

关键栽培措施对优质超级稻华浙优 261 产量、品质形成及生育特性的影响

马义虎¹ 周翠^{1,*} 朱练峰^{2,*} 余山红¹

(¹台州市农业科学研究院, 浙江 台州 318000; ²中国水稻研究所 水稻生物育种全国重点实验室, 杭州 311401; *通信联系人, email: zhoucuizj@163.com; zlfnj@163.com)

Effects of Key Cultivation Measures on Grain Yield Formation, Quality and Growth Characteristics of High-quality Super Rice Huazheyong 261

MA Yihu¹, ZHOU Cui^{1,*}, ZHU Lianfeng^{2,*}, YU Shanhong¹

(¹Taizhou Academy of Agricultural Sciences, Taizhou 318000, China; ²State Key Laboratory of Rice Biology and Breeding, China National Rice Research Institute, Hangzhou 311401, China; *Corresponding author, email: zhoucuizj@163.com; zlfnj@163.com)

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the effects of key cultivation measures (sowing date, planting density, and nitrogen application rate) on grain yield, rice quality formation, and growth characteristics of the high-quality super rice variety Huazheyong 261. The results are expected to provide a theoretical basis for developing high-yield, high-quality, and high-efficiency cultivation techniques. **【Method】** A single-factor field experiment was conducted using Huazheyong 261 as the test material. The treatments included four sowing dates (May 15, May 28, June 10, and June 23, denoted as S1, S2, S3, and S4), five transplanting densities (plant spacing of 27.0, 22.5, 19.3, 16.9, and 15.0 cm, denoted as D1 to D5, with a fixed row spacing of 30 cm), and five nitrogen application rates (0, 135, 180, 225, and 270 kg/hm², denoted as N0 to N4). Grain yield, rice quality, and growth characteristics were measured under different treatments. The correlations between yield and dry matter accumulation, as well as temperature and light resources, were analyzed. A comprehensive evaluation of rice quality under each treatment was also performed. **【Result】** Sowing date, density and nitrogen application rate significantly affected grain yield, rice quality and growth characteristics of rice. Under each cultivation measure, the grain yield and comprehensive evaluation grade of rice quality showed an initial increase followed by a decrease. The grain yield of S3, D3 and N3 treatments was the highest, and the rice quality of S3, D3 and N2 treatments was the best. There was a significant quadratic relationship between grain yield and sowing date, density and nitrogen application rate. The trend of yield components and rice quality indexes varied with different cultivation measures. With the delay of sowing date, the decrease of density and the increase of nitrogen application rate, the growth period was delayed and the whole growth period was prolonged. The number of tillers increased, but the productive tiller percentage (except density treatment) decreased, and the SPAD value of leaves increased. The effective leaf area index, grain-leaf ratio (except under nitrogen treatments), dry matter accumulation from heading to maturity, harvest index, and temperature-light production efficiency all exhibited a trend of initial increase followed by decrease. Statistical analysis indicated that grain yield was significantly positively correlated with total spikelets and dry matter accumulation, with total spikelets contributing the most to grain yield. Principal component analysis identified milled rice rate, head milled rice rate, chalky grain rate, chalkiness, alkali spreading value, and gel consistency as key indicators for evaluating rice quality. **【Conclusion】** Under the experimental conditions, synergistic optimization of grain yield and rice quality for Huazheyong 261 in southeastern Zhejiang Province was achieved with the following practices: sowing between May 28 and June 15, transplanting at a row spacing of 30 cm and a plant spacing of 19.3–23.3 cm, and applying nitrogen at a rate of 176.6–209.8 kg/hm².

Key words: sowing date; transplanting density; nitrogen application rate; high-quality super rice; grain yield; rice quality; growth characteristics

收稿日期: 2025-07-31; 修改稿收到日期: 2025-09-22。

基金项目: 浙江省水稻新品种选育重大科技专项(2021C02063-3); 台州市科技项目(24nya23); 浙江省台州市农业技术推广基金会资助项目(202627)。

摘 要:【目的】探究关键栽培措施(播期、密度、施氮量)对优质超级稻华浙优 261 产量、品质形成及生长发育特性的影响, 为其制定高产、优质、高效的栽培技术方案提供理论依据。【方法】于 2022–2023 年, 以优质超级稻华浙优 261 为供试品种, 进行单因素大田试验, 设 4 个播期(5 月 15 日、5 月 28 日、6 月 10 日和 6 月 23 日, 记为 S1、S2、S3 和 S4)、5 个移栽密度(株距依次为 27.0、22.5、19.3、16.9 和 15.0 cm, 记为 D1、D2、D3、D4 和 D5, 行距固定 30 cm)和 5 个施氮量(0、135、180、225 和 270 kg/hm², 记为 N0、N1、N2、N3 和 N4)处理, 测定不同处理下水稻的产量、品质及生育特性, 分析产量与干物质积累量、温光资源的相关性, 并综合评价各处理下稻米品质。【结果】播期、密度和施氮量均显著影响水稻产量、品质及生育特性。各栽培措施下, 产量和稻米品质综合判定等级均呈先升高后降低的变化趋势, S3、D3、N3 处理的产量最高, S3、D3、N2 处理的品质最优。产量与播期、密度、施氮量均呈显著的二次曲线关系; 产量构成因素和稻米品质指标的变化趋势因栽培措施不同而异。随播期推迟、密度降低、施氮量增加, 生育时期延迟且全生育期延长; 分蘖数增加但茎蘖成穗率(密度处理除外)降低, 叶片 SPAD 值升高; 高效叶面积指数、粒叶比(施氮量处理除外)、齐穗至成熟期干物质积累量、收获指数及温光生产效率均呈先增后减趋势。统计分析表明, 产量与总颖花量和干物质积累量均显著正相关, 其中总颖花量对产量的贡献最大; 主成分分析揭示, 精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、碱消值和胶稠度是评价稻米品质的关键指标。【结论】本研究条件下, 浙东南地区种植华浙优 261, 建议于 5 月 28 日–6 月 15 日播种, 采用行距 30 cm、株距 19.3–23.3 cm 的移栽密度, 配施 176.6–209.8 kg/hm² 的氮肥, 可实现其产量与品质的协同提升。

关键词: 播期; 移栽密度; 施氮量; 优质超级稻; 产量; 品质; 生育特性

水稻是全球最重要的粮食作物之一, 在中国粮食总产量中的占比超过三分之一, 更是全国约三分之二人口的主食来源。因此, 确保水稻的高产、稳产和高效生产, 对保障国家粮食安全与国民食物供应具有至关重要的意义。当前, 随着居民生活水平的持续提升, 消费需求已从“吃得饱”转向“吃得好”、“吃得营养健康”。消费者对稻米的食味品质、功能特性及安全性的要求日益提高, 推动优质稻的育种与栽培成为水稻科研领域的新焦点^[1]。

优质稻的产量与品质表现, 不仅受其遗传特性制约, 也显著受外部栽培措施的调控。在诸多栽培措施因子中, 播期、移栽密度和施氮量是调控优质稻生长发育及产量品质形成的关键农艺措施^[2–3], 其适宜水平因品种而异。播期作为水稻在时间维度上的关键调控手段, 直接决定着水稻生育期内温光资源的分配状况^[4]。适期播种能使水稻关键生育期(尤其是灌浆结实期)与最佳温光条件同步, 这不仅有利于光合产物的高效合成, 还能促进同化物向籽粒的高效转运, 对提升产量和改善米质意义重大^[5–6]。移栽密度是构建合理群体结构的基础, 适宜的密度既能促进个体健壮生长和穗部良好发育, 又能协调个体与群体的竞争关系, 在提高光能和养分利用效率的同时, 还能有效降低倒伏风险^[7]。氮素作为水稻生长发育的核心营养元素, 对水稻产量与品质均有显著影响。科学的氮素管理策略不仅能满足水稻各生育阶段的养分需求, 还能通过优化根系(氮素吸收的主要器官)功能以促进氮素高效吸收利用^[8], 同时还能减少环境污染和资源浪费, 实现增产、提质、增效的综合目标^[9–10]。

以往研究多聚焦于单一或双重栽培措施对水稻产量或品质的影响^[11–12], 且研究材料多以高产品种为主^[13], 而针对多个关键栽培措施调控优质超级稻群体生长发育及产量品质形成的研究并不多见。华浙优261系中国水稻研究所选育的优质籼型三系杂交稻, 兼具高产、优质、多抗等优良特性^[14]。该品种自2020年通过国家审定以来, 种植面积逐年上升, 其食味品质优异, 荣获第三届全国优质稻食味品质鉴评金奖和第三届黑龙江国际大米节金奖等国家和省级奖项, 并于2024年被农业农村部确认为超级稻品种。鉴于此, 本研究以华浙优261为材料, 系统探究播期、移栽密度和施氮量3种关键栽培措施对其产量、品质形成及生长发育特性的影响。旨在阐明不同栽培措施下, 优质超级稻产量构成、稻米品质、生育进程、茎蘖成穗率、叶片SPAD值、叶面积指数、粒叶比、干物质积累与收获指数、群体生长率及温光资源配置与利用效率等关键指标的变化规律, 为优质超级稻高产优质栽培技术的优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与地点

以大面积种植的优质籼型三系杂交稻华浙优 261 为试验材料。试验于 2022–2023 连续 2 年在浙江省台州市农业科学研究院小溪试验基地(28°47'3"N, 121°6'51"E, 海拔 4 m)进行。试验地土壤为砂壤土, 土壤容重 1.24 g/cm³、有机质 31.36 g/kg、全氮 2.52 g/kg、碱解氮 120.41 mg/kg、有效

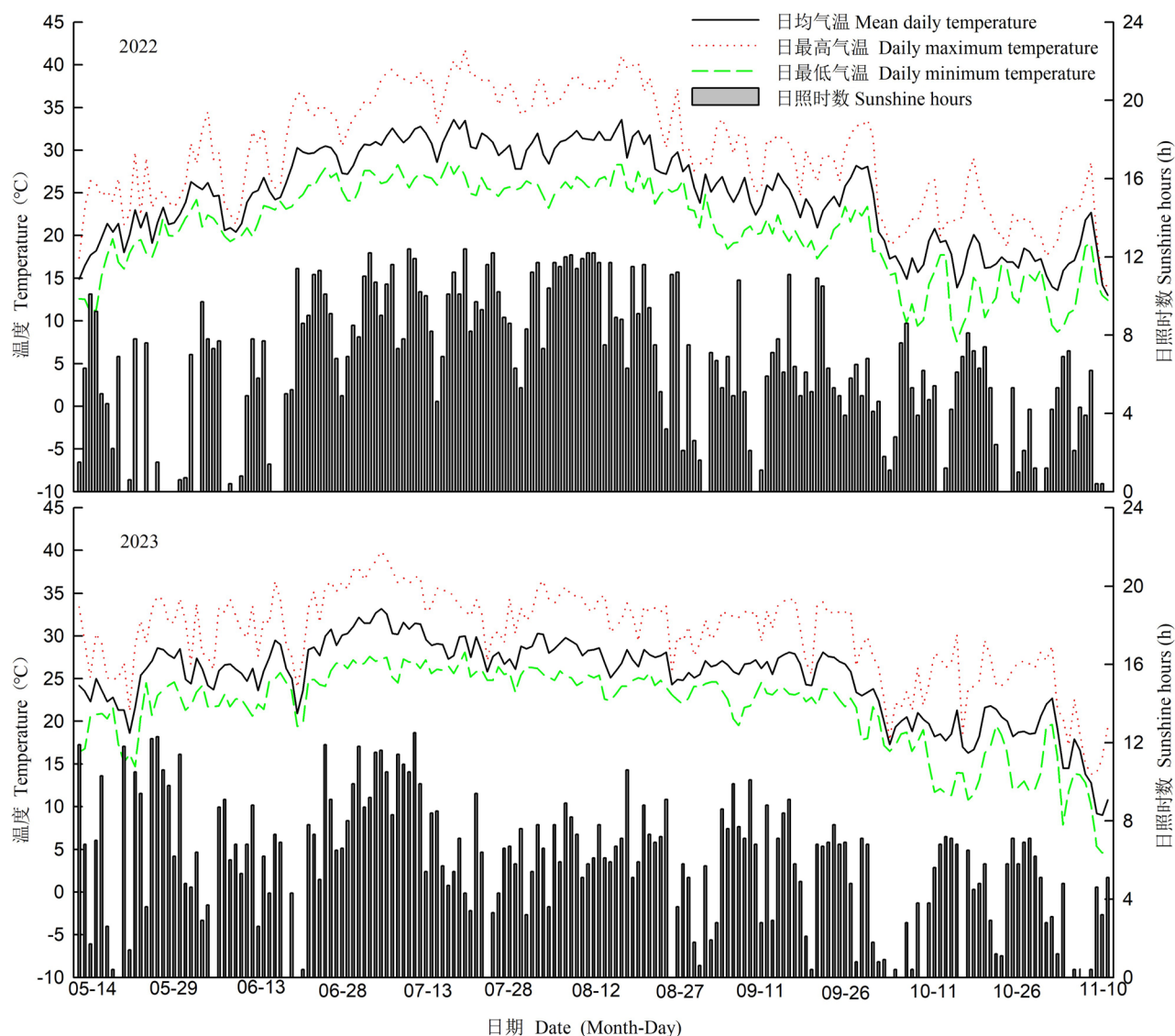


图1 2022–2023年试验点水稻生长期间的温度和日照时数变化

Fig. 1. Changes in air temperature and sunshine hours during rice growing season at the experimental site in 2022 and 2023

