比, ICP1、ICP2 和 ICP3 均增加了各品种的  
结实率和千粒重, 而且各品种产量的提高主要得益  
于总颖花数的增加。上述 3 种栽培处理下, 4 个品种  
总颖花数平均增幅分别为 6.21%、10.89%和 14.21%  
(表 1)。

2.2 灌浆期籽粒淀粉合成关键酶活性

可溶性淀粉合成酶(SSS)活性在灌浆期呈现先  
升高后降低的趋势。甬优 2640 和武运粳 24 号于花  
后 26 d 时达到峰值, 扬稻 6 号和金香玉 1 号于花后

表 1 栽培优化对水稻产量及其构成因素的影响  
Table 1 Effects of cultivation optimization in rice yield and its components

品种 Variety	处理 Treatment	穗数 Number of panicles ( $\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ )	每穗粒数 Spikelets per panicle	总颖花数 Total spikelets ( $\times 10^8 \text{ hm}^{-2}$ )	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield ( $\text{t hm}^{-2}$ )
甬优 2640 Yongyou 2640	0N	125.35 d	254.02 b	3.24 d	90.83 a	24.31 a	7.01 d
	LFP	191.70 c	315.84 a	6.10 c	84.80 b	23.35 a	12.02 c
	ICP1	206.73 b	311.42 a	6.43 b	86.01 b	23.10 a	12.80 b
	ICP2	210.72 ab	308.01 a	6.50 ab	87.61 b	23.52 a	13.35 ab
	ICP3	216.61 a	307.32 a	6.70 a	86.80 b	23.61 a	13.55 a
武运粳 24 Wuyunjing 24	0N	164.80 e	135.50 c	2.22 c	91.91 a	28.82 a	5.93 b
	LFP	257.71 d	167.20 ab	4.31 b	86.52 a	26.50 b	9.91 ab
	ICP1	269.24 c	166.62 ab	4.51 ab	85.20 a	26.51 b	10.10 ab
	ICP2	285.13 b	167.81 a	4.82 ab	86.83 a	26.52 b	11.01 ab
	ICP3	306.61 a	164.53 b	5.04 a	87.11 a	26.52 b	11.60 a
扬稻 6 号 Yangdao 6	0N	138.33 e	176.30 d	2.44 d	91.63 a	30.33 a	6.78 d
	LFP	184.17 d	197.83 a	3.65 c	87.27 ab	29.44 bc	9.35 c
	ICP1	203.49 c	193.52 b	3.94 b	88.72 ab	29.68 bc	10.37 b
	ICP2	213.99 b	191.80 bc	4.10 ab	90.71 a	29.76 b	11.08 a
	ICP3	225.21 a	189.70 c	4.27 a	90.20 a	29.84 b	11.49 a
金香玉 1 号 Jinxiangyu 1	0N	181.67 d	181.97 e	3.31 d	85.43 a	26.45 a	7.47 d
	LFP	242.50 c	205.47 a	4.98 c	79.52 b	25.56 c	10.12 c
	ICP1	262.20 b	203.00 b	5.32 b	79.75 b	25.49 c	10.82 b
	ICP2	278.08 a	201.98 c	5.62 a	80.70 ab	25.62 bc	11.61 a
	ICP3	283.07 a	199.00 d	5.63 a	81.50 ab	25.98 b	11.93 a

方差分析 Analysis of variance

处理 Treatment (T)	**	**	**	NS	NS	**
品种 Variety (V)	**	**	**	*	**	**
处理 $\times$ 品种 T $\times$ V	NS	NS	*	NS	NS	NS

同一栏内标以不同字母的值在 0.05 概率水平差异显著。NS 表示在 0.05 概率水平差异不显著, \* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。0N: 氮空白区; LFP: 当地常规栽培; ICP1: 增密减氮栽培; ICP2: 干湿交替灌溉栽培; ICP3: 增施饼肥栽培。  
Values followed by a different letter within a column are significantly different at the 0.05 probability level. NS means no significant at the 0.05 probability level; \* and \*\* represent significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. 0N: nitrogen blank area; LFP: local farmers' practice; ICP1: the densification and nitrogen reduction; ICP2: the alternate wetting and drying irrigation; ICP3: the increasing application of rapeseed cake fertilizer.

14 d 时达到峰值。0N 处理下 SSS 活性最低, 与 LFP 相比, ICP1、ICP2、ICP3 均显著提高了 SSS 活性。4 个品种变化趋势一致, 甬优 2640 和武运粳 24 号变化幅度大于扬稻 6 号和金香玉 1 号。颗粒结合型淀粉合成酶(GBSS)活性呈现先升高后降低的趋势, 各品种于花后 14 d 时达到峰值。0N 处理下 GBSS 活性

最高, 其余各处理均显著降低 GBSS 活性(图 1)。

2.3 稻米淀粉理化结构和性质

2.3.1 淀粉 RVA 谱特性 与 LFP 相比, 峰值黏度、热浆黏度、崩解值和最终黏度均随单项栽培技术的引入逐渐提高, 增幅度表现为: ICP1<ICP2<ICP3。各品种变化趋势一致(表 2)。

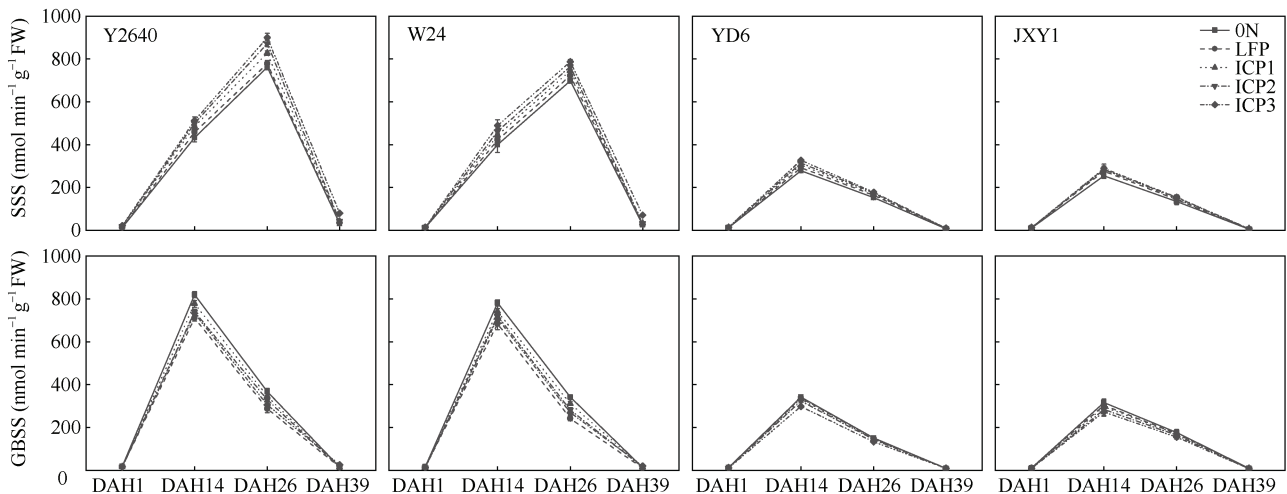


图 1 栽培优化对水稻灌浆期籽粒可溶性淀粉合成酶(SSS)和颗粒结合型淀粉合成酶(GBSS)活性的影响  
Fig. 1 Effects of cultivation optimization on soluble starch synthase (SSS) and granule-bound starch synthase (GBSS) activity at grain filling stage in rice  
DAH1: 抽穗开花第 1 天; DAH14: 抽穗开花第 14 天; DHA26: 抽穗开花第 26 天; DAH39: 抽穗开花第 39 天。Y2640: 甬优 2640; W24: 武运粳 24; YD6: 扬稻 6 号; JXY1: 金香玉 1 号。处理同表 1。  
DAH1: the first day after heading; DAH14: 14 days after heading; DHA26: 26 days after heading; DAH39: 39 days after heading. Y2640: Yongyou 2640; W24: Wuyunjing 24; YD6: Yangdao 6; JXY1: Jinxiangyu 1. Treatments are the same as those given in Table 1.