磷 36.99 mg/kg、速效钾 104.32 mg/kg、pH 值 5.68，前茬为空闲田。该基地属亚热带季风气候，年均气温为 18.0°C，年均降水量为 1708.5 mm，年均日照时长为 1699.33 h，无霜期为 260 d，试验点具体气象资料及变化趋势见图 1。

1.2 试验设计

试验设置播期、密度和施氮量 3 个独立试验组，均采用单因素随机区组设计。小区面积 15.36 m² (6.4 m×2.4 m)，3 次重复。播期和施氮量试验各小区间筑埂并用黑色塑料薄膜包埂隔离，实行单独排灌。

播期试验：设置 4 个播期(S1、S2、S3 和 S4)，2 年播期相同，分别为 5 月 15 日、5 月 28 日、6 月 10 日和 6 月 23 日。采用水育秧方式，播种量为 18

g/m²(以干种子计)，种子经浸种催芽(芽长为谷长一半)后进行人工播种。秧龄 22 d 时进行人工拉绳定距移栽，丛插 1 株秧苗，株行距为 20.0 cm×30.0 cm。

密度试验：2 年均于 5 月 25 日播种，6 月 16 日移栽。育秧方式、播种量、移栽方式和丛插本数均与上述播期试验一致。设置 30 cm 同行距 5 个不同株距的移栽密度处理(D1、D2、D3、D4 和 D5)，株距分别为 27.0、22.5、19.3、16.9 和 15.0 cm，移栽密度依次为 12.3×10⁴、14.8×10⁴、17.3×10⁴、19.7×10⁴ 和 22.2×10⁴ 丛/hm²。

施氮量试验：播种期、移栽期、育秧方式、播种量、移栽方式和丛插本数均同上述密度试验。株行距为 20.0 cm×30.0 cm。设置 5 个施氮量水平(N0、N1、N2、N3 和 N4)，折合纯氮分别为 0、135、180、

225 和 270 kg/hm²。

3 个试验组的氮肥均为尿素(纯 N 46%), 播期和密度试验纯氮总用量均为 195 kg/hm², 所有试验组的氮肥按基肥(移栽前 1 d):分蘖肥(移栽后 6 d):穗肥(叶龄余数 3.5 时)=5:3.5:1.5 的比例施用。各处理间磷、钾肥施用量一致。磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%), 用量 450 kg/hm², 作基肥一次性施入; 钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%), 总用量 240 kg/hm², 按基肥和穗肥 1:1 的比例分两次施入。其他管理同当地高产栽培管理方式。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生育进程

记载各处理播种期、移栽期、始穗期、齐穗期和成熟期等主要生育时期所对应的日期。

1.3.2 茎蘖动态

各小区定 1 点, 每点均取连续的 10 丛作为一个观测点, 分别在移栽期、最高苗期和成熟期记录每丛茎蘖数。

1.3.3 叶片 SPAD 值与叶面积指数(LAI)

移栽后 20 d 起, 每 10 d 用叶绿素仪 (SPAD-502, 日本)测定叶片 SPAD 值(抽穗前测定心叶下第 1 叶, 抽穗后测定剑叶), 各小区每次测定 10 片叶, 每片叶避开叶脉测定上、中、下部 3 部分, 取平均值。于齐穗期, 各小区按平均茎蘖数取代表性植株 5 丛, 采用长宽系数法(叶面积=叶长×叶宽×0.75)测高效叶面积(有效分蘖顶部三张叶片面积)和有效叶面积(除无效分蘖外的叶片面积)。叶面积指数=小区叶面积/小区面积, 粒叶比(mg/cm²)=产量/齐穗期叶面积。

1.3.4 干物质积累与收获指数

于齐穗期和成熟期在各小区按平均茎蘖数取代表性植株 5 丛, 去掉根部, 成熟期样品手工脱粒分离稻草与籽粒。所有样品在 105℃下杀青 30 min 后, 于 80℃烘干至恒重后称量测定干物质质量。

群体生长率[kg/(hm²·d)]=(W_2-W_1)/(t_2-t_1), 其中 W_1 和 W_2 分别表示前后两次测定的干物质质量(kg/hm²), t_1 和 t_2 分别表示前后两次测定的时间(d);

收获指数=稻谷干质量/(稻谷干质量+稻草干质量)。

1.3.5 考种与计产

收获前 1 d, 各小区调查随机连续 30 丛有效穗数, 按每丛平均数在各小区取代表性 5 丛植株, 考查每穗粒数、结实率和千粒重; 所有小区全部收割、脱粒、去杂、晒干, 换算成标准含水量 13.5% 后计算产量。

1.3.6 稻米品质

取收获后晒干的部分稻谷送农业农村部稻米及制品质量监督检验测试中心测定稻米品质。检测指标包括糙米率、精米率、整精米率、粒长、长宽比、垩白粒率、垩白度、碱消值、胶稠度、直链淀粉含量和蛋白质含量。

1.3.7 气象资料与有效积温

水稻生育期内的气象数据资料取自临海市气象局, 主要包括日均气温、日最高气温、日最低气温和日照时数。有效积温计算公式如下:

$$A = \sum_{i=1}^n (\bar{t}_i - B), (\bar{t}_i > B);$$

其中 A 为水稻完成某一生育阶段所需的有效积温(℃·d), n 为完成该阶段发育所需的天数, $\bar{t}_i$ 为第 i 天平均温度(℃), B 为水稻发育的生物学下限温度, 杂交籼稻取 12℃; 若 $\bar{t}_i \leq B$, 则该天有效积温以 0℃·d 计。

有效积温生产效率[kg/(hm²·℃·d)]=产量/全生育期有效积温;

日照时数生产效率[kg/(hm²·h)]=产量/全生育期日照时数。

1.4 数据分析

对稻米品质指标的不同方向性, 进行趋同化处理, 逆向指标正向化公式: $\max\{X_i\} - X_i$, 式中 X_i 表示第 i 个指标的原始值。采用主成分分析结合隶属函数法对稻米品质进行综合评价。采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据处理与统计分析, 用 LSD 和 Pearson 法分别进行多重比较和计算相关关系, 利用 SigmaPlot 10.0 绘图。产量及稻米品质数据展示 2022 年和 2023 年结果; 其他指标数据仅展示 2023 年结果。

2 结果与分析

2.1 关键栽培措施对华浙优 261 产量及其构成因素的影响

由表 1~表 3 可知, 不同栽培措施处理对华浙优 261 产量及其构成因素的影响在两年间变化趋势基本一致。年份对结实率有显著影响, 除密度处理对千粒重无显著影响外, 其他栽培措施均对产量及其构成因素有显著或极显著影响, 年份与栽培措施的互作效应对产量及其构成因素的影响均不显著。

在播期试验中(表 1), 产量随播期推迟呈先增后减的趋势, 两年均以 S3 处理最高, 与除 S2 之外的处

表1 播期对华浙优261产量及其构成因素的影响

Table 1. Effects of sowing dates on grain yield and its components of Huazheyou 261

年份 Year	播期处理 Sowing date treatment	有效穗数 Number of productive panicle(×10 ⁴ /hm ²)	每穗粒数 Spikelet number per panicle	总颖花量 Total amount of spikelets (×10 ⁶ /hm ²)	结实率 Seed-setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight(g)	理论产量 Theoretical grain yield(t/hm ²)	实际产量 Actual grain yield(t/hm ²)
2022	S1	221.0±2.1 c	203.2±3.3 c	449.2±13.6 c	91.6±1.4 a	21.79±0.03 b	8.97±0.11 c	8.93±0.20 b
	S2	225.2±2.9 bc	210.1±3.7 ab	473.2±14.8 b	91.2±1.1 a	22.18±0.02 a	9.58±0.15 ab	9.58±0.14 a
	S3	233.0±3.8 a	216.3± 4.1a	503.9±11.2 a	89.1±2.3 b	22.02±0.06 ab	9.88±0.24 a	9.72±0.25 a
	S4	232.4±2.7 ab	204.5±2.6 bc	475.3±17.4 b	88.5±1.5 b	21.75±0.05 b	9.15±0.25 bc	9.11±0.16 b
2023	S1	217.3±3.2 b	206.6±2.9 b	448.9±12.4 c	92.1±1.7 a	21.92±0.03 b	9.06±0.23 c	9.05±0.19 b
	S2	223.1±2.6 b	213.9±2.6 a	477.3±13.6 b	91.3±0.8 ab	22.25±0.07 a	9.70±0.18 ab	9.68±0.12 a
	S3	233.8±3.3 a	218.5±3.2 a	510.8±16.9 a	90.4±1.9 b	21.94±0.04 b	10.13±0.21 a	9.84±0.13 a
	S4	235.4±4.1 a	203.3±1.9 b	478.5±12.8 b	89.9±2.3 b	21.71±0.01 b	9.34± 0.13 bc	9.26±0.24 b
方差分析	年份 Year(Y)	0.10	1.81	0.35	6.20*	0.14	2.05	4.02
ANOVA	播期 Sowing date(S)	17.94**	17.58**	15.51**	14.76**	5.02*	18.03**	35.80**
	年份×播期 Y×S	0.76	0.56	0.06	0.88	0.52	0.09	0.08

S1、S2、S3 和 S4 分别表示在 5 月 15 日、5 月 28 日、6 月 10 日和 6 月 23 日播种。表中数据为平均数±标准差。数据后不同小写字母表示同列同年内比较在 0.05 水平上差异显著。*和**分别表示在 0.05、0.01 水平上差异显著。下同。

S1, S2, S3 and S4 indicate seeding on May 15, May 28, June 10 and June 23, respectively. The data in the table are mean ± standard deviation. The values with different lowercase letters in the same column and same year show significant difference at 0.05 level. * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. The same below.

表 2 移栽密度对华浙优 261 产量及其构成因素的影响

Table 2. Effects of transplanting density on grain yield and its components of Huazheyou 261

年份 Year	密度处理 Density treatment	有效穗数 Number of productive panicles (×10 ⁴ /hm ²)	每穗粒数 Spikelet number per panicle	总颖花量 Total amount of spikelets (×10 ⁶ /hm ²)	结实率 Seed-setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight(g)	理论产量 Theoretical grain yield (t/hm ²)	实际产量 Actual grain yield(t/hm ²)
2022	D1	209.7±3.3 d	221.6±1.8 a	464.7±15.9 c	90.0±0.9 b	22.02±0.02 a	9.21±0.15 c	9.01±0.17 c
	D2	224.5±2.4 c	217.8±1.2 ab	489.0±12.6 ab	90.3±1.7 ab	21.98±0.04 a	9.71±0.20 a	9.57±0.11 a
	D3	236.2±2.8 b	210.5±2.4 b	497.1±14.7 a	90.5±1.3 ab	21.91±0.05 a	9.85±0.17 a	9.66±0.21 a
	D4	243.7±3.0 ab	198.6±3.1 c	483.9±9.8 abc	90.8±1.8 ab	21.89±0.01 a	9.62±0.14 ab	9.37±0.24 ab
	D5	247.4±2.2 a	190.4±3.2 c	471.1±12.9 bc	91.0±1.6 a	21.86±0.07 a	9.37±0.21 bc	9.10±0.12 bc
2023	D1	208.0±3.2 d	223.6±4.1 a	465.2±11.5 c	90.7±1.3 b	22.19±0.02 a	9.36±0.16 b	9.06±0.18 b
	D2	221.4±4.1 c	219.9±3.0 ab	486.8±13.1 ab	91.2±1.7 ab	22.16±0.02 a	9.84±0.25 a	9.68±0.13 a
	D3	231.0±2.9 b	213.0±1.8 b	491.9±12.6 a	91.4±1.9 ab	22.12±0.06 a	9.94±0.13 a	9.64±0.11 a
	D4	240.8±3.6 a	201.5±2.3 c	485.2±11.1 abc	91.6±1.4 ab	22.03±0.05 a	9.80±0.28 a	9.39±0.25 a
	D5	245.4±2.8 a	190.4±3.7 d	467.1±17.5 bc	91.8±1.8 a	22.01±0.03 a	9.44±0.17 b	9.03±0.20 b
方差分析	年份 Year(Y)	3.40	1.31	0.22	4.65*	3.44	3.71	1.09
ANOVA	密度 Density(D)	63.18**	44.95**	9.97**	3.74*	0.78	13.22**	18.80**
	年份×密度 Y×D	0.13	0.08	0.09	0.03	0.20	0.11	0.25

D1、D2、D3、D4 和 D5 分别表示行距为 30 cm 条件下的 27.0、22.5、19.3、16.9 和 15.0 cm 株距。下同。

D1, D2, D3, D4 and D5 represent 27.0, 22.5, 19.3, 16.9 and 15.0 cm plant spacing under the fixed row spacing of 30 cm, respectively. The same below.