表 2 栽培优化对稻米淀粉 RVA 谱特性的影响  
Table 2 Effects of cultivation optimization on RVA characteristics of rice starch

品种 Variety	处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity (cP)	热浆黏度 Hot viscosity (cP)	崩解值 Breakdown (cP)	最终黏度 Final viscosity (cP)	消减值 Setback (cP)	峰值时间 Peak time (min)	糊化温度 Pasting temperature (°C)
甬优 2640 Yongyou 2640	0N	2696 a	2095 a	600.67 a	2897 a	200.67 c	6.61 e	72.87 d
	LFP	2126 e	1710 d	416.00 d	2399 e	273.00 a	6.79 a	75.89 a
	ICP1	2202 d	1733 cd	469.00 c	2457 cd	255.33 b	6.73 b	74.87 b
	ICP2	2238 c	1752 c	486.33 bc	2484 c	246.00 bc	6.71 c	74.60 b
	ICP3	2293 b	1796 c	497.00 b	2536 b	243.67 bc	6.68 d	74.22 c
武运粳 24 号 Wuyunjing 24	0N	2970 a	2174 a	796.67 a	3106 a	135.67 d	6.57 e	71.42 e
	LFP	2149 e	1695 d	453.33 c	2447 e	298.33 a	6.74 a	74.26 a
	ICP1	2331 d	1706 d	625.00 bc	2580 d	249.33 b	6.69 b	73.26 b
	ICP2	2418 c	1785 c	633.67 bc	2656 c	237.67 bc	6.66 c	72.88 c
	ICP3	2542 b	1896 b	646.00 b	2766 b	224.33 c	6.64 d	72.67 d
扬稻 6 号 Yangdao 6	0N	2527 a	1884 a	457.65 a	2655 a	187.45 d	6.37 d	71.63 d
	LFP	2152 d	1421 d	385.30 c	2229 d	275.00 a	6.64 a	73.52 a
	ICP1	2224 c	1464 c	427.55 b	2356 c	242.00 b	6.60 b	72.88 b
	ICP2	2239 c	1494 c	428.35 b	2361 c	230.00 b	6.55 b	72.25 c
	ICP3	2287 b	1523 b	419.20 a	2540 b	216.20 c	6.46 c	72.18 c

(续表 2)

品种 Variety	处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity (cP)	热浆黏度 Hot viscosity (cP)	崩解值 Breakdown (cP)	最终黏度 Final viscosity (cP)	消减值 Setback (cP)	峰值时间 Peak time (min)	糊化温度 Pasting temperature (°C)
金香玉 1 号 Jinxiangyu 1	0N	2849 a	2332 a	656.30 a	2886 a	296.70 d	6.12 d	70.25 d
	LFP	2207 d	1651 d	564.30 d	2465 d	367.00 a	6.44 a	72.65 a
	ICP1	2255 c	1688 c	572.25 cd	2558 c	343.70 b	6.37 b	72.32 b
	ICP2	2310 c	1725 c	587.60 c	2570 c	336.40 c	6.31 b	72.26 c
	ICP3	2421 b	1825 b	618.00 b	2638 b	332.35 c	6.26 c	72.18 c

同一栏内标以不同字母的值在 0.05 概率水平差异显著。处理同表 1。  
Values followed by a different letter within a column are significantly different at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

2.3.2 淀粉结晶度和傅里叶红外光谱分布 在各个栽培处理下的淀粉衍射图谱都呈现 A 型淀粉的典型特征, 在 15 度和 23 度处有较强的衍射单峰, 在 17 度和 18 度处有较强的衍射双峰, 且趋势保持一致(图 2)。0N 处理的淀粉衍射强度最低, LFP 处理的淀粉衍射强度最高, 增密减氮、干湿交替灌溉、增施饼肥处理衍射强度不断降低。随着单项栽培技术的引入, 淀粉相对结晶度也逐渐降低(表 3)。表明栽培技术不会改变淀粉的晶型, 但可以改变淀粉晶体结晶度。由图 3 可知, 不同处理间相对吸光度峰强度变化趋势与 XRD 衍射图谱中峰强度变化趋势相似,

均表现为 LFP 最高, 随着单项栽培技术的引入, 峰强逐渐降低。与 LFP 相比, ICP1、ICP2 和 ICP3 处理下的 1045/1022  $\text{cm}^{-1}$  峰强度之比显著降低, 1022/995  $\text{cm}^{-1}$  峰强度之比显著增加。表明优化栽培技术可以提高淀粉无序结构, 从而降低了淀粉的有序度(表 3)。  
2.3.3 淀粉溶解度与膨胀度 与 LFP 相比, 不同栽培处理下淀粉溶解度与膨胀度呈现不断升高的趋势, 4 个品种趋势一致。与 LFP 相比, ICP1、ICP2、ICP3 处理下的淀粉溶解度平均增幅为 6.35%、13.29% 和 18.65%, 膨胀度的平均增幅分别为 8.21%、12.84% 和 18.95% (图 4)。

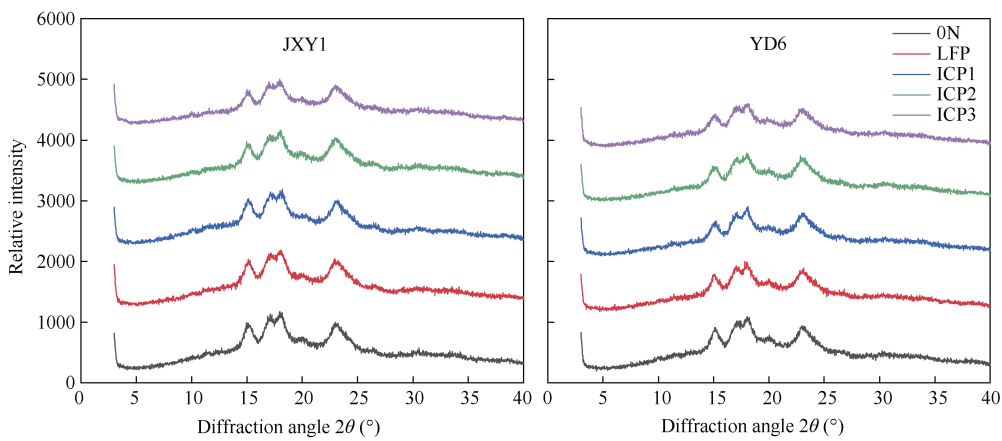


图 2 栽培优化对稻米淀粉 XRD 衍射图谱的影响  
Fig. 2 Effects of cultivation optimization on XRD patterns of rice starch  
处理同表 1。品种缩写同图 1。

Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations for the varieties are the same as those given in Fig. 1.

表 3 栽培优化对稻米淀粉的相对结晶度与 IR 值的影响  
Table 3 Effects of cultivation optimization on relative crystallinity and IR ratio of rice starch

品种 Variety	处理 Treatment	相对结晶度 Relative crystallinity (%)	IR ratio	
			1045/1022 $\text{cm}^{-1}$	1022/995 $\text{cm}^{-1}$
扬稻 6 号 Yangdao 6	0N	23.8 c	0.58 e	1.30 a
	LFP	27.9 a	0.65 a	1.08 e
	ICP1	26.3 b	0.63 b	1.15 d
	ICP2	25.7 b	0.61 c	1.20 c

(续表 3)

品种 Variety	处理 Treatment	相对结晶度 Relative crystallinity (%)	IR ratio	
			1045/1022 $\text{cm}^{-1}$	1022/995 $\text{cm}^{-1}$
金香玉 1 号 Jinxiangyu 1	ICP3	25.14 b	0.59 d	1.24 b
	0N	21.8 c	0.52 e	1.28 a
	LFP	29.4 a	0.62 a	1.04 e
	ICP1	25.8 b	0.59 b	1.12 d
	ICP2	25.6 b	0.56 c	1.16 c
	ICP3	25.6 a	0.54 d	1.22 b

同一栏内标以不同字母的值在 0.05 概率水平差异显著。处理同表 1。  
Values followed by a different letter within a column are significantly different at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

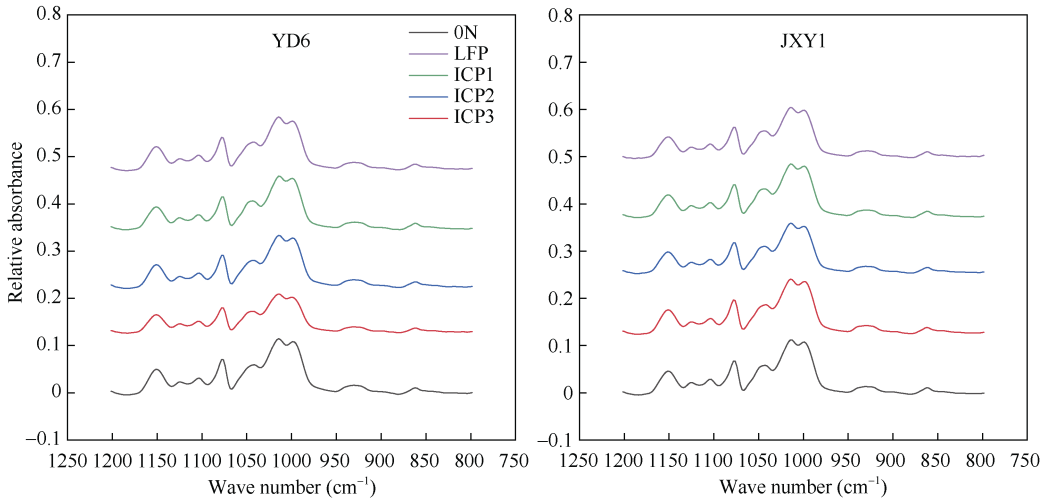


图 3 栽培优化对稻米淀粉 FTIR 图谱的影响  
Fig. 3 Effects of cultivation optimization on FTIR spectra of rice starch  
处理同表 1。品种缩写同图 1。

Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations for the varieties are the same as those given in Fig. 1.

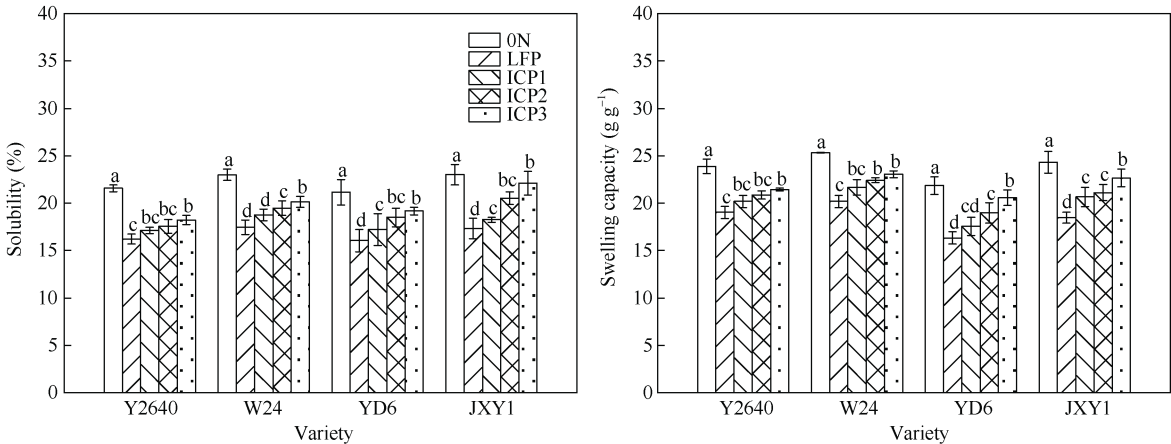


图 4 栽培优化对淀粉溶解度和膨胀度的影响  
Fig. 4 Effects of cultivation optimization on starch solubility and swelling capacity  
图柱上不同字母表示经 LSD 检验同一时期不同处理间在 0.05 概率水平差异显著。处理同表 1。品种缩写同图 1。  
Different letters on the column indicate significant difference between different treatments in the same stage at the 0.05 probability level by LSD test. Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations for the varieties are the same as those given in Fig. 1.



## 2.4 灌浆期根系形态与生理特征

**2.4.1 根干重和根冠比** 由图 5 可知, 在灌浆期各处理下根干重表现为  $0N < LFP < ICP1 < ICP2 < ICP3$ 。品种之间变化趋势一致。与 LFP 相比, ICP1、ICP2 和 ICP3 处理下甬优 2640 根干重分别增加 4.23%、7.18% 和 9.46%; 武运粳 24 号根干重分别增加 1.25%、4.4% 和 6.95%; 扬稻 6 号根干重分别增加 23.75%、24.99% 和 38.16%; 金香玉 1 号根干重分别

增加 29.29%、34.67% 和 44.91%。4 个品种根冠比变化表现均为  $0N > LFP > ICP1 > ICP2 > ICP3$ 。与 LFP 相比, ICP1、ICP2 和 ICP3 处理下甬优 2640 和武运粳 24 号根冠比略有下降, 处理间差异不显著; 扬稻 6 号根冠比分别下降 33.91%、48.76% 和 46.57%; 金香玉 1 号根冠比分别下降 3.45%、20.23% 和 22.41%。表明单项栽培技术的引入逐步提高了灌浆期水稻根干重, 降低了根冠比。

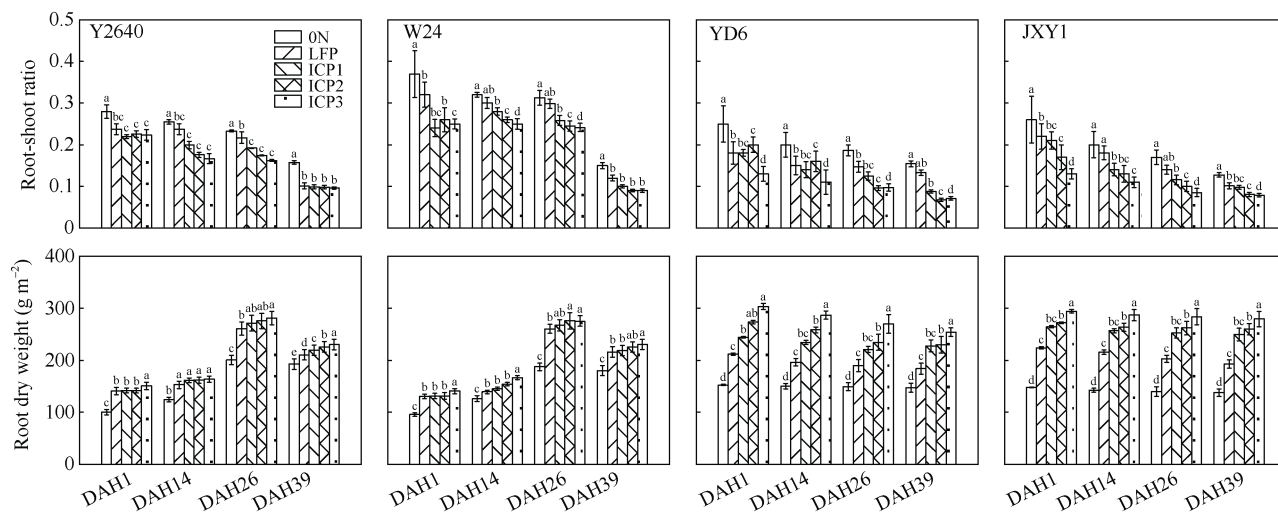


图 5 栽培优化对水稻灌浆期根冠比和根干重的影响

Fig. 5 Effects of cultivation optimization on root-shoot ratio and root dry weight of rice at grain filling stage

DAH1: 抽穗开花第 1 天; DAH14: 抽穗开花第 14 天; DAH26: 抽穗开花第 26 天; DAH39: 抽穗开花第 39 天。图柱上不同字母表示经 LSD 检验同一时期不同处理间在 0.05 概率水平差异显著。处理同表 1。品种缩写同图 1。

DAH1: the first day after heading; DAH14: 14 days after heading; DAH26: 26 days after heading; DAH39: 39 days after heading. Different letters on the column indicate significant difference between different treatments in the same stage at the 0.05 probability level by LSD test. Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations for the varieties are the same as those given in Fig. 1.

**2.4.2 根长和根直径** 随着单项栽培技术的引入, 灌浆期 4 个品种根长和根直径不断增大。甬优 2640 和武运粳 24 号根长随着灌浆进程呈先增后减的趋势, 扬稻 6 号和金香玉 1 号根长不断减小, 花后第 39 天各品种除 0N 处理外, 各处理间差异不显著。4 个品种中, 同一处理下甬优 2640 根直径最大(图 6)。

**2.4.3 根系氧化力和根系伤流强度** 灌浆期不同品种根系氧化力和根系伤流强度均表现为  $0N < LFP < ICP1 < ICP2 < ICP3$ , 各处理间差异显著(图 7)。

**2.4.4 根系和根系伤流液中 Z + ZR 含量** 由图 8 可知, 随着单项栽培技术的引入, 灌浆期根系中 Z + ZR 含量显著增大, 根系伤流液中 Z + ZR 含量变化趋势与根系中一致, 均为  $0N < LFP < ICP1 < ICP2 < ICP3$ , 各品种变化趋势一致。

**2.4.5 根系分泌物中有机酸总量** 由图 9 可知,

与 LFP 相比, 在 ICP1、ICP2、ICP3 处理下根系分泌物中有机酸总量逐渐增大, 且在灌浆期与其他处理相比 ICP3 处理降幅最大, 扬稻 6 号的降幅为 64.53%, 金香玉 1 号的降幅为 60.82%。各品种变化趋势一致。