理差异达显著水平，S3处理下的两年平均产量较S1和S4处理分别显著提高8.8%和6.4%；随播期推迟，有效穗数增加，每穗粒数、总颖花量和千粒重的变化趋势与产量基本一致，结实率下降。密度试验结果(表2)显示，产量随密度增大呈先增后减的趋势，2022年D3处理和2023年D2处理分别达到最高产量；D2、D3和D4处理间差异不显著，但均显著高

于D1和D5处理；D3处理的两年平均产量较D1和D5分别显著提高6.8%和6.4%；随密度增大，有效穗数和结实率提高，每穗粒数下降，千粒重虽下降但处理间差异不显著，总颖花量先增后减。随施氮量增加，产量同样呈先增后减的趋势，两年均以N3处理最高，其两年平均产量较N0、N1、N2和N4处理分别显著提高54.8%、11.4%、4.5%和9.7%，各处理间

表 3 施氮量对华浙优 261 产量及其构成因素的影响

Table 3. Effects of nitrogen application rates on grain yield and its components of Huazheyou 261

年份 Year	施氮量处理 N rate treatment	有效穗数 Number of productive panicle($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数 Spikelet number per panicle	总颖花量 Total amount of spikelets ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	结实率 Seed-setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical grain yield(t/hm^2)	实际产量 Actual grain yield(t/hm^2)
2022	N0	165.0 $\pm$ 2.5 d	190.6 $\pm$ 1.7 c	314.6 $\pm$ 9.5 d	92.6 $\pm$ 1.7 a	22.40 $\pm$ 0.02 a	6.53 $\pm$ 0.16 c	6.37 $\pm$ 0.18 d
	N1	208.4 $\pm$ 3.0 c	209.1 $\pm$ 2.1 a	435.8 $\pm$ 12.8 c	92.0 $\pm$ 1.4 a	22.18 $\pm$ 0.08 ab	8.89 $\pm$ 0.18 b	8.85 $\pm$ 0.09 c
	N2	224.7 $\pm$ 2.2 b	212.0 $\pm$ 2.8 a	476.3 $\pm$ 10.9 b	91.1 $\pm$ 1.8 ab	22.05 $\pm$ 0.03 bc	9.56 $\pm$ 0.11 a	9.45 $\pm$ 0.15 b
	N3	243.7 $\pm$ 2.5 a	206.6 $\pm$ 2.2 ab	503.4 $\pm$ 15.4 a	89.8 $\pm$ 1.1 b	21.99 $\pm$ 0.04 bc	9.94 $\pm$ 0.24 a	9.88 $\pm$ 0.16 a
	N4	236.9 $\pm$ 3.1 ab	200.4 $\pm$ 3.5 b	474.8 $\pm$ 11.5 b	87.3 $\pm$ 2.0 c	21.85 $\pm$ 0.07 c	9.06 $\pm$ 0.27 b	9.03 $\pm$ 0.21 c
2023	N0	164.4 $\pm$ 2.9 d	192.6 $\pm$ 2.7 d	316.8 $\pm$ 12.8 d	93.5 $\pm$ 1.4 a	22.63 $\pm$ 0.03 a	6.71 $\pm$ 0.20 c	6.50 $\pm$ 0.23 d
	N1	205.2 $\pm$ 2.6 c	214.9 $\pm$ 3.2 ab	441.1 $\pm$ 13.9 c	92.9 $\pm$ 1.5 a	22.41 $\pm$ 0.02 ab	9.18 $\pm$ 0.15 b	9.04 $\pm$ 0.28 c
	N2	222.2 $\pm$ 2.3 b	215.8 $\pm$ 2.7 a	479.4 $\pm$ 17.2 b	92.0 $\pm$ 1.7 ab	22.25 $\pm$ 0.04 b	9.81 $\pm$ 0.12 a	9.62 $\pm$ 0.13 b
	N3	243.1 $\pm$ 3.1 a	207.5 $\pm$ 4.0 bc	504.4 $\pm$ 13.8 a	90.6 $\pm$ 2.1 b	22.11 $\pm$ 0.03 bc	10.10 $\pm$ 0.18 a	10.05 $\pm$ 0.25 a
	N4	234.2 $\pm$ 2.8 ab	203.4 $\pm$ 2.9 c	476.4 $\pm$ 12.9 b	88.1 $\pm$ 1.6 c	21.89 $\pm$ 0.05 c	9.19 $\pm$ 0.13 b	9.12 $\pm$ 0.17 c
方差分析 ANOVA	年份 Year(Y)	0.53	3.50	1.32	7.42*	3.66	3.58	3.87
	施氮量 N rate(N)	113.69**	23.42**	499.54**	35.58**	11.69**	194.26**	159.77**
	年份 $\times$ 施氮量 Y $\times$ N	0.04	0.25	0.11	0.01	0.33	0.21	0.06

N0、N1、N2、N3 和 N4 分别表示 0、135、180、225 和 270 kg/hm²(折合纯氮)。下同。

N0, N1, N2, N3 and N4 represent 0, 135, 180, 225 and 270 kg/hm²(on a pure nitrogen basis), respectively. The same below.

表 4 关键栽培措施对华浙优 261 产量影响的回归方程

Table 4. Regression equation of the effects of key cultivation measures on grain yield of Huazheyou 261

栽培措施 Cultivation measure	$y=ax^2+bx+c$				Y_{mean} (t/hm ²)	Y_{max} (t/hm ²)	$y_{\text{mean}}/y_{\text{max}}$ (%)	y_{max} 对应 x 值 x value for y_{max}	y_{max} 对应 处理值 Treatment value for y_{max}	$y_{0.98}$ 对应 x 范围 x range for $y_{0.98}$	$y_{0.98}$ 对应 处理范围 Treatment range for $y_{0.98}$
	a	b	c	R^2							
播期 Sowing date	-0.00183	0.07692	8.97433	0.9326*	9.39	9.78	96.01	21.02	06-05	10.68~31.36	05-26~06-15
密度 Density	-0.02470	0.84594	2.40674	0.9199*	9.35	9.65	96.89	17.12	19.5 cm $\times$ 30.0 cm	14.33~19.92	23.3 cm $\times$ 30.0 cm ~16.7 cm $\times$ 30.0 cm
施氮量 N rate	-0.00018	0.07553	2.00694	0.8967*	8.79	9.93	88.52	209.81	209.81	176.59~243.02	176.59~209.81

$y(\text{t}/\text{hm}^2)$ 为产量, x 依次为播期自第 S1 播期向后推迟的天数(d)、密度水平($\times 10^4$ 丛/hm²)和施氮量(kg/hm²); y_{mean} 为平均产量, y_{max} 为产量潜力, $y_{\text{mean}}/y_{\text{max}}$ 为产量潜力实现率, $y_{0.98}$ 为产量潜力 98%以上。

y is the grain yield, and x is the number of days after the actual sowing date is postponed from S1 sowing date, density level and nitrogen application rate, respectively. y_{mean} is average yield, y_{max} is yield potential, and $y_{\text{mean}}/y_{\text{max}}$ is the realized rate of yield potential, $y_{0.98}$ is over 98% of yield potential.

(N1与N4除外)差异均达显著水平;有效穗数、每穗粒数和总颖花量的变化趋势与产量基本一致,而结实率和千粒重均下降(表3)。

分别针对各栽培措施处理 x 与其对应的两年平均产量 y 之间的关系展开分析,拟合出 x 与 y 的二次多项式回归方程 $y=ax^2+bx+c$,求得不同栽培措施处理下 x 的最优值与 y 的最大值,3种栽培措施实现产量潜力的最优参数分别为播期6月5日,行距30 cm,配套株距19.5 cm,施氮量209.81 kg/hm²;计算出实现产量潜力98%以上时的 x 取值范围,综合稻米品质与田间节本增效生产需求,为该品种大田栽培参数的确立提供数据支撑。3种栽培措施中移栽密度产量潜力实现率最高,播期次之,施氮量最低(表4)。

2.2 关键栽培措施对华浙优 261 稻米品质的影响

由表5~表7可知,不同栽培措施对稻米品质各指标的影响在两年间变化趋势基本一致,年份与不同栽培措施的互作效应均不显著。对于播期,年份显著影响精米率、整精米率和垩白粒率,播期处理对除粒长和长宽比以外的稻米品质指标均有显著影响(表5)。对于密度,其处理对除粒长和长宽比以外的稻米品质指标均有显著影响(表6)。对于施氮量,年份对整精米率有显著影响,施氮量处理对除长宽比以外的稻米品质指标均有显著影响(表7)。

随播期推迟,华浙优261糙米率、精米率、整精米率、碱消值(2022年除外)和胶稠度均呈先提高后降低的趋势,而垩白粒率和垩白度与之相反,直

表 5 播期对华浙优 261 稻米品质的影响

Table 5. Effects of sowing dates on rice quality of Huazheyou 261

年份 Year	播期处理 Sowing date treatment	糙米率 Brown rice rate(%)	精米率 Milled rice rate(%)	整精米率 Head milled rice rate (%)	粒长 Grain length (mm)	长宽比 Length-width ratio	垩白粒率 Chalky grain rate(%)	垩白度 Chalkiness degree (%)	碱消值 Alkali spreading value (rank)	胶稠度 Gel consistency (mm)	直链淀粉含量 Amylose content (%)	蛋白质含量 Protein content (%)	综合判定等级 Comprehensive evaluation grade
2022	S1	78.6 c	67.3 c	50.0 c	6.5 a	3.5 a	11.0 a	3.1 a	5.4 b	65 b	15.1 b	7.9 a	3
	S2	79.9 b	69.9 b	52.2 b	6.6 a	3.5 a	8.7 b	1.5 b	6.8 a	76 a	16.3 ab	7.4 ab	2
	S3	81.5 a	71.1 a	56.1 a	6.6 a	3.5 a	4.3 c	0.8 b	7.1 a	78 a	16.7 a	6.7 bc	1
	S4	80.4 b	70.9 ab	54.9 a	6.6 a	3.5 a	5.7 c	1.2 b	7.0 a	74 a	17.1 a	6.5 c	2
2023	S1	78.9 c	68.5 b	51.1 c	6.5 a	3.5 a	9.7 a	2.1 a	5.2 c	68 c	15.4 b	7.7 a	3
	S2	80.1 b	70.9 a	53.2 b	6.7 a	3.6 a	7.3 b	1.2 b	7.1 a	74 b	16.1 ab	7.2 ab	2
	S3	81.6 a	71.6 a	56.5 a	6.6 a	3.5 a	3.7 d	0.6 b	6.9 a	80 a	16.8 ab	6.8 bc	1
	S4	80.9 ab	71.2 a	55.6 a	6.5 a	3.5 a	5.3 c	1.1 b	6.4 b	72 bc	17.2 a	6.4 c	2
方差分析 年份 ANOVA Year(Y)	播期 Sowing date(S)	1.19	5.98*	6.21*	0.01	0.01	6.63*	2.81	0.27	0.05	0.04	0.32	
	Y×S	21.83**	34.87**	54.66**	1.30	1.21	10.63**	11.60**	3.81*	22.87**	5.38*	11.38**	
	Y×S	0.11	0.63	0.42	0.52	0.32	0.48	0.73	0.27	1.45	0.08	0.16	

表 6 移栽密度对华浙优 261 稻米品质的影响

Table 6. Effects of transplanting density on rice quality of Huazheyou 261

年份 Year	密度处理 Density treatment	糙米率 Brown rice rate(%)	精米率 Milled rice rate(%)	整精米率 Head milled rice rate (%)	粒长 Panicle length (mm)	长宽比 Length-width ratio	垩白粒率 Chalky grain rate(%)	垩白度 Chalkiness degree (%)	碱消值 Alkali spreading value (rank)	胶稠度 Gel consistency (mm)	直链淀粉含量 Amylose content (%)	蛋白质含量 Protein content (%)	综合判定等级 Comprehensive evaluation grade
2022	D1	78.9 b	69.7 b	51.7 bc	6.6 a	3.5 a	9.3 a	1.9 a	6.3 b	74 b	17.1 a	7.9 a	3
	D2	79.3 b	69.8 ab	52.1 b	6.6 a	3.5 a	7.0 b	1.4 b	6.8 a	74 b	16.7 ab	7.8 a	2
	D3	80.1 ab	70.1 ab	52.9 a	6.6 a	3.5 a	7.6 ab	1.5 ab	6.9 a	75 ab	16.4 bc	7.5 ab	2
	D4	80.7 a	70.9 a	52.3 ab	6.5 a	3.5 a	8.0 ab	1.7 ab	7.1 a	79 a	16.1 c	7.2 ab	3
	D5	79.6 ab	69.5 b	51.1 c	6.5 a	3.5 a	8.3 ab	1.7 ab	5.4 c	77 ab	16.0 c	6.9 b	3
2023	D1	78.6 c	69.4 b	51.3 b	6.6 a	3.5 a	9.7 a	2.0 a	5.2 c	73 b	16.9 a	7.8 a	3
	D2	79.6 bc	70.2 b	52.2 a	6.6 a	3.5 a	7.7 b	1.6 ab	6.9 a	75 ab	16.6 ab	7.6 ab	2
	D3	80.9 a	71.5 a	52.8 a	6.5 a	3.5 a	7.0 b	1.4 b	7.0 a	76 ab	16.5 ab	7.4 ab	2
	D4	80.02 ab	71.4 a	52.6 a	6.5 a	3.5 a	6.3 b	1.2 b	7.1 a	78 a	16.3 b	7.3 ab	3
	D5	79.4 bc	70.2 b	50.8 b	6.5 a	3.4 a	7.3 b	1.6 ab	6.2 b	76 ab	16.2 b	7.1 b	3
方差分析 年份 ANOVA Year(Y)	密度 Density(D)	0.01	3.57	0.61	1.63	0.15	1.80	1.40	0.18	0.05	0.18	0.02	
	Y×D	4.13*	4.46*	20.47**	1.36	1.28	3.12*	3.28*	3.95*	3.78*	11.85**	5.79**	
	Y×D	0.52	0.91	1.04	0.27	0.22	2.66	2.67	0.23	0.31	0.75	0.34	

链淀粉含量提高，蛋白质含量降低；其综合判定等级先升高后降低，以S3处理最优(表5)。随密度增大，除直链淀粉含量降低外，其余稻米品质指标及综合判定等级的变化趋势与上述播期处理一致，综合判定等级D2和D3处理优于D1、D4和D5(表6)。随施氮量增加，华浙优261糙米率、精米率和整精米率呈先提高后降低的趋势，粒长、长宽比、垩白粒率、垩白度和直链淀粉含量降低，碱消值、胶稠度和蛋白质含量提高；其综合判定等级先升高后降低，其中N1、N2和N3处理达2级以上，优于N0和N4处理(表7)。

2.3 关键栽培措施对华浙优 261 生育期的影响

由表8可知，不同栽培措施对华浙优261生育期

的影响表现为播期>施氮量>密度。播期主要影响齐穗—成熟期，随播期推迟，该生育阶段显著延长(S4较S1延长22 d)，导致全生育期延长(S4较S1延长18 d)。密度对播种—齐穗期和齐穗—成熟期的影响均不大，随移栽密度增大，上述2个生育阶段均略有缩短(D5较D1全生育期仅缩短2 d)。施氮量对齐穗—成熟期的影响大于播种—齐穗期，随施氮量增加，上述2个生育阶段均延长，与N0相比，N4处理的齐穗—成熟期、播种—齐穗期和全生育期分别延长4、6和10 d(表8)。

2.4 关键栽培措施对华浙优 261 茎蘖成穗率、叶面积指数和粒叶比的影响

由表9可知，随播期推迟，群体最高苗、单株

表 7 施氮量对华浙优 261 稻米品质的影响

Table 7. Effects of nitrogen application rates on rice quality of Huazheyou 261													
年份 Year	施氮量 处理 N rate treatment	糙米率 Brown rice rate(%)	精米率 Milled rice rate(%)	整精米率 Head milled rice rate(%)	粒长 Grain length (mm)	长宽比 Length- width ratio	垩白粒率 Chalky grain rate(%)	垩白度 Chalkiness degree (%)	碱消值 Alkali spreading value (rank)	胶稠度 Gel consistency (mm)	直链淀粉 含量 Amylose content (%)	蛋白质 含量 Protein content (%)	综合判 定等级 Comprehensive evaluation grade
2022	N0	78.2 c	67.5 d	50.3 d	6.8 a	3.6 a	8.3 a	1.7 a	5.4 b	68 d	16.9 a	6.0 d	3
	N1	79.4 bc	69.7 bc	52.1 bc	6.8 a	3.6 a	7.9 ab	1.5 ab	6.8 a	72 c	16.5 ab	6.5 d	2
	N2	80.3 ab	70.9 ab	53.4 ab	6.8 a	3.6 a	7.3 b	1.3 bc	7.1 a	74 bc	16.2 bc	7.2 c	2
	N3	81.4 a	71.6 a	54.6 a	6.7 ab	3.5 a	5.9 c	1.1 c	7.2 a	77 b	15.7 cd	8.1 b	2
	N4	77.9 c	68.9 c	51.5 cd	6.6 b	3.5 a	4.1 d	0.8 d	7.0 a	81 a	15.2 d	8.8 a	3
2023	N0	79.4 ab	69.1 b	51.1 c	6.8 a	3.6 a	7.8 a	1.5 a	5.9 b	69 c	17.1 a	6.1 e	3
	N1	80.6 ab	70.7 a	53.4 b	6.8 a	3.6 a	7.5 a	1.4 a	6.9 a	71 c	16.6 ab	6.7 d	2
	N2	80.9 a	71.2 a	56.0 a	6.7 ab	3.5 a	6.2 b	1.0 b	7.0 a	73 bc	16.3 b	7.3 c	1
	N3	81.2 a	71.1 a	53.7 b	6.6 ab	3.5 a	6.1 b	1.1 b	7.1 a	76 ab	15.5 c	7.9 b	2
	N4	78.8 b	70.1 ab	51.9 c	6.5 b	3.4 a	4.6 c	0.9 b	7.0 a	79 a	15.1 c	8.9 a	3
方差分析 ANOVA	年份 Year(Y)	4.04	4.18	7.28*	1.03	0.66	0.12	2.51	0.25	0.89	0.13	0.02	
	施氮量 N rate(N)	8.90**	17.65**	22.82**	3.82*	1.40	38.68**	17.72**	4.19*	21.99**	35.61**	63.06**	
	Y×N	0.50	1.99	3.37	0.37	0.25	1.11	1.25	0.12	0.33	0.44	0.49	

表 8 不同栽培措施下华浙优 261 的主要生育时期(2023)

Table 8. Main growth periods of Huazheyou 261 under different cultivation measures in 2023									
栽培措施 Cultivation measure	处理 Treatment	播种期 Sowing date	移栽期 Transplanting date	始穗期 First heading date	齐穗期 Full heading date	成熟期 Maturity date	播种-齐穗期 S-F(d)	齐穗-成熟期 F-M(d)	全生育期 Whole growth period(d)
播期 Sowing date	S1	05-15	06-06	08-08	08-10	09-14	87	35	122
	S2	05-28	06-19	08-17	08-19	09-28	83	40	123
	S3	06-10	07-02	08-27	08-30	10-19	81	50	131
	S4	06-23	07-15	09-11	09-14	11-10	83	57	140
	平均值 Average						83.5	45.5	129.0
密度 Density	CV(%)						3.0	21.7	6.5
	D1	05-25	06-16	08-14	08-16	09-24	83	39	122
	D2	05-25	06-16	08-14	08-16	09-24	83	39	122
	D3	05-25	06-16	08-13	08-15	09-23	82	39	121
	D4	05-25	06-16	08-13	08-15	09-22	82	38	120
施氮量 N rate	D5	05-25	06-16	08-13	08-15	09-22	82	38	120
	平均值 Average						82.4	38.6	121.0
	CV(%)						0.7	1.4	0.8
	N0	05-25	06-16	08-10	08-12	09-15	79	34	113
	N1	05-25	06-16	08-12	08-14	09-19	81	36	117
	N2	05-25	06-16	08-13	08-15	09-21	82	37	119
	N3	05-25	06-16	08-14	08-16	09-23	83	38	121
	N4	05-25	06-16	08-14	08-16	09-25	83	40	123
	平均值 Average						81.6	37.0	118.6
	CV(%)						2.1	6.0	3.2

S-F, 播种-齐穗期; F-M, 齐穗-成熟期。CV, 变异系数。下同。
S-F, Sowing to full heading; F-M, Full heading to maturity. CV, Coefficient of variation. The same below.

最大分蘖数和有效穗数均呈上升趋势，但茎蘖成穗率降低，齐穗期的有效叶面积指数和高效叶面积指数及粒叶比(总粒重/叶面积)均呈先升后降的趋势，均以S3处理最高；随移栽密度增大，落田苗、最高苗、有效穗数和齐穗期的有效叶面积指数增加，单株最大分蘖数减少，茎蘖成穗率、高效叶面积指数和粒叶比均呈先升后降的趋势，这些指标基本以D2

处理最高；随施氮量增加，最高苗、单株最大分蘖数和齐穗期的有效叶面积指数增加，茎蘖成穗率和粒叶比降低，有效穗数和高效叶面积指数先增后减，以N3处理最高。

2.5 关键栽培措施对华浙优 261 叶片 SPAD 值的影响

图2显示，除N0处理外，其余不同栽培措施处

表9 不同栽培措施下华浙优261的茎蘖成穗率、叶面积指数和粒叶比(2023)

Table 9. Productive tiller percentage, leaf area index and grain/leaf ratio of Huazheyou 261 under different cultivation measures in 2023

栽培措施 Cultivation measure	处理 Treatment	落田苗 Basic seedling number ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	最高苗 Peak tiller number ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	单株最大分 蘖数 Maximum tiller number	有效穗数 Number of productive panicles ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	茎蘖成穗率 Productive tiller percentage (%)	齐穗期 Full heading stage		粒叶比 Ratio of grain to leaf(mg/cm ²)
							有效叶面积指数 Effective leaf area index	高效叶面积指数 Efficient leaf area index	
播期 Sowing date	S1	35.0 a	307.6 c	17.5 c	217.3 b	70.7 a	7.36 b	5.01 c	12.29 b
	S2	35.5 a	324.1 b	18.5 b	223.1 b	68.8 b	7.77 a	5.42 ab	12.46 a
	S3	36.3 a	344.1 a	19.7 a	233.8 a	67.9 b	7.86 a	5.66 a	12.51 a
	S4	36.7 a	355.3 a	20.3 a	235.4 a	66.2 c	7.55 b	5.23 bc	12.27 b
	平均值 Average	35.8	332.8	19.0	227.4	68.4	7.64	5.33	12.38
	CV(%)	2.1	6.4	6.7	3.8	2.7	2.9	5.2	1.0
密度 Density	D1	25.9 e	307.6 e	23.9 a	208.0 d	67.6 ab	7.07 c	4.79 d	12.81 a
	D2	31.6 d	322.8 d	20.8 b	221.4 c	68.6 a	7.48 b	5.61 ab	12.94 a
	D3	36.3 c	337.5 c	18.5 c	231.0 b	68.4 a	7.57 b	5.68 a	12.74 a
	D4	40.8 b	359.8 b	17.2 d	240.8 a	66.9 b	7.88 a	5.48 bc	11.91 b
	D5	47.1 a	378.1 a	16.0 e	245.4 a	64.9 c	7.93 a	5.35 c	11.39 c
	平均值 Average	36.3	341.2	19.3	229.3	67.3	7.59	5.38	12.36
施氮量 N rate	N0	36.5 a	230.3 d	12.8 d	164.4 d	71.4 a	4.78 e	3.67 e	13.60 a
	N1	35.3 a	292.7 c	16.6 c	205.2 c	70.1 ab	6.89 d	4.98 d	13.12 b
	N2	36.3 a	320.0 b	18.2 b	222.2 b	69.4 b	7.47 c	5.53 c	12.87 c
	N3	35.8 a	373.3 a	21.4 a	243.1 a	65.1 c	8.01 b	6.11 a	12.54 d
	N4	36.0 a	379.8 a	21.8 a	234.2 ab	61.7 d	8.38 a	5.89 b	10.89 e
	平均值 Average	36.0	319.2	18.2	213.8	67.5	7.11	5.23	12.60
	CV(%)	1.4	19.3	20.4	14.5	6.0	19.9	18.6	8.2

数据后不同小写字母表示 0.05 水平上差异显著，同列同种栽培措施内比较。下同。

The values with different lowercase letters in the same column and same cultivation measure show significant difference at 0.05 level. The same below.