## 2.5 相关性分析

相关分析表明, 灌浆期根系形态生理特征与产量和稻米淀粉特性关系密切。灌浆期根系形态生理特征(根干重、根长、根直径、根系氧化力、根系伤流强度、根系和根系伤流液中 Z + ZR 含量和根系分泌物中有机酸总量)与产量呈显著或极显著正相关。稻米相对结晶度与根系形态生理特征呈显著或极显著正相关; 峰值黏度、热浆黏度、崩解值和最终黏度与根系形态生理特征呈负相关关系。SSS 与根系形态生理特征呈显著或极显著正相关, GBSS 与根系形态生理特征呈显著或极显著负相关(图 10)。



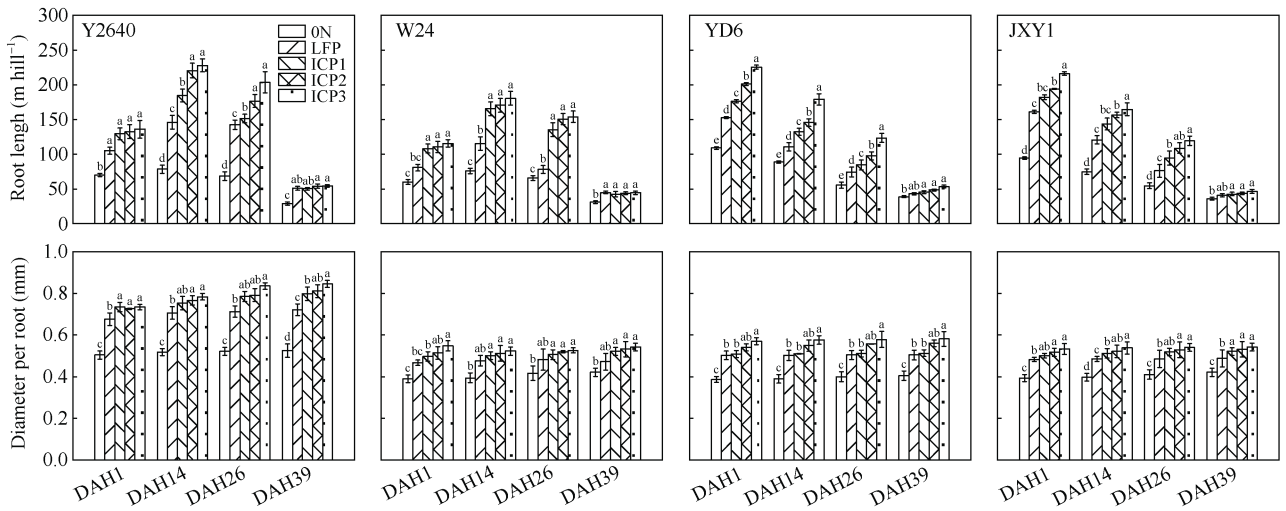


图 6 栽培优化对水稻灌浆期根长和根直径的影响

Fig. 6 Effects of cultivation optimization on root length and root diameter of rice at grain filling stage

DAH1: 抽穗开花第 1 天; DAH14: 抽穗开花第 14 天; DHA26: 抽穗开花第 26 天; DAH39: 抽穗开花第 39 天。图柱上不同字母表示经 LSD 检验同一时期不同处理间在 0.05 概率水平差异显著。处理同表 1。品种缩写同图 1。

DAH1: the first day after heading; DAH14: 14 days after heading; DHA26: 26 days after heading; DAH39: 39 days after heading. Different letters on the column indicate significant difference between different treatments in the same stage at the 0.05 probability level by LSD test. Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations for the varieties are the same as those given in Fig. 1.

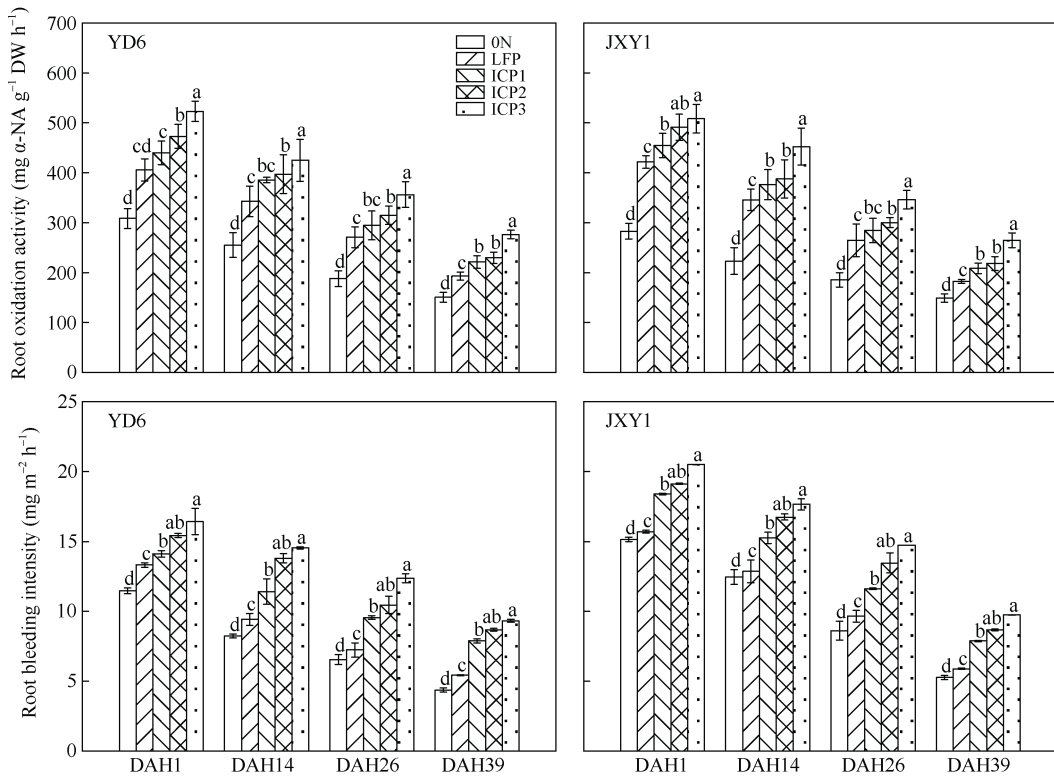


图 7 栽培优化对水稻灌浆期根系氧化力和根系伤流强度的影响

Fig. 7 Effects of cultivation optimization on root oxidation activity and root bleeding intensity of rice at grain filling stage

DAH1: 抽穗开花第 1 天; DAH14: 抽穗开花第 14 天; DHA26: 抽穗开花第 26 天; DAH39: 抽穗开花第 39 天。图柱上不同字母表示经 LSD 检验同一时期不同处理间在 0.05 概率水平差异显著。处理同表 1。品种缩写同图 1。

DAH1: the first day after heading; DAH14: 14 days after heading; DHA26: 26 days after heading; DAH39: 39 days after heading. Different letters on the column indicate significant difference between different treatments in the same stage at the 0.05 probability level by LSD test. Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations for the varieties are the same as those given in Fig. 1.