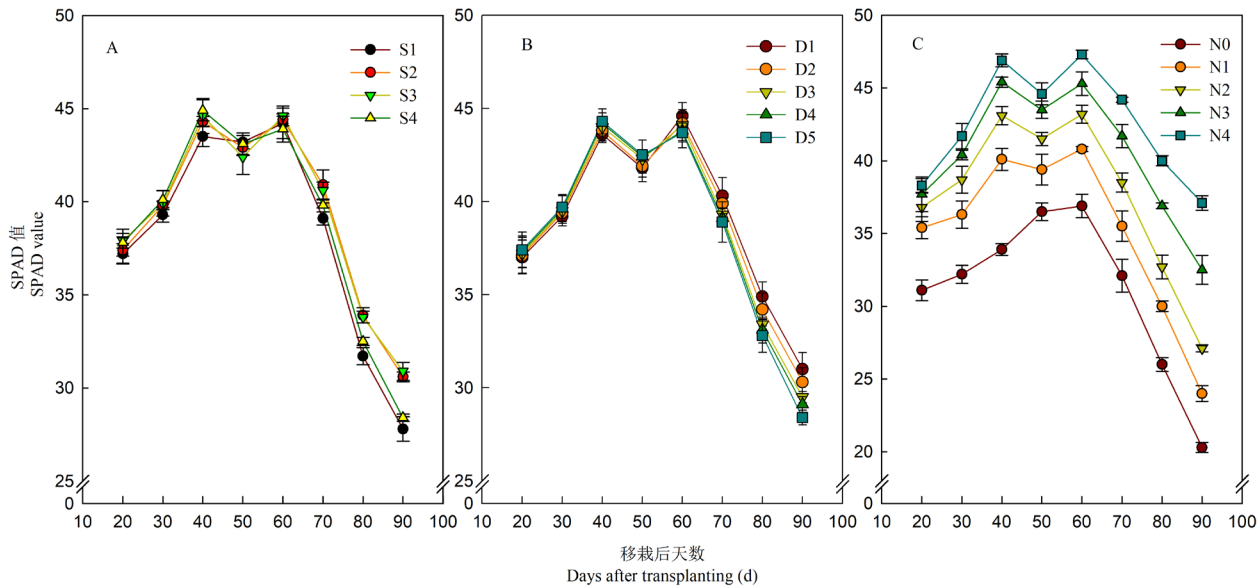


图2 不同栽培措施下华浙优261叶片SPAD值变化(2023)

Fig. 2. Changes in SPAD values of leaves of Huazheyou 261 under different cultivation measures in 2023

表10 不同栽培措施下华浙优261的干物质积累与收获指数(2023)

Table 10. Dry matter accumulation and harvest index of Huazheyou 261 under different cultivation measures in 2023

栽培措施 Cultivation measure	处理 Treatment	播种-齐穗期 S-F		齐穗-成熟期 F-M		成熟期 Maturity stage				收获指数 Harvest index
		干物质积累 量 DMA	群体生长率 PGR	干物质积累量 DMA	群体生长率 PGR	稻谷干质量 DWOGY	稻草干质量 DWORS	总干物质积累量 TDMA	群体生长率 PGR	
		(t/hm ²)	[kg/(hm ² ·d)]	(t/hm ²)	[kg/(hm ² ·d)]	(t/hm ²)	(t/hm ²)	(t/hm ²)	[kg/(hm ² ·d)]	
播期 Sowing date	S1	10.97 b	126.12 c	5.29 b	151.14 a	7.79 b	8.47 b	16.26 b	133.30 b	0.479 c
	S2	11.34 a	136.63 ab	5.78 a	144.50 a	8.39 a	8.73 a	17.12 a	139.19 a	0.490 b
	S3	11.35 a	140.15 a	5.81 a	116.20 b	8.55 a	8.61 ab	17.16 a	131.01 b	0.498 a
	S4	11.05 b	133.19 b	5.38 b	94.39 c	7.92 b	8.51 b	16.43 b	117.39 c	0.482 c
	平均值	11.18	134.02	5.57	126.56	8.16	8.58	16.74	130.22	0.487
	Average CV(%)	1.7	4.5	4.8	20.7	4.5	1.3	2.8	7.1	1.8
移栽密度 Transplanting density	D1	10.92 b	131.53 b	5.32 b	136.41 b	7.81 b	8.43 b	16.24 c	133.09 b	0.481 b
	D2	11.33 a	136.47 a	5.80 a	148.72 a	8.38 a	8.75 a	17.13 a	140.39 a	0.489 a
	D3	11.36 a	138.50 a	5.79 a	148.46 a	8.39 a	8.76 a	17.15 a	141.71 a	0.489 a
	D4	11.39 a	138.87 a	5.49 b	144.47 a	8.13 a	8.75 a	16.88 ab	140.64 a	0.482 b
	D5	11.40 a	138.97 a	5.28 b	138.95 b	7.86 b	8.82 a	16.68 b	138.96 a	0.471 c
	平均值	11.28	136.87	5.54	143.40	8.11	8.70	16.81	138.96	0.483
	Average CV(%)	1.8	2.3	4.5	3.9	3.4	1.8	2.2	2.5	1.5
施氮量 N rate	N0	7.81 c	98.82 c	3.88 d	114.12 d	5.53 d	6.16 c	11.69 d	103.42 c	0.473 b
	N1	10.69 b	131.96 b	5.52 c	153.33 c	7.75 c	8.46 b	16.21 c	138.54 b	0.478 b
	N2	11.20 a	136.64 a	5.88 b	158.92 b	8.30 b	8.78 b	17.08 b	143.57 a	0.486 a
	N3	11.42 a	137.63 a	6.27 a	165.00 a	8.67 a	9.02 b	17.69 a	146.23 a	0.490 a
	N4	11.45 a	137.92 a	6.29 a	157.25 b	7.92 c	9.82 a	17.74 a	144.21 a	0.447 c
	平均值	10.51	128.59	5.57	149.72	7.63	8.45	16.08	135.19	0.475
	Average CV(%)	14.7	13.1	17.9	13.6	16.1	16.3	15.8	13.3	3.6

DMA: 干物质积累量; TDMA: 总干物质积累量; PGR: 群体生长率; DWOGY: 稻谷干质量; DWORS: 稻草干质量。下同。

DMA, Dry matter accumulation; TDMA, Total dry matter accumulation; PGR, Population growth rate; DWOGY, Dry weight of grain yield; DWORS, Dry weight of rice straw. The same below.

理下的水稻叶片SPAD值在整个生育期内均呈“M”型变化,两个峰分别出现在移栽后40 d和60 d;不同施氮量处理间的SPAD值有明显差异,其余2种栽培措施的处理间差异主要表现在生育后期。

2.6 关键栽培措施对华浙优 261 干物质积累量与收获指数的影响

由表10可见,随播期推迟,华浙优261在各生育阶段的干物质积累量、群体生长率(齐穗-成熟期除外)及收获指数均呈先增后减的趋势,基本以S3处理最大;随移栽密度增大,在播种-齐穗期,干物质积累量增加、群体生长率上升,在齐穗-成熟期与成熟期的干物质积累量和群体生长率及收获指数均表现为先增后减的趋势,基本以D3处理最大,但与D2无显著差异;随施氮量增加,干物质积累量在各生育阶段均增加,齐穗-成熟期与成熟期的群体生长率及收获指数均表现为先增后减的趋势,均以N3处理最大。

2.7 关键栽培措施对华浙优 261 各生育时期温光资源配置与利用的影响

由表11可知,在播种-齐穗期,不同播期处理间

的日均气温和平均气温日较差变化较小,对于密度和施氮量,不同处理间的日均气温和平均气温日较差相同,除不同播期处理间的日照时数和不同施氮量处理间的有效积温变化较大外,其余处理间的有效积温和日照时数较稳定;齐穗-成熟期,不同播期处理间的日均气温和平均气温日较差变化较其余2种栽培措施大,对于有效积温和日照时数的变化,则是播期和施氮量大于移栽密度;全生育期,同一栽培措施的温光资源配置变化趋势与齐穗-成熟期基本一致;有效积温生产效率和日照时数生产效率在3种栽培措施中表现一致,均呈先升高后降低的趋势。

2.8 华浙优 261 产量与其构成因素、干物质积累及温光资源的关联性分析

2.8.1 产量与其构成因素的统计分析

由表 12 可见,无论何种栽培措施,总颖花量均与华浙优 261 产量极显著正相关,且其对产量的贡献作用最大。对于播期和施氮量,总颖花量与有效穗数、每穗粒数均显著正相关,且有效穗数与每穗粒数正相关,播期处理提高总颖花量的核心在于增加有效穗数或每穗粒数,而施氮量处理则以增加

表11 不同栽培措施下华浙优261各生育时期的温光资源配置与利用(2023)
Table 11. Allocation and utilization of resources of temperature and light in each growth period of Huazheyou 261 under different cultivation measures in 2023

栽培措施 Cultivation measure	处理 Treatment	播种-齐穗期 S-F				齐穗-成熟期 F-M			
		日均气温 ADT(°C)	平均气温日较 差 ATDR(°C)	有效积温 EAT(°C·d)	日照时数 SH(h)	日均气温 ADT(°C)	平均气温日较 差 ATDR(°C)	有效积温 EAT(°C·d)	日照时数 SH(h)
播期 Sowing date	S1	27.5	8.6	1330.0	591.4	26.9	8.2	549.8	221.0
	S2	28.2	8.7	1330.4	566.0	26.6	8.2	600.1	246.3
	S3	28.3	8.5	1323.2	563.9	24.2	8.5	620.9	242.3
	S4	28.2	8.5	1329.2	563.7	21.6	9.3	578.6	245.4
	平均值 Average	28.1	8.6	1328.2	571.2	24.8	8.6	587.4	238.7
密度 Density	CV(%)	1.5	1.0	0.3	2.4	9.9	5.9	5.2	5.0
	D1	28.1	8.7	1337.7	575.7	26.6	8.2	582.9	238.7
	D2	28.1	8.7	1337.7	575.7	26.6	8.2	582.9	238.7
	D3	28.1	8.7	1321.2	569.6	26.6	8.1	584.5	238.0
	D4	28.1	8.7	1321.2	569.6	26.7	8.3	572.4	237.6
施氮量 N rate	D5	28.1	8.7	1321.2	569.6	26.7	8.3	572.4	237.6
	平均值 Average	28.1	8.7	1327.8	572.0	26.6	8.2	579.0	238.1
	CV(%)	0.0	0.1	0.7	0.6	0.2	0.7	1.1	0.2
	N0	28.1	8.7	1272.2	552.6	26.8	8.2	517.7	214.3
	N1	28.1	8.7	1305.0	566.7	26.7	8.3	545.7	227.7
	N2	28.1	8.7	1321.2	569.6	26.7	8.3	560.1	235.5
	N3	28.1	8.7	1337.7	575.6	26.6	8.1	568.1	232.1
	N4	28.1	8.7	1337.7	575.6	26.6	8.3	598.9	245.4
	平均值 Average	28.1	8.7	1314.8	568.0	26.7	8.2	558.1	231.0
	CV(%)	0.0	0.2	2.1	1.7	0.4	1.0	5.3	4.9
栽培措施 Cultivation measure	处理 Treatment	全生育期 Whole growth period				有效积温生产效率 PEEAT[kg/(hm ² ·°C·d)]		日照时数生产效率 PESH[kg/(hm ² ·h)]	
		日均气温 ADT(°C)	平均气温日较 差 ATDR(°C)	有效积温 EAT(°C·d)	日照时数 SH(h)				
播期 Sowing date	S1	27.3	8.5	1879.8	812.4	4.81		11.14	
	S2	27.7	8.5	1930.5	812.3	5.01		11.91	
	S3	26.7	8.6	1944.1	806.2	5.06		12.20	
	S4	25.5	8.8	1907.8	809.1	4.85		11.45	
	平均值 Average	26.8	8.6	1915.6	810.0	4.93		11.67	
密度 Density	CV(%)	3.5	1.6	1.5	0.4	2.4		4.1	
	D1	27.6	8.5	1920.5	814.4	4.72		11.12	
	D2	27.6	8.5	1920.5	814.4	5.04		11.88	
	D3	27.6	8.5	1905.8	807.6	5.06		11.94	
	D4	27.6	8.6	1893.6	807.2	4.96		11.63	
施氮量 N rate	D5	27.6	8.6	1893.6	807.2	4.77		11.19	
	平均值 Average	27.6	8.5	1906.8	810.2	4.91		11.55	
	CV(%)	0.1	0.2	0.7	0.5	3.2		3.3	
	N0	27.7	8.5	1789.9	766.9	3.63		8.48	
	N1	27.7	8.6	1850.7	794.4	4.88		11.38	
	N2	27.7	8.6	1881.3	805.1	5.11		11.95	
	N3	27.6	8.5	1905.8	807.6	5.27		12.44	
	N4	27.6	8.6	1936.6	821.1	4.71		11.11	
	平均值 Average	27.7	8.6	1872.9	799.0	4.72		11.07	
	CV(%)	0.1	0.4	3.0	2.5	13.7		13.9	