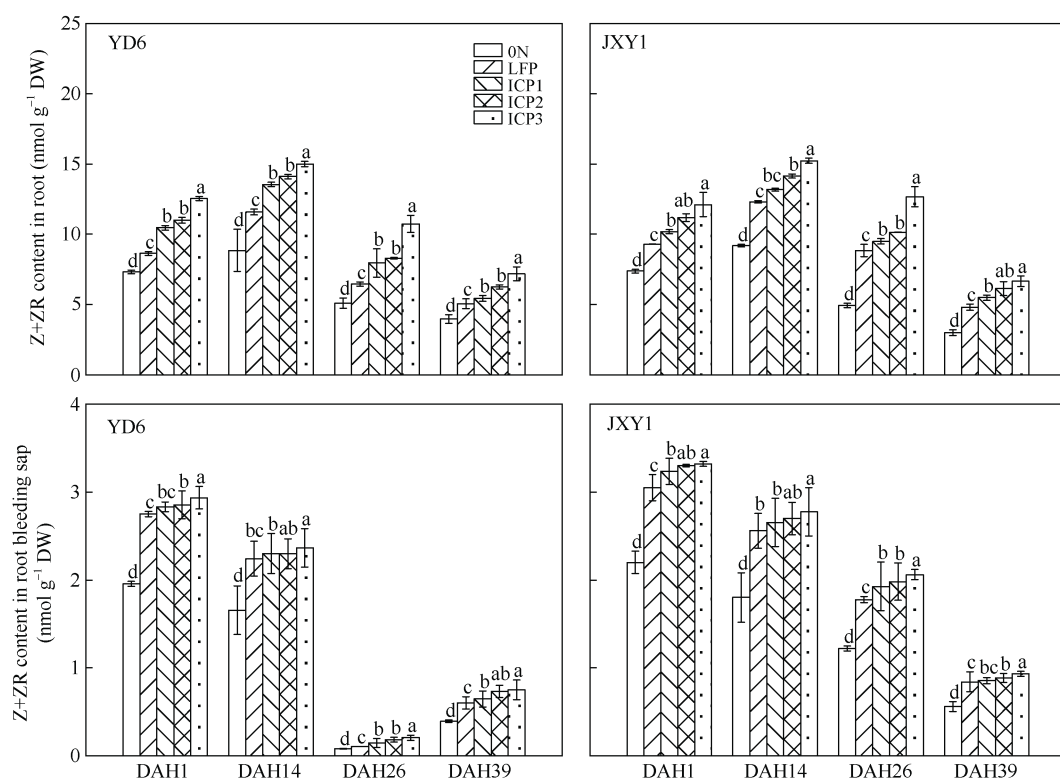


图 8 栽培优化对水稻灌浆期根系和根系伤流液中 Z + ZR 含量的影响

**Fig. 8 Effects of cultivation optimization on Z + ZR contents in roots and root bleeding sap of rice at grain filling stage**

DAH1: 抽穗开花第 1 天; DAH14: 抽穗开花第 14 天; DHA26: 抽穗开花第 26 天; DAH39: 抽穗开花第 39 天。图柱上不同字母表示经 LSD 检验同一时期不同处理间在 0.05 概率水平差异显著。处理同表 1。

DAH1: the first day after heading; DAH14: 14 days after heading; DHA26: 26 days after heading; DAH39: 39 days after heading. Different letters on the column indicate significant difference between different treatments in the same stage at the 0.05 probability level by LSD test. Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations for the varieties are the same as those given in Fig. 1.

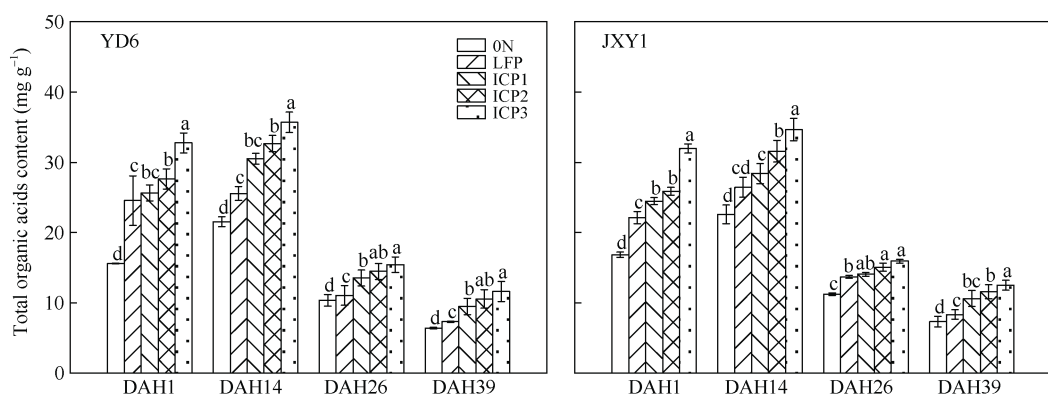


图 9 栽培优化对水稻灌浆期根系分泌物中有机酸总量的影响

**Fig. 9 Effects of cultivation optimization on total organic acids in root exudates of rice at grain filling stage**

DAH1: 抽穗开花第 1 天; DAH14: 抽穗开花第 14 天; DHA26: 抽穗开花第 26 天; DAH39: 抽穗开花第 39 天。图柱上不同字母表示经 LSD 检验同一时期不同处理间在 0.05 概率水平差异显著。处理同表 1。

DAH1: the first day after heading; DAH14: 14 days after heading; DHA26: 26 days after heading; DAH39: 39 days after heading. Different letters on the column indicate significant difference between different treatments in the same stage at the 0.05 probability level by LSD test. Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations for the varieties are the same as those given in Fig. 1.

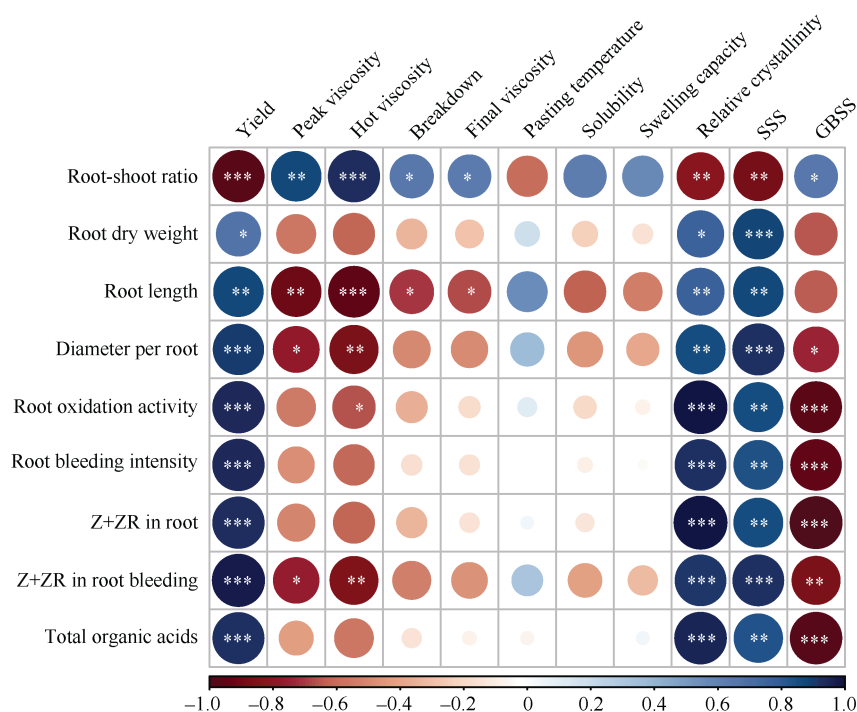


图 10 根系特征和产量及稻米品质的相关性分析

Fig. 10 Correlation of root characteristics with yield and grain quality

SSS: 可溶性淀粉合成酶; GBSS: 颗粒结合型淀粉合成酶。\*, \*\*和\*\*\*分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 概率水平差异显著。

SSS: soluble starch synthase; GBSS: granule-bound starch synthase. \*, \*\*, and \*\*\* indicate significant differences at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

### 3 讨论

#### 3.1 优化栽培技术下水稻产量及灌浆期根系特征

与常规栽培技术相比,适当增密减氮有利于协调改善水稻群体结构,通过大幅度提高有效穗数从而增加了群体颖花量<sup>[28]</sup>,干湿交替灌溉处理在协调根系生长的同时还能提高水稻吸氮量,并且干湿交替灌溉处理下的每穗粒数、结实率和千粒重也能得到协同提高<sup>[29]</sup>,合理的有机肥和化肥配施可通过提高水稻有效穗数和每穗实粒数实现增产<sup>[30]</sup>。在本研究中随着单项栽培技术的引入,在不同程度上提高了水稻产量,对总颖花数的提高效果更明显。本研究设计的目的之一是检验栽培技术的品种适应性,在 2 年试验中选择了不同的水稻品种,没有对品种在不同年份的响应进行分析。

我们以往的研究已经证实,在气象条件相对一致的年份,在相同栽培优化处理下甬优 2640、武运粳 24、扬稻 6 号和金香玉 1 号的产量及构成因素在年度间无显著差异<sup>[31-33]</sup>,因此在年度间气象条件相对一致时我们推测本研究中在相同栽培处理下供试品种的产量表现在年度间无显著差异,可通过试验进一步验证。本研究中选择了有代表性的籼粳杂交

稻、常规籼稻和粳稻,在集成和优化栽培技术下均具有良好的高产表现(籼粳杂交稻:产量 $>13 \text{ t hm}^{-2}$ ;常规粳稻:产量 $>11.3 \text{ t hm}^{-2}$ ;常规籼稻:产量 $>11 \text{ t hm}^{-2}$ ),说明该技术体系的品种适应性好,应用前景广阔。