MDT: 日均温; MDTR: 平均气温日较差; EAT: 有效积温; SH: 日照时数; PEEAT: 有效积温生产效率; PESH: 日照时数生产效率。下同。
MDT, Mean daily temperature; MDTR, Mean daily temperature range; EAT, Effective accumulated temperature; SH, Sunshine hour; PEEAT, Production efficiency of effective accumulated temperature; PESH, Production efficiency of sunshine hour. The same below.

有效穗数为主要途径; 对于密度, 构成总颖花量的两因素负相关, 需通过优化栽培密度寻求这两因素的平衡点(表 12)。

2.8.2 产量与干物质积累和温光资源间的相关分析

相关分析如表13所示, 除密度处理在播种-齐穗期外, 其余处理在各生育阶段的干物质积累量均与产量显著正相关。对于播期, 齐穗-成熟期和全生育期的有效积温均与产量显著正相关; 对于施氮

量, 播种-齐穗期的有效积温和日照时数均与产量显著正相关(表13)。

2.9 华浙优 261 稻米品质的综合评价

对稻米品质 11 个指标进行主成分分析, 提取 3 个特征值大于 1 的主成分, 其累积贡献率达到 81.86%(表 14), 可以较好地反映稻米综合性状。糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、碱消值和胶稠度在第 1 主成分上有较大的载荷, 直链淀粉含量和蛋白质含量在第 2 主成分上有较大的载

表 12 不同栽培措施下华浙优 261 产量及其构成因素间的相关分析和通径分析

Table 12. Correlation analysis and path analysis between grain yield and its components of Huazheyong 261 under different cultivation measures

栽培措施 Cultivation measure	产量构成因素 Yield components	相关系数 Correlation coefficient					直接通径系数 Direct path coefficient	
		x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	y	(Pi-y)	(Pi-x ₃)
播期 Sowing date	x ₁	0.241	0.789*	-0.857**	-0.325	0.416		0.637
	x ₂		0.786*	-0.088	0.648	0.408		0.633
	x ₃			-0.602	0.197	0.849**	1.130	
	x ₄				0.362	-0.184	0.287	
	x ₅					0.665	0.505	
密度 Density	x ₁	-0.935**	0.256	0.547	-0.674*	0.078		0.796
	x ₂		0.105	-0.556	0.647*	0.273		0.718
	x ₃			0.023	-0.124	0.961**	0.928	
	x ₄				-0.230	0.019	0.386	
	x ₅					0.085	0.593	
施氮量 N rate	x ₁	0.588	0.980**	-0.751*	-0.863**	0.941**		0.835
	x ₂		0.738*	-0.014	-0.261	0.816**		0.247
	x ₃			-0.626	-0.781**	0.988**	1.054	
	x ₄				0.934**	-0.500	0.291	
	x ₅					-0.686*	-0.038	

x₁: 有效穗数; x₂: 每穗粒数; x₃: 总颖花量; x₄: 结实率; x₅: 千粒重; y: 实际产量。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。下同。

x₁, Number of productive panicle; x₂, Spikelet number per panicle; x₃, Total amount of spikelets; x₄, Seed-setting rate; x₅, 1000-grain weight; y, Actual grain yield. * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

表 13 不同栽培措施下华浙优 261 产量与干物质积累和温光资源的相关分析(2023)

Table 13. Correlation analysis between grain yield of Huazheyong 261 and dry matter accumulation or resources of temperature and light under different cultivation measures in 2023

栽培措施 Cultivation measure	干物质积累量 DMA			有效积温 EAT			日照时数 SH		
	播种- 齐穗期	齐穗- 成熟期	全生育期	播种-齐 穗期 S-F	齐穗- 成熟期 F-M	全生育期	播种-齐 穗期 S-F	齐穗-成 熟期 F-M	全生育期
	S-F	F-M	Whole growth period	S-F	F-M	Whole growth period	S-F	F-M	Whole growth period
播期 Sowing date	0.987*	0.986*	0.987*	-0.638	0.980*	0.983*	-0.724	0.682	-0.538
密度 Density	0.439	0.987**	0.892*	0.030	0.482	0.237	0.030	0.196	0.054
施氮量 N rate	0.968*	0.945*	0.962*	0.902*	0.710	0.818	0.925*	0.749	0.849

荷，粒长和长宽比在第 3 主成分上有较大的载荷。

表 15 为不同栽培措施下稻米品质的隶属函数与综合得分值，结合两年的稻米品质表现，播期、密度和施氮量栽培措施下的最优处理分别为 S3、D3 和 N2。

3 讨论

3.1 关键栽培措施对华浙优 261 产量水平与干物质积累的影响

水稻产量由有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重共同决定，各因素对产量的贡献因栽培措施、土壤肥力和品种特性而异^[15-16]。本研究表明，无论采取何种栽培措施，优质超级稻华浙优 261 的总颖花量均与产量极显著正相关。通径分析证实，总颖花量是对产量贡献最大的直接因子。在最优栽培条

件下，该品种表现出最大的总颖花量(库容量最大化)，维持着较高的有效叶面积指数和最大的高效叶面积指数(源供应最优化)，并具有较高的粒叶比(物质转运高效化)。此时，结实率与千粒重的乘积也处于较高水平，4 个产量构成因素协调统一，共同促进产量提升。这正是 3 种栽培措施在最佳水平下实现增产的核心机制。比较各栽培措施下两年平均产量最高与最低处理：S3 较 S1 增产 0.79 t/hm²，增幅达 8.8%；D3 较 D1 增产 0.62 t/hm²，增幅达 6.8%；N3 较 N1 增产 1.02 t/hm²，增幅达 11.4%。表明施氮量对产量的调控效应最强，其次为播期和移栽密度。说明在不增加投入(氮肥或种子等)的前提下，优化播期可更高效利用温光资源以实现增产。

关于播期、密度和施氮量对水稻产量的影响机制，现有研究主要存在两种观点：一种认为产量随

表14 华浙优261稻米品质各指标主成分分析

Table 14. Principal component analysis of various rice quality indexes of Huazheyou 261			
指标 Index	第 1 主成分 Principal component 1	第 2 主成分 Principal component 2	第 3 主成分 Principal component 3
特征值 Eigenvalue	4.99	2.86	1.15
贡献率 Contribution rate(%)	45.37	26.01	10.48
累积贡献率 Cumulative contribution rate(%)	45.37	71.38	81.86
权重 Weight(%)	55.42	31.78	12.80
糙米率 Brown rice rate	0.73	0.49	-0.11
精米率 Milled rice rate	0.87	0.30	-0.17
整精米率 Head milled rice rate	0.82	0.40	-0.01
粒长 Grain length	0.06	0.14	0.95
长宽比 Length-width ratio	-0.12	0.29	0.89
垩白粒率 Chalky rate	0.87	-0.11	-0.03
垩白度 Chalkiness degree	0.92	-0.03	0.13
碱消值 Alkali spreading value	0.87	-0.12	0.09
胶稠度 Gel consistency	0.75	-0.30	-0.34
直链淀粉含量 Amylose content	-0.05	-0.82	-0.17
蛋白质含量 Protein content	-0.06	0.83	0.36

表15 不同栽培措施下华浙优261稻米品质的主成分和隶属函数值与综合得分

Table 15. Principal component value, membership function value and comprehensive score of rice quality of Huazheyou 261 under different cultivation measures															
栽培 措施 Cultivation measure	处理 Treatment	2022							2023						
		主成分 Comprehensive index			隶属函数 Membership function			综合得分 Compre- hensive score	主成分 Comprehensive index			隶属函数 Membership function			综合得分 Compre- hensive score
		F1	F2	F3	R1	R2	R3		F1	F2	F3	R1	R2	R3	
播期 Sowing date	S1	-2.63	-0.73	-0.66	0.00	0.48	0.26	0.18	-1.71	-0.43	-0.65	0.21	0.54	0.27	0.32
	S2	-0.15	-0.11	-0.20	0.58	0.60	0.39	0.56	0.46	-0.24	1.30	0.72	0.57	0.83	0.69
	S3	1.37	0.90	-0.29	0.93	0.80	0.37	0.82	1.67	0.92	-0.38	1.00	0.80	0.34	0.85
	S4	0.58	1.26	-0.27	0.75	0.80	0.37	0.72	0.47	1.93	-0.94	0.68	1.00	0.18	0.72
密度 Density	D1	-0.82	0.17	-0.39	0.42	0.65	0.34	0.48	-1.39	0.28	-0.54	0.29	0.68	0.30	0.41
	D2	-0.09	-0.30	-0.04	0.59	0.56	0.44	0.56	-0.16	0.06	-0.68	0.58	0.63	0.26	0.55
	D3	0.07	-0.02	-0.20	0.63	0.62	0.40	0.59	0.43	0.52	-0.90	0.71	0.72	0.19	0.65
	D4	0.22	0.18	-0.91	0.66	0.66	0.19	0.55	0.60	0.01	-0.68	0.75	0.52	0.26	0.61
	D5	-0.83	0.19	-0.91	0.42	0.66	0.19	0.47	-0.45	0.05	-1.58	0.51	0.63	0.00	0.48
施氮量 N rate	N0	-1.59	0.47	1.90	0.24	0.71	1.00	0.49	-0.85	0.92	1.70	0.41	0.80	0.94	0.60
	N1	-0.24	0.12	1.83	0.56	0.64	0.98	0.64	0.21	0.59	1.61	0.66	0.74	0.92	0.72
	N2	0.52	-0.22	1.71	0.73	0.58	0.95	0.71	0.81	0.44	0.25	0.80	0.71	0.53	0.74
	N3	1.22	-0.65	0.25	0.90	0.49	0.53	0.70	0.90	-0.69	-0.12	0.82	0.48	0.42	0.66
	N4	0.69	-3.15	0.69	0.77	0.00	0.65	0.51	0.71	-2.49	-0.92	0.78	0.13	0.19	0.50

这 3 种栽培措施水平的增加呈单调递增或递减趋势^[17-18]；另一种则认为其影响呈开口向下的抛物线分布^[19]，存在临界阈值和最佳水平区间。深入分析发现：前一种观点可能源于试验设计中处理水平梯度设置较小且范围较窄，仅反映了抛物线上升或下降的局部特征；而后一种观点则通过设置较大的水平梯度和处理水平范围(包含抛物线上升、下降区间及顶点)，完整揭示了产量的抛物线变化规律。本研

究结果支持后一种观点，通过回归分析建立了各措施的最优抛物线模型，确定了各栽培措施的最佳处理水平，为优质稻栽培提供了理论依据。一般认为减氮增密可维持产量并提高氮肥利用率^[20]。然而，本研究数据(表 2~表 3)显示：在纯氮用量减少 13.3%的前提下，与 N3 处理的两年平均产量相比，D3、D4 和 D5 处理(密度分别增加 3.6%、18.0%和 33.0%)的两年平均产量分别下降了 3.2%、5.9%和 9.0%。

表明华浙优 261 氮肥减施幅度应控制在 13.3% 以内, 且增密不宜过高。

华浙优 261 在浙东南地区表现出较广的适宜播期范围: 5 月底播种有利于推动两熟制“早稻-西兰花”向三熟模式“单季稻-西兰花-马铃薯”转型, 提高复种指数; 6 月上旬播种作为单季稻可实现优质米生产, 后茬搭配油菜或小麦; 6 月 10 日-6 月 15 日播种可作为早播连作晚稻, 前茬可搭配早熟早稻。灌浆期温度显示(表 11), 日均温从 26.9℃(S1)降至 21.6℃(S4)导致灌浆时间由 35 d 延长至 57 d(表 8), 灌浆速率下降, 反映该类杂交水稻对低温敏感。因此, 在生产中, 此类品种应避免过晚播种, 以防止灌浆期遭遇低温, 影响籽粒充实和最终产量。

干物质积累是水稻产量形成的重要物质基础。前人研究指出齐穗后干物质积累量与产量显著正相关^[21], 本研究再次验证了这一结论。在本研究中, 播期和移栽密度处理下, 产量随各生育阶段干物质积累量的增加而提升; 但在施氮量处理中, 高施氮量虽促进干物质积累, 却因无效分蘖增加、成穗率降低和贪青迟熟导致光合产物转运效率下降, 收获指数降低, 反而不利于产量形成。

3.2 关键栽培措施对华浙优 261 稻米品质的影响

稻米品质受遗传因素、生态环境和栽培措施共同调控^[22]。其中, 播期、密度和施氮量作为核心栽培调控措施, 通过显著影响籽粒灌浆过程与质量, 成为决定品质优劣的关键因子。受试验地点、品种特性和研究方法差异的影响, 前人关于这些措施对具体品质指标效应的研究结论存在分歧。普遍认为, 栽培措施对垩白粒率和垩白度调控最为显著, 对粒形和粒长影响较小, 而对整精米率、胶稠度和直链淀粉含量等性状的影响介于二者之间^[23]。本研究表明, 这 3 种栽培措施均不同程度地影响了华浙优 261 的稻米品质。

前人研究表明, 推迟播期降低加工与蒸煮食味品质, 但提升外观品质^[5], 或使加工品质和外观品质呈先升后降, 营养品质则因品种而异^[19]。本研究结果表明: 华浙优 261 的加工品质、外观品质和蒸煮食味品质随播期推迟均呈先升后降趋势。灌浆期温度是稻米品质形成的关键因子。近期有学者研究提出杂交水稻优质形成的适宜灌浆日均温为 23.6~26.5℃^[24], 本研究中 S3 处理灌浆期的日均温为 24.2℃, 米质最优达到部标优质 1 级, 其余播期灌浆期的日均温均在此范围之外, 米质等级下降到 2~3 级, 进一步验证了灌浆期此温度范围对杂交水

稻优质品质形成的适用性, 此温度范围可作为浙东南杂交水稻优质品质形成的最适灌浆期日均温。密度对品质的影响存在明显分歧: 有报道指出, 密度增大导致整精米率下降、蛋白质含量增加, 垩白度先降后升、胶稠度则呈现相反变化趋势^[25]; 也有研究发现糙米率先升后降, 整精米率、蛋白质含量下降, 垩白粒率和垩白度上升^[26]。本研究结果显示, 华浙优 261 的加工品质、外观品质及蒸煮食味品质随密度增大呈先升后降趋势, 这可能因密度过高或过低导致未熟粒或过熟粒比例增加, 从而降低整精米率、提高垩白度, 最终降低了稻米品质。普遍认为增施氮肥可提高整精米率与蛋白质含量, 降低垩白度和胶稠度^[25]; Fei 等^[27]进一步指出氮肥通过协调蛋白质与淀粉合成以减少垩白, 改善外观品质。然而具体响应趋势存在品种差异: 唐健等^[28]报道称随施氮量增加, 垩白粒率、垩白度降低, 长宽比增大, 蛋白质含量和胶稠度上升, 直链淀粉下降; 王颖娟等^[29]则发现糙米率、精米率、整精米率、垩白度和直链淀粉含量随施氮量增加呈现先增后减的趋势, 蛋白质含量增加。可见, 增施氮肥提高蛋白质含量是共识, 但对其余指标的影响存在争议。本研究结果支持施氮可改善外观品质、提高蛋白质含量和胶稠度, 降低直链淀粉含量, 加工品质则呈先升后降。此外, 在本研究三项措施中, 仅施氮量对粒长有显著影响, 可能与千粒重降低有关。

关于直链淀粉与蛋白质含量对食味值的影响, 目前主要存在三种观点: 1) 直链淀粉和蛋白质含量较低时食味更佳^[30]; 2) 直链淀粉含量在 13%~20% 范围内, 食味值随蛋白质含量增加而提升^[31-32]; 3) 降低直链淀粉含量同时提高蛋白质, 食味值先升后降^[33]。本研究在不同栽培措施(密度、播期、施氮量)下所呈现的直链淀粉与蛋白质含量变化模式, 分别为验证上述观点提供了试验依据。

在稻米品质综合评价方面, 本研究分别采用综合判定等级法(依据《食用稻品种品质》NY/T 593-2021 标准)和统计分析法(主成分分析结合隶属函数法)。尽管两种方法在本研究中的评价结果基本一致, 但其原理存在本质差异: 前者采用“最差指标定级”原则, 即若某一指标不符合某一等级要求, 则无论其他指标表现如何, 最终品质等级以该项最低指标为准, 虽操作简便但易受最低值限制, 且难以区分同等级内的品质差异; 后者基于统计学原理对多指标整合量化, 评价更为客观、区分度更高, 普适性和科学性更强。因此, 稻米品质统计分析法在实际应用中更具优势, 代表未来稻米品质综合评

价的发展方向。

3.3 关键栽培措施协同构建高产优质水稻群体

协同优化播期、密度、施氮量等关键栽培措施,以实现水稻产量、品质及资源利用效率的协同提升,是现代农业研究的核心目标。这些措施显著调控水稻的生长发育与产量品质形成,其综合效应较为复杂。因此,在确定处理水平时,应注重匹配对产量贡献最大的产量构成因素(如总颖花量)以及制约品质提升的关键指标(如整精米率和垩白度)。本研究采用以下策略:在固定两项措施于适宜水平的基础上,系统调节第三项措施的不同水平,从而明确各措施的优化区间,为构建华浙优 261 高产优质群体提供了科学理论依据。需要指出的是,本研究侧重于单一栽培措施的调控效应,不同措施间的交互作用仍有待进一步探讨。此外,本研究采用传统水育秧和手插移栽方式,水育秧有助于培育高素质秧苗,手插移栽能减轻植伤、加快活棵返青、降低漏插率,从而更容易获得高产^[34-35],为充分挖掘品种产量潜力提供了有利条件。

研究表明,任何栽培措施的处理水平偏离适宜范围,均会对产量与品质产生不利影响。如播期过度推迟、移栽密度过低或施氮量过高,均会导致无效分蘖增加、茎蘖成穗率降低、小穗增多、个体间竞争加剧以及抽穗不整齐,使得群体的均衡性和质量劣化^[36-37],削弱了生长后期群体的光合能力与籽粒灌浆质量,最终导致过熟粒和青瘪粒比例上升,产量和品质同步下降。

在移栽密度方面,本研究发现各处理间生育期较为一致,最大差异仅为 2 d,表明其生育进程所经历的光温资源总量基本相近。然而,群体质量与结构的差异导致温光资源利用效率、光合物质生产能力及籽粒灌浆质量存在显著不同,进而引起处理间产量和品质的显著差异,这一结果印证了群体效应大于个体效应的观点^[38]。关于产量与品质的协同潜力,传统观点认为同一品种难以同时实现高产与优质^[39]。但近期研究表明,通过栽培管理的优化,部分优质稻品种可实现产量与品质的协同提高^[40-41]。本研究结果支持这一观点,表明优质超级稻品种华浙优 261 具有同时实现高产优质的潜力,但其内在生理机制仍需进一步深入研究。

4 结论

关键栽培措施(播期、密度、施氮量)对优质超级稻华浙优 261 的产量、品质及生育特性均有显著

的调控作用。各栽培措施对产量的调控效应存在差异,表现为施氮量>播期>密度。总颖花量是决定产量的核心贡献因子。稻米品质综合评分随各栽培措施处理水平的变化均呈先提高后降低的趋势。主成分分析确定精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、碱消值和胶稠度为评价稻米品质的关键指标。基于产量与各栽培措施的二次曲线关系,在浙东南地区确定其优化调控区间:播期 5 月 28 日~6 月 15 日,在行距 30 cm 下株距为 19.3~23.3 cm,施氮量 176.6~209.8 kg/hm²。在此优化区间内:可显著增加华浙优 261 的总颖花量(库容量),并协同提升关键群体质量指标(高效叶面积指数、粒叶比、齐穗至成熟期的干物质积累量)和收获指数及温光资源生产效率,从而显著提高产量;同时能改善籽粒灌浆质量,提升稻米关键品质指标,最终实现稻米品质的优化。

参考文献:

- [1] 缪添惠,蔡芸菲,王晓峰,刘鑫,俞琦英,韩展誉,王仁杯. 浙江省优质稻品种发展现状与对策[J]. 中国稻米, 2024, 30(6): 82-86, 90.
Miao T H, Cai Y F, Wang X F, Liu X, Yu Q Y, Han Z Y, Wang R B. Development status and countermeasures of high quality rice varieties in Zhejiang Province[J]. *China Rice*, 2024, 30(6): 82-86, 90. (in Chinese with English abstract)
- [2] Zhu D W, Zhang H C, Guo B W, Xu K, Dai Q G, Wei H Y, Gao H, Hu Y J, Cui P Y, Huo Z Y. Effects of nitrogen level on yield and quality of japonica soft super rice[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5): 1018-1027.
- [3] 李艳兰,杨进成,李站阳,沈祥宏,张钟,李祥,朱自芬,李灶福,李红云,刘坚坚,胡新洲,史兰芬,邓争. 播期、密度和施氮量对旱种杂交稻产量和构成因子的影响[J]. 农学学报, 2023, 13(12): 1-7.
Li Y L, Yang J C, Li H Y, Shen X H, Zhang Z, Li X, Zhu Z F, Li Z F, Li H Y, Liu J J, Hu X Z, Shi L F, Deng Z. Effects of sowing date, density and nitrogen application on yield and component factors of dry cultivation of hybrid rice[J]. *Journal of Agriculture*, 2023, 13(12): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马义虎,何贤彪,朱练峰,余山红,张中熙. 播期对浙东南地区直播晚粳稻产量、生育期及温光利用的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(12): 2462-2473.
Ma Y H, He X B, Zhu L F, Yu S H, Zhang Z X. Effects of seeding dates on grain yield, growth period and utilization of temperature and sunshine of late japonica rice under the direct seeding in southeastern Zhejiang Province[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(12): 2462-2473. (in Chinese with English abstract)
- [5] 彭福燕,杨罗浩,高俊阳,夏方招,曹志刚,陈杰,姚璇,杨特武. 播期及秧龄对湖北二季晚粳产量和品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 105-112.
Peng F Y, Yang L H, Gao J Y, Xia F Z, Cao Z G, Chen J, Yao X, Yang T W. Effects of sowing date and seedling age on the yield and quality of two-season late japonica