有研究发现,干湿交替灌溉显著增加水稻的根干重、根冠比、根长和根直径,可显著改善根系构型,促进根系生长发育<sup>[34-35]</sup>;前氮后移能提高水稻根系活力,提高水稻根系吸氮能力<sup>[36]</sup>;合理密植有利于根系生长,增大根系吸收表面积,进而提高吸氮量<sup>[37]</sup>;施用有机肥能够显著促进根系的生长发育并能补充土壤养分,增加根系在土壤中的分布,增大总根长、总表面积和总体积<sup>[38]</sup>。本研究表明,与 LFP 相比,水稻根长和根直径在 ICP2 和 ICP3 处理下的效果更好,同时,我们还观察到甬优 2640 和武运粳 24 号根长随着灌浆进程呈先增后减的趋势,扬稻 6 号和金香玉 1 号根长不断减小,而且在这 4 个品种中同一处理下甬优 2640 根直径最大。说明通过栽培技术的集成和优化可以改善水稻根系形态特征,有利于实现高产高效。

相关研究表明,施用有机肥可以促进根系生长,增大根系伤流液量以及根系分泌物中有机酸总量,

改善土壤的透气性,从而增强根系对土壤养分的吸收和利用<sup>[39-40]</sup>;干湿交替灌溉处理能提高水稻灌浆期根系氧化力,促进根系吸收土壤养分<sup>[41]</sup>;与传统栽培方式相比,增密减氮可显著提高根系伤流液强度、根系伤流液中可溶性糖和游离氨基酸含量<sup>[42]</sup>。本研究发现,随着单项栽培技术的引入,水稻灌浆期根系氧化力、根系伤流强度和根系中Z+ZR含量显著增加。与LFP相比,ICP3处理提高程度更为显著,表明通过栽培技术的集成和优化能提高水稻根系活力,从而进一步改善根系吸水与吸肥能力,为地上部生长提供支撑。

### 3.2 优化栽培技术下稻米淀粉特性

氮肥的施用量和适宜的施肥时间都会影响稻米的蛋白质含量和淀粉特性<sup>[43-44]</sup>,齐穗期氮肥可增加水稻籽粒中蛋白质含量,降低直链淀粉含量,提高水稻产量<sup>[45]</sup>。不同种类的肥料对产量和稻米品质有不同的影响,在籽粒灌浆过程中,有机肥的腐熟程度最高,可全面提供稻米生殖生长所必需的养分,降低垩白率和直链淀粉含量,提高蛋白质含量,在一定程度上改善稻米品质<sup>[46]</sup>。适当的干湿交替灌溉处理能提高稻米胶稠度和崩解值,减小消减值,进而改善稻米的蒸煮食味品质<sup>[47]</sup>。在本研究中,与LFP相比,不同栽培模式能改善淀粉RVA谱特性,ICP2处理下稻米消减值、峰值时间和糊化温度显著降低,热浆黏度、峰值黏度和崩解值显著增加。淀粉相对结晶度在一定程度上反映了淀粉颗粒中结晶区和非结晶区的分布变化,是表征淀粉颗粒结晶性质的重要参数。淀粉的晶体结构被破坏后,直链和支链淀粉结构发生变化与水分子结合,导致淀粉溶解。在FTIR中 $1045/1022\text{ cm}^{-1}$ 和 $1022/995\text{ cm}^{-1}$ 的峰强之比具有重要作用,FTIR主要与淀粉颗粒外部区域的短程有序结构有关。 $1045/1022\text{ cm}^{-1}$ 峰强之比表征了淀粉粒外围区域内的有序结构含量,而 $1022/995\text{ cm}^{-1}$ 峰强度之比表征外围的不定型结构中淀粉粒的相对位置变化规律。本研究观察到,与LFP相比,ICP3处理的淀粉XRD衍射曲线强度、相对结晶度显著降低,淀粉溶解度和膨胀度显著增加,影响淀粉的糊化特性。表明可通过整合和优化栽培技术来改善稻米淀粉特性,从而进一步提高米质。

### 3.3 灌浆期根系特征与稻米淀粉特性的关系

根系形态和生理特征可通过影响水稻地上部发育和籽粒灌浆过程而影响稻米品质<sup>[48]</sup>。籽粒灌浆过程

中较大的根长、根直径是地上部吸收水分、养分和合成激素的重要动力,较小的根冠比表明根系吸收的养分大部分转运至地上部用于籽粒淀粉合成<sup>[49-50]</sup>,这与本研究结果一致。杨建昌等观察到,灌浆中后期根系伤流液中的1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC,乙烯释放前体)浓度与稻米的垩白度和垩白大小呈显著正相关,籽粒中ACC浓度高,稻米胚乳淀粉体相互间隙较大,排列疏松从而产生垩白<sup>[51]</sup>。根系活力和根系分泌物等根系特征是影响籽粒灌浆和结实的重要因素。抽穗后10~20 d是根系活力和籽粒灌浆速率变化最明显的时期,前期较高的根系活力有利于地上部生长,上三叶光合速率高,则向籽粒运输的光合物质充足,籽粒灌浆速率快<sup>[52]</sup>。研究表明,根系激素对水稻胚乳细胞的数量和分裂速度起重要作用,而胚乳细胞的分裂和生长对稻米品质有一定的影响<sup>[53-54]</sup>,根系分泌物中酒石酸、柠檬酸和氨基酸含量与稻米外观品质呈显著或极显著负相关,苹果酸和草酸含量与稻米外观品质呈显著或极显著正相关<sup>[55]</sup>。目前大量研究报道根系特征与稻米品质密切相关<sup>[18-21,48-56]</sup>,我们的相关分析也证实了上述观点,本研究对供试品种的大部分淀粉理化特性指标进行了测定和分析,但是对反映稻米淀粉颗粒晶体特性的指标(XRD衍射图谱、FTIR图谱、相对结晶度),仅分析了2个品种,并对其中的相对结晶度与根系特征进行了相关分析,因本研究数据量有限还需进行深入分析。我们观察到灌浆期根系氧化力、根系伤流强度、根系分泌物中有机酸总量与淀粉相对结晶度呈显著或极显著正相关,根系中较高含量的Z+ZR能运输至地上部促进水稻籽粒胚乳细胞分裂,调控籽粒淀粉合成关键酶活性,加速籽粒灌浆,从而可以提高结实率和粒重。表明良好的根系特征可能会促进籽粒淀粉合成、改善淀粉理化特性。

## 4 结论

与当地常规栽培相比,通过优化栽培管理措施,主要技术包括适当增密、适当减氮、前氮后移、干湿交替灌溉技术和增施饼肥,可在提高水稻产量的同时改善稻米淀粉特性。灌浆期根系形态(根干重、根冠比、根长和根直径)和生理特征(根系氧化力、根系伤流强度、根系和根系伤流液中玉米素+玉米素核苷含量和根系分泌物中有机酸总量)的提高可能是改善水稻籽粒淀粉特性的重要途径。

## References

- [1] Fu Y Y, Gu Q Q, Dong Q, Zhang Z H, Lin C, Hu W M, Pan R H, Guan Y J, Hu J. Spermidine enhances heat tolerance of rice seeds by modulating endogenous starch and polyamine metabolism. *Molecules*, 2019, 24: 1395.
- [2] 陈海飞, 冯洋, 蔡红梅, 徐芳森, 周卫, 刘芳, 庞再明, 李登荣. 氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20: 1319–1328.  
Chen H F, Feng Y, Cai H M, Xu F S, Zhou W, Liu F, Pang Z M, Li D R. Effect of the interaction of nitrogen and transplanting density on the rice population structure and grain yield in low-yield paddy fields. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20: 1319–1328 (in Chinese with English abstract).
- [3] Carrijo D R, Lundy M E, Linquist B A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: a meta-analysis. *Field Crops Res*, 2017, 203: 173–180.
- [4] 董明辉, 陈培峰, 顾俊荣, 乔中英, 黄萌, 朱赞德, 赵步洪. 麦秸还田和氮肥运筹对超级杂交稻茎鞘物质运转与籽粒灌浆特性的影响. *作物学报*, 2013, 39: 673–681.  
Dong M H, Chen P F, Gu J R, Qiao Z Y, Huang M, Zhu Y D, Zhao B H. Effects of wheat straw-residue applied to field and nitrogen management on photosynthate transportation of stem and sheath and grain-filling characteristics in super hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 673–681 (in Chinese with English abstract).
- [5] Zhu C H, Ou-yang Y Y, Diao Y, Yu J Q, Luo X, Zheng J G, Li X Y. Effects of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer rate and type on rice yield and nitrogen use efficiency in Chuanxi Plain, China. *J Integr Agric*, 2021, 20: 581–592.
- [6] Raquel S A, Buyung A F, Sholih N H, Hayat U, Avishek D. Nitrogen fertilizer and establishment method affect growth, yield and nitrogen use efficiency of rice under alternate wetting and drying irrigation. *Annu Appl Biol*, 2020, 176: 314–327.
- [7] Chong H T, Jiang Z Y, Shang L Y, Shang C, Deng J, Zhang Y B, Huang L Y. Dense planting with reduced nitrogen input improves grain yield, protein quality, and resource use efficiency in hybrid rice. *J Plant Growth Regul*, 2022, 42: 960–972.
- [8] Fu Y Q, Zhong X H, Zeng J H, Liang K M, Pan J F, Xin Y F, Liu Y Z, Hu X Y, Peng B L, Chen R B, Hu R, Huang N R. Improving grain yield, nitrogen use efficiency and radiation use efficiency by dense planting, with delayed and reduced nitrogen application, in double cropping rice in South China. *J Integr Agric*, 2021, 20: 565–580.
- [9] Zhao G, Miao Y, Wang H, Su M, Fan M, Zhang F, Jiang R, Zhang Z, Liu C, Liu P, Ma D. A preliminary precision rice management system for increasing both grain yield and nitrogen use efficiency. *Field Crops Res*, 2013, 154: 23–30.
- [10] Mao T, Li X, Jiang S K, Tang L, Wang J Y, Xu H, Xu Z J. Discussion on strategy of grain quality improvement for super high yielding japonica rice in Northeast China. *J Integr Agric*, 2017, 16: 1075–1083.
- [11] Dou Z, Tang S, Li G H, Liu Z H, Ding C Q, Chen L, Wang S H, Ding Y F. Application of nitrogen fertilizer at heading stage improves rice quality under elevated temperature during grain-filling stage. *Crop Sci*, 2017, 57: 2183–2192.
- [12] 严凯, 蒋玉兰, 唐纪元, 戴其根. 盐碱地条件下施氮量和栽插密度对水稻产量和品质的影响. *中国土壤与肥料*, 2018, (2): 67–74.  
Yan K, Jiang Y L, Tang J Y, Dai Q G. Effects of nitrogen fertilizer rate and transplanting density on yield and grain quality of rice on saline-alkaline land. *Soil Fert Sci China*, 2018, (2): 67–74 (in Chinese with English abstract).
- [13] Zhao Y F, Ran X, Yin T Y, Guo H, Zhang X Y, Shen Y Y, Liu W Z, Ding Y F, Tang S. Nitrogen alleviated the deterioration of rice quality by affecting the accumulation of grain storage protein under elevated temperature. *J Plant Growth Regul*, 2022, 42: 3388–3404.
- [14] Burrell M M. Starch: the need for improved quality or quantity—an overview. *J Exp Bot*, 2003, 54: 451–456.
- [15] Perez Herrera M, Vasanthan T, Hoover R. Characterization of maize starch nanoparticles prepared by acid hydrolysis. *Cereal Chem*, 2016, 93: 323–330.
- [16] Xie X B, Quintana M R, Sandhu N, Subedi S R, Zou Y B, Rutkoski J E, Henry A. Establishment method affects rice root plasticity in response to drought and its relationship with grain yield stability. *J Exp Bot*, 2021, 72: 5208–5220.
- [17] Zhang Y J, Xu J N, Cheng Y D, Wang C, Liu G S, Yang J C. The effects of water and nitrogen on the roots and yield of upland and paddy rice. *J Integr Agric*, 2020, 19: 1363–1374.
- [18] Yang J C, Zhang H, Zhang J H. Root morphology and physiology in relation to the yield formation of rice. *J Integr Agric*, 2012, 11: 920–926.
- [19] Yan F J, Sun Y J, Xu H, Yin Y Z, Wang H Y, Wang C Y, Guo C C, Yang Z Y, Sun Y Y, Ma J. Effects of wheat straw mulch application and nitrogen management on rice root growth, dry matter accumulation and rice quality in soils of different fertility. *Paddy Water Environ*, 2018, 16: 507–518.
- [20] 钟旭华, 黄农荣. 水稻结实期根系活性与稻米垩白形成的相关性初步研究. *中国水稻科学*, 2005, 19: 471–474.  
Zhong X H, Huang N R. Preliminary study on the relationship between rice grain chalkiness and root activity at grain-filling stage. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19: 471–474 (in Chinese with English abstract).
- [21] Yang J C, Chang E H, Zhang W J, Wang Z Q, Liu L J. Relationship between root chemical signals and grain quality of rice. *Agric Sci China*, 2007, 6: 47–57.
- [22] 张耗, 黄钻华, 王静超, 王志琴, 杨建昌. 江苏中籼水稻品种演进过程中根系形态生理性状的变化及其与产量的关系. *作物学报*, 2011, 37: 1020–1030.  
Zhang H, Huang Z H, Wang J C, Wang Z Q, Yang J C. Changes in morphological and physiological traits of roots and their relationships with grain yield during the evolution of mid-season indica rice cultivars in Jiangsu province. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 1020–1030 (in Chinese with English abstract).
- [23] Chu G, Chen T T, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice. *Field Crops Res*, 2014, 165: 36–48.
- [24] Zhang H, Chen T T, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. Involvement of cytokinins in the grain filling of rice under alternate wetting and drying irrigation. *J Exp Bot*, 2010, 61: 3719–3733.
- [25] 徐国伟, 李帅, 赵永芳, 陈明灿, 李友军. 秸秆还田与施氮对