- rice in Hubei Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [6] Deng F, Zhang C, He L H, Liao S, Li Q P, Li B, Zhu S L, Gao Y T, Tao Y F, Zhou W, Lei X L, Wang L, Hu J F, Chen Y, Ren W J. Delayed sowing date improves the quality of mechanically transplanted rice by optimizing temperature conditions during growth season[J]. *Field Crops Research*, 2022, 281: 108493.
- [7] Tian J Y, Li S P, Cheng S, Liu Q Y, Zhou L, Tao Y, Xing Z P, Hu Y J, Guo B W, Wei H Y, Zhang H C. Increasing the appropriate seedling density for higher yield in dry direct-seeded rice sown by a multifunctional seeder after wheat straw return[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(2): 400-416.
- [8] Zhang H, Zhang J H, Yang J C. Improving nitrogen use efficiency of rice crop through an optimized root system and agronomic practices[J]. *Crop and Environment*, 2023, 2(4): 192-201.
- [9] Luo J, Hang J N, Wu B L, Wei X L, Zhao Q Z, Fang Z M. Co-overexpression of genes for nitrogen transport, assimilation, and utilization boosts rice grain yield and nitrogen use efficiency[J]. *The Crop Journal*, 2023, 11(3): 785-799.
- [10] Ishfaq M, Wang Y Q, Xu J L, Hassan M U, Yuan H, Liu L L, He B Y, Ejaz I, White P J, Cakmak I, Chen W S, Wu J C, Wopke V D W, Li C J, Zhang F S, Li X X. Improvement of nutritional quality of food crops with fertilizer: A global meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(6): 43-74.
- [11] Zhou N B, Zhang J, Fang S L, Wei H Y, Zhang H C. Effects of temperature and solar radiation on yield of good eating-quality rice in the lower reaches of the Huai River Basin, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(7): 1762-1774.
- [12] Zhou Q, Yuan R, Zhang W Y, Gu J F, Liu L J, Zhang H, Wang Z Q, Yang J C. Grain yield, nitrogen use efficiency and physiological performance of *indica/japonica* hybrid rice in response to various nitrogen rates[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(1): 63-79.
- [13] 张玮, 严玲玲, 傅志强, 徐莹, 郭慧娟, 周梦瑶, 龙攀. 播期对湖南省双季稻产量和光热资源利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(1): 31-45.
- Zhang W, Yan L L, Fu Z Q, Xu Y, Guo H J, Zhou M Y, Long P. Effects of sowing date on yield of double cropping rice and utilization efficiency of light and heat energy in Hunan Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(1): 31-45. (in Chinese with English abstract)
- [14] Guo N H, An R H, Ren Z L, Jiang J, Cai B N, Hu S K, Shao G N, Jiao G A, Xie L H, Wang L, Zhao F L, Tang S Q, Sheng Z H, Hu P S. Developing super rice varieties resistant to rice blast with enhanced yield and improved quality[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2025, 23(1): 232-234.
- [15] Wang Y, Tang G, Fu W T, Chen J, Huang S, Sun Y N. Rice yield and nitrogen use efficiency: Different responses to soil organic matter between early and late rice[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(3): 5120-5129.
- [16] Zhang X Y, Wang Z H, Wang Y C, Tian X S, He K, Chen Z, Ying H, Yin Y L, Cui Z L. Contribution of nitrogen to main cereal crops yield and the key drivers in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 112: 107995.
- [17] Huang X F, Deng F, Zhang C, Li Q P, He Y X, He C Y, Ai X F, Yuan Y J, Wang L, Cheng H, Wang T, Tao Y F, Zhou W, Lei X L, Chen Y, Ren W J. Effect of sowing date on radiation and temperature use efficiencies of rice in the low-light region of China[J]. *Field Crops Research*, 2024, 309: 109329.
- [18] 吕宙, 易秉怀, 陈平平, 周文新, 唐文帮, 易镇邪. 施氮量与移栽密度对小粒型杂交水稻产量形成的影响[J]. *中国水稻科学*, 2024, 38(4): 422-436.
- Lü Z, Yi B H, Chen P P, Zhou W X, Tang W B, Yi Z X. Effects of nitrogen application rate and transplanting density on yield formation of small seed hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(4): 422-436. (in Chinese with English abstract)
- [19] 成臣, 曾勇军, 吕伟生, 谭雪明, 商庆银, 曾研华, 石庆华. 南方稻区优质晚粳稻产量和品质调优的播期效应[J]. *核农学报*, 2018, 32(10): 2019-2030.
- Cheng C, Zeng Y J, Lü W S, Tan X M, Shang Q Y, Zeng Y H, Shi Q H. Effect of sowing date on rice yield and quality of high-quality Japonica rice during the late-rice cropping seasons in Southern China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(10): 2019-2030. (in Chinese with English abstract)
- [20] 卢建祥, 高倩文, 高志强, 阳会兵, 文双雅, 石楠, 胡文瑞, 金宇豪, 陈龙, 刘芸, 曹正邓渊. 增密减肥处理对粳型杂交稻产量及生长发育的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(10): 2586-2598.
- Lu J X, Gao Q W, Gao Z Q, Yang H B, Wen S Y, Shi N, Hu W R, Jin Y H, Chen L, Liu Y, Caozheng D Y. Effect of high-density planting and fertilizer reduction on yield and growth and development of *indica* hybrid rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(10): 2586-2598. (in Chinese with English abstract)
- [21] Liu K, Zhou S Q, Li S Y, Wang J, Wang W L, Zhang W Y, Zhang H, Gu J F, Yang J C, Liu L J. Differences and mechanisms of post-anthesis dry matter accumulation in rice varieties with different yield levels[J]. *Crop and Environment*, 2022, 1(4): 262-272.
- [22] 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[J]. *Crop Science*, 2017, 57(4): 2183-2192.
- [23] 程方民, 钟连进. 不同气候生态条件下稻米品质性状的变异及主要影响因子分析[J]. *中国水稻科学*, 2001, 15(3): 187-191.
- Cheng F M, Zhong L J. Variation of rice quality traits under different climate conditions and its main affected factors[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2001, 15(3): 187-191. (in Chinese with English abstract)
- [24] Lu B, Xu C S, Li Z Y, Tang X N, Yang F, Xu D Z, Zhu G F, Zhang J, Jiang Y, Li W W, Liu Z H, Ding Y F, Li G H. Influence of the temperature during grain filling stage and nitrogen application rate on yield and quality of *indica* hybrid rice[J]. *Field Crops Research*, 2024, 309: 109333.
- [25] 李中希, 陈鸽, 傅岳峰, 李虎, 禹双双, 贺旭辉. 施氮量和栽插密度对优质超级稻盛泰优 722 产量及米质的影响[J]. *杂交水稻*, 2022, 37(4): 121-128.
- Li Z X, Chen G, Fu Y F, Li H, Yu S S, He X H. Effects of nitrogen rate and transplanting density on yield and grain quality of highquality super rice Shengtaiyou 722[J]. *Hybrid Rice*, 2022, 37(4): 121-128. (in Chinese with English abstract)

- [26] 吴子帅, 李虎, 黄秋要, 陈传华, 罗群昌, 周新明, 吴佳桔, 刘广林. 施氮量和栽插密度对桂育11号产量和稻米品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(8): 154-162.
Wu Z S, Li H, Huang Q Y, Chen C H, Luo Q C, Zhou X M, Wu J J, Liu G L. Influences of nitrogen fertilizer application rate and planting density on the yield and rice quality of Guiyu 11[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(8): 154-162. (in Chinese with English abstract)
- [27] Fei L W, Yang S C, Ma A, Lunzhu C, Wang M, Wang G J, Guo S W. Grain chalkiness is reduced by coordinating the biosynthesis of protein and starch in fragrant rice (*Oryza sativa* L.) grain under nitrogen fertilization[J]. *Field Crops Research*, 2023, 302: 109098.
- [28] 唐健, 唐闯, 郭保卫, 张诚信, 张振振, 王科, 张洪程, 陈恒, 孙明珠. 氮肥施用量对机插优质晚稻产量和稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 117-130.
Tang J, Tang C, Guo B W, Zhang C X, Zhang Z Z, Wang K, Zhang H C, Chen H, Sun M Z. Effect of nitrogen application on yield and rice quality of mechanical transplanting high quality late rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(1): 117-130. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王颖姮, 陈丽娟, 崔丽丽, 詹生威, 宋煜, 陈世安, 解振兴, 姜照伟, 吴方喜, 卓传营, 蔡秋华, 谢华安, 张建福. 施氮量对优质稻“福香占”光合特性、产量及品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(1): 89-101.
Wang Y H, Chen L J, Cui L L, Zhan S W, Song Y, Chen S A, Xie Z X, Jiang Z W, Wu F X, Zhuo C Y, Cai Q H, Xie H A, Zhang J F. Effects of nitrogen rate on photosynthesis, yield and grain quality of superior quality rice “Fuxiangzhan”[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(1): 89-101. (in Chinese with English abstract)
- [30] Yuan K J, Dong Y G, Sun W Q, Zhang L T, Asif M, Yu S B. *Ghd7.1* improves eating quality by reducing grain protein content in rice[J]. *The Crop Journal*, 2025, 13(4): 1145-1155.
- [31] Zhang D H, Cai Y P, Lao F, Wu J H. Protein structural properties, proteomics and flavor characterization analysis of rice during cooking[J]. *Food Chemistry*, 2025, 465: 142101.
- [32] Xu Y J, Ying Y N, Ouyang S H, Duan X L, Sun H, Jiang S K, Sun S C, Bao J S. Factors affecting sensory quality of cooked *japonica* rice[J]. *Rice Science*, 2018, 25(6): 330-339.
- [33] 张庆, 郭保卫, 胡雅杰, 张洪程, 徐玉峰, 徐晓杰, 朱邦辉, 徐洁芬, 钮中一, 涂荣文. 不同氮肥水平下优质高产软米粳稻的产量与品质差异[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(6): 606-616.
Zhang Q, Guo B W, Hu Y J, Zhang H C, Xu Y F, Xu X J, Zhu B H, Xu J F, Niu Z Y, Tu R W. Differences in yield and rice quality of soft japonica rice with high quality and high yield under different nitrogen levels[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(6): 606-616. (in Chinese with English abstract)
- [34] 唐承翰, 王晶卿, 陈惠哲, 张玉屏, 向镜, 张义凯, 王志刚, 怀燕, 陈佳峰, 王亚梁. 杂交稻条播育秧机插秧苗素质对产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(2): 245-254.
Tang C H, Wang J Q, Chen H Z, Zhang Y P, Xiang J, Zhang Y K, Wang Z G, Huai Y, Chen J F, Wang Y L. Effects of hybrid rice seedling quality in drill-seeding nursery on grain yield in mechanical transplanting[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2025, 39(2): 245-254. (in Chinese with English abstract)
- [35] 马义虎, 何贤彪, 陈剑, 汤学军, 王旭辉, 何豪豪, 金羽清, 齐文, 蒋海凌, 周翠. 秧龄对浙东南地区优质稻产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2023, 214(3): 116-125.
Ma Y H, He X B, Chen J, Tang X J, Wang X H, He H H, Jin Y Q, Qi W, Jiang H L, Zhou C. Effects of seedling ages on grain yield and quality of high quality rice in southeastern Zhejiang Province[J]. *Crops*, 2023, 214(3): 116-125. (in Chinese with English abstract)
- [36] 杜永林, 缪学宽, 李刚华, 张俊, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁艳锋. 江苏机插水稻大面积均衡增产共性特征分析[J]. 作物学报, 2014, 40(12): 2183-2191.
Du Y L, Miao X K, Li G H, Zhang J, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Ding Y F. Common characteristics of balanced yield increase in a large area of mechanical transplanted rice in Jiangsu Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(12): 2183-2191. (in Chinese with English abstract)
- [37] 唐承翰, 陈惠哲, 叶天承, 张玉屏, 向镜, 张义凯, 王志刚, 王亚梁. 机插种植均匀度对水稻产量构建及品质形成的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(10): 2625-2636.
Tang C H, Chen H Z, Ye T C, Zhang Y P, Xiang J, Zhang Y K, Wang Z G, Wang Y L. Effect of planting uniformity with machine on yield construction and quality formation of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(10): 2625-2636. (in Chinese with English abstract)
- [38] 陈云, 张亚军, 张宏路, 朱安, 黄健, 张耗, 顾骏飞, 刘立军, 杨建昌. 机插株距对优质食味水稻品种产量和群体质量的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(6): 550-560.
Chen Y, Zhang Y J, Zhang H L, Zhu A, Huang J, Zhang X, Gu J F, Liu L J, Yang J C. Effects of plant spacing on grain yield and population quality in mechanically-transplanted rice with good tasting quality[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(6): 550-560. (in Chinese with English abstract)
- [39] 雷振山, 李猛, 祁玲, 吴延洋, 刘娟, 杨俊霞, 肖荣英, 季新. 不同播期对豫南直播稻米品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(4): 654-660.
Lei Z S, Li M, Qi L, Wu Y Y, Liu J, Yang J X, Xiao R Y, Ji X. Effects of different sowing date on grain quality of direct seeding rice in southern Henan[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(4): 654-660. (in Chinese with English abstract)
- [40] 马义虎, 曾孝元, 何贤彪, 周奶弟, 陈剑. 浙东南地区优质稻产量与品质对不同播期气候因子的响应[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(4): 736-751.
Ma Y H, Zeng X Y, He X B, Zhou N D, Chen J. Response of grain yield and quality of high quality rice to climate factors at different sowing dates in southeastern Zhejiang Province, China[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(4): 736-751. (in Chinese with English abstract)
- [41] Li M, Zhu D W, Jiang M J, Luo D Q, Jiang X H, Ji G M, Li L J, Zhou W J. Dry matter production and panicle characteristics of high yield and good taste *indica* hybrid rice varieties[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(5): 1338-1350.