- 水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究. 草业学报, 2014, 23(2): 140–146.
- Xu G W, Li S, Zhao Y F, Chen M C, Li Y J. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on root secretion and nitrogen utilization of rice. *Acta Pratac Sin*, 2014, 23(2): 140–146 (in Chinese with English abstract).
- [26] 陈翠兰, 张本山, 陈福泉. 淀粉结晶度计算的新方法. 食品科学, 2011, 32(9): 68–71.
- Chen C L, Zhang B S, Chen F Q. A novel method for calculating starch crystallinity. *Food Sci*, 2011, 32(9): 68–71 (in Chinese with English abstract).
- [27] 周天阳. 栽培措施对超级稻产量和品质的影响. 扬州大学硕士学位论文, 江苏扬州, 2020.
- Zhou T Y. Effects of Cultivation Treatments on Yield and Quality of Super Rice. MS Thesis of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [28] 吴培, 陈天晔, 袁嘉琦, 黄恒, 邢志鹏, 胡雅杰, 朱明, 李德剑, 刘国林, 张洪程. 施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响. 中国水稻科学, 2019, 33: 269–281.
- Wu P, Chen T Y, Yuan J Q, Huang H, Xing Z P, Hu Y J, Zhu M, Li D J, Liu G L, Zhang H C. Effects of interaction between nitrogen application rate and direct-sowing density on yield formation characteristics of rice. *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 269–281 (in Chinese with English abstract).
- [29] 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. 植物营养与肥料学报, 2021, 27: 1388–1396.
- Xu G W, Zhao X H, Jiang M M, Lu D K, Chen M C. Alternate wetting and moderate drying irrigation harmonize rice root and shoot growth, improves grain yield and nitrogen use efficiency. *J Plant Nutr Fert*, 2021, 27: 1388–1396 (in Chinese with English abstract).
- [30] 谢桂先, 荣湘民, 刘强, 彭建伟, 朱红梅, 于方明. 肥料不同配比对水稻产量与蛋白质含量的影响. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30: 405–410.
- Xie G X, Rong X M, Liu Q, Peng J W, Zhu H M, Yu F M. Effects of different combined fertilization on yield and protein contents of rice grain. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci Edn)*, 2004, 30: 405–410 (in Chinese with English abstract).
- [31] Zhang H, Hou D P, Peng X L, Ma B J, Shao S M, Jing W J, Gu J F, Liu L J, Wang Z Q, Liu Y Y, Yang J C. Optimizing integrative cultivation management improves grain quality while increasing yield and nitrogen use efficiency in rice. *J Integr Agric*, 2019, 18: 2716–2731.
- [32] Zhou T Y, Li Z K, Li E P, Wang W L, Yuan L M, Zhang H, Liu L J, Wang Z Q, Gu J F, Yang J C. Optimization of nitrogen fertilization improves rice quality by affecting the structure and physico-chemical properties of starch at high yield levels. *J Integr Agric*, 2022, 21: 1576–1592.
- [33] 韩丽君. 增施秸秆快腐剂和硝化抑制剂对水稻氮肥利用效率的影响. 扬州大学硕士学位论文, 江苏扬州, 2022.
- Han L J. Effects of Increased Application of Straw Preservative and Nitrification Inhibitor on Nitrogen Use Efficiency of Rice. MS Thesis of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [34] 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. 作物学报, 2016, 42: 1026–1036.
- Chu G, Zhan M F, Zhu K Y, Wang Z Q, Yang J C. 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).
- [35] 秦华东, 江立庚, 肖巧珍, 徐世宏. 水分管理对免耕抛秧水稻根系生长及产量的影响. 中国水稻科学, 2013, 27: 209–212.
- Qin H D, Jiang L G, Xiao Q Z, Xu S H. Effect of moisture management on rice root growth and rice grain yield at different growth stages under no tillage. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27: 209–212 (in Chinese with English abstract).
- [36] 郁燕, 彭显龙, 刘元英, 张慧, 陈丽楠. 前氮后移对寒地水稻根系吸收能力的影响. 土壤, 2011, 43: 548–553.
- Yu Y, Peng X L, Liu Y Y, Zhang H, Chen L N. Effects of N application at later stage on absorbability of rice root in cold area. *Soils*, 2011, 43: 548–553 (in Chinese with English abstract).
- [37] 李敏, 罗德强, 江学海, 蒋明金, 姬广梅, 李立江, 周维佳. 控水增密模式对杂交籼稻减氮后产量形成的调控效应. 作物学报, 2020, 46: 1430–1447.
- Li M, Luo D Q, Jiang X H, Jiang M J, Ji G M, Li L J, Zhou W J. Regulations of controlled irrigations and increased densities on yield formation of hybrid indica rice under nitrogen-reduction conditions. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 1430–1447 (in Chinese with English abstract).
- [38] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, Li Z Z, Huang Q H, Wang X J. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2010, 88: 341–349.
- [39] 杨胜玲, 黄兴成, 刘彦伶, 李渝, 张艳, 张雅蓉, 张文安. 长期有机肥无机肥施对水稻氮素吸收、转运及产量的影响. 中国稻米, 2021, 27(6): 63–68.
- Yang S L, Huang X C, Liu Y L, Li Y, Zhang Y, Zhang Y R, Zhang W A. Effects of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on nitrogen uptake and utilization in rice. *China Rice*, 2021, 27(6): 63–68 (in Chinese with English abstract).
- [40] 李文涛, 于春晓, 张丽莉, 张伟明, 杨立杰, 杨恒哲, 武开阔, 李东坡, 武志杰. 有机无机肥施对水稻产量及氮肥残效的影响. 中国土壤与肥料, 2022, 297(1): 63–72.
- Li W T, Yu C X, Zhang L L, Zhang W M, Yang L J, Yang H Z, Wu K K, Li D P, Wu Z J. Effect of organic and inorganic fertilizer on rice yield and nitrogen residual effect. *Soil Fert Sci China*, 2022, 297(1): 63–72 (in Chinese with English abstract).
- [41] Zhang W Y, Xu Y J, Wang Z Q, Liu L J, Zhang H, Gu J F, Zhang J H, Yang J C. 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. *Field Crops Res*, 2021, 268: 108165.
- [42] Guan X J, Chen J, Chen X M, Xie J, Deng G Q, Hu L Z, Li Y, Qian Y F, Qiu C F, Peng C R. Root characteristics and yield of rice as affected by the cultivation pattern of strong seedlings with increased planting density and reduced nitrogen application. *J Integr Agric*, 2022, 21: 1278–1289.
- [43] Peng D L, Cai T, Yin Y P, Yang W B, Ni Y L, Yang D Q, Wang Z L. Exogenous application of abscisic acid or gibberellin acid has

- different effects on starch granule size distribution in grains of wheat. *J Integr Agric*, 2013, 12: 1551–1559.
- [44] 孔祥胜. 不同栽培方式对水稻产量和氮肥利用效率的影响. 扬州大学硕士学位论文, 江苏扬州, 2017.
- Kong X S. Effect of Different Cultivation Patterns on Rice Yield and Nitrogen Use Efficiency. MS Thesis of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [45] 金正勋, 同拉嘎, 李丹, 李明月, 潘冬, 张玉磊, 王海微, 韩云飞, 张忠臣. 灌浆成熟期氮素营养对水稻增产及淀粉品质的影响. 东北农业大学学报, 2017, 48(4): 1–6.
- Jin Z X, Tonglaga, Li D, Li M Y, Pan D, Zhang Y L, Wang H W, Han Y F, Zhang Z C. Effect of grain-filling nitrogen on yield increasing and starch quality in rice. *J Northeast Agric Univ*, 2017, 48(4): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [46] 刘萍, 邵彩虹, 张红林, 刘光荣. 基于季节性降雨的双季稻生育后期干湿交替灌溉对稻谷产量及品质的影响. 作物杂志, 2021, (2): 153–159.
- Liu P, Shao C H, Zhang H L, Liu G R. Effects of dry-wet alternate irrigation on double cropping rice yield and quality during late development stage under seasonal rain condition. *Crops*, 2021, (2): 153–159 (in Chinese with English abstract).
- [47] 刘立军, 李鸿伟, 赵步洪, 王志琴, 杨建昌. 结实期干湿交替处理对稻米品质的影响及其生理机制. 中国水稻科学, 2012, 26: 77–84.
- Liu L J, Li H W, Zhao B H, Wang Z Q, Yang J C. Effects of alternate drying-wetting irrigation during grain filling on grain quality and its physiological mechanisms in rice. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26: 77–84 (in Chinese with English abstract).
- [48] 胡香玉, 郭九信, 田广丽, 高丽敏, 沈其荣, 郭世伟. 不同供氮模式对水稻根系形态及生理特征的影响. 中国水稻科学, 2017, 31: 72–80.
- Hu X Y, Guo J X, Tian G L, Gao L M, Shen Q R, Guo S W. Effects of different nitrogen supply patterns on root morphological and physiological characteristics of rice. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31: 72–80 (in Chinese with English abstract).
- [49] 周群, 袁锐, 朱宽宇, 王志琴, 杨建昌. 不同施氮量下粳/籼杂交稻甬优 2640 产量和氮素吸收利用的特点. 作物学报, 2022, 48: 2285–2299.
- Zhou Q, Yuan R, Zhu K Y, Wang Z Q, Yang J C. Characteristics of grain yield and nitrogen absorption and utilization of *indica/japonica* hybrid rice Yongyou 2640 under different nitrogen application rates. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 2285–2299 (in Chinese with English abstract).
- [50] 朱宽宇. 氮敏感性不同粳稻品种的特征与机制. 扬州大学博士学位论文, 江苏扬州, 2021.
- Zhu K Y. Characteristics and Mechanism of the *Japonica* Rice Varieties Differing in Responses to Nitrogen Rates. PhD Dissertation of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [51] 胡继杰, 钟楚, 胡志华, 张均华, 曹小闯. 溶解氧浓度对水稻分蘖期根系生长及氮素利用特性的影响. 中国农业科学, 2021, 54: 1525–1536.
- Hu J J, Zhong C, Hu Z H, Zhang J H, Cao X C. Effects of dissolved oxygen concentration on root growth at tillering stage and nitrogen utilization characteristics of rice. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 1525–1536 (in Chinese with English abstract).
- [52] 杨建昌, 常二华, 张文杰, 王志琴, 刘立军. 根系化学讯号与稻米品质的关系. 中国农业科学, 2006, 39: 38–47.
- Yang J C, Chang E H, Zhang W J, Wang Z Q, Liu L J. Relationship between root chemical signals and grain quality of rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39: 38–47 (in Chinese with English abstract).
- [53] 付景, 王亚, 杨文博, 王越涛, 李本银, 王付华, 王生轩, 白涛, 尹海庆. 干湿交替灌溉耦合施氮量对水稻籽粒灌浆生理和根系生理的影响. 作物学报, 2023, 49: 808–820.
- Fu J, Wang Y, Yang W B, Wang Y T, Li B Y, Wang F H, Wang S X, Bai T, Yin H Q. Effects of alternate wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on grain filling physiology and root physiology in rice. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 808–820 (in Chinese with English abstract).
- [54] Yang X Y, Bi J G, Gilbert R G, Li G H, Liu Z H, Wang S H, Ding Y F. Amylopectin chain length distribution in grains of *japonica* rice as affected by nitrogen fertilizer and genotype. *J Cereal Sci*, 2016, 71: 230–238.
- [55] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系. 中国农业科学, 2011, 44: 36–46.
- Yang J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 36–46 (in Chinese with English abstract).
- [56] Zhao C, Chen M Y, Li X F, Dai Q G, Xu K, Guo B W, Hu Y J, Wang W L, Huo Z Y. Effects of soil types and irrigation modes on rice root morphophysiological traits and grain quality. *Agro-nomy*, 2021, 11: 120.