

油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻产量和品质的影响

于冰洁 王浩宇 葛语桐 崔格格 张海鹏 魏海燕 张洪程* 许方甫*

(江苏省作物栽培与生理重点实验室/江苏粮食作物现代生产技术协同创新中心/扬州大学 水稻产业工程技术研究所, 江苏 扬州 225009; *通信联系人, email: hc Zhang@yzu.edu.cn, xufangfu@yzu.edu.cn)

Effects of Increased Seedling Transplanting Density with Reduced Nitrogen Fertilizer Application Level on Grain Yield and Quality of Mid-maturing Late *japonica* Rice Under Rapeseed Straw Return

YU Bingjie, WANG Haoyu, GE Yutong, CUI Gege, ZHANG Haipeng, WEI Haiyan, ZHANG Hongcheng*, XU Fangfu*

(Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/ Jiangsu Co-innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; *Corresponding author, email: hc Zhang@yzu.edu.cn, xufangfu@yzu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】To explore the effects of increased basic seedling number and reduced nitrogen application on rice yield and quality, providing a scientific basis for green and high-efficiency rice production in Southern Jiangsu Province. 【Method】Using the mid-maturing late *japonica* cultivar Nanjing 46, a field experiment was conducted in a rice-rapeseed rotation system during 2023 and 2024. The experiment included two basic seedling number: D1 (conventional, 1.1×10^6 seedlings/hm²) and D2 (a 50% increase, 1.7×10^6 seedlings/hm²). These were factorially combined with three nitrogen fertilizer rates: N1 (conventional application level, 270 kg/hm²), N2 (15% reduction, 230 kg/hm²), and N3 (30% reduction, 190 kg/hm²). The investigation focused on the treatment effects on key agronomic traits: grain yield, dry matter accumulation, leaf area index, photosynthetic potential, and grain quality parameters. 【Results】The treatment with conventional seedling density and a 15% nitrogen reduction in nitrogen application (1.1×10^6 seedlings/hm², 230 kg/hm²) produced the highest yield, while the treatment with a 50% increase in seedling density and a 30% reduction in nitrogen fertilizer application (1.7×10^6 seedlings/hm², 190 kg/hm²) achieved a comparable yield. Compared to the conventional treatment (1.1×10^6 seedlings/hm², 270 kg/hm²), the treatment with a 50% increase seedling density and a 30% reduction in nitrogen fertilizer application increased two-year average yield by 1.53%. In terms of yield components, this primarily resulted from increased panicle number, seed-setting rate, and 1000-grain weight. Compared to the conventional treatment, the treatment with a 50% increase in seedling density and a 30% reduction in nitrogen fertilizer application resulted in an average increase of 7.48% in the leaf area index at the maturity stage over the two years, as well as average increases of 7.03% and 1.01% in photosynthetic potential and aboveground dry matter accumulation from the heading to maturity stages, respectively. Under the treatment, the brown rice rate, milled rice rate, and head rice rate decreased by an average of 4.07%, 4.51%, and 6.16% over the two years, respectively, while the appearance quality, cooking and eating quality, and starch pasting properties were significantly improved. 【Conclusion】Under rapeseed straw incorporation, the treatment with a 50% increase in seedling planting density and a 30% reduction in nitrogen fertilizer application achieved coordinated improvement in both rice yield and quality by balancing vegetative and reproductive growth, optimizing population biomass production and distribution efficiency, and promoting heading stage-maturity stage dry matter accumulation. **Keywords:** rice; straw incorporation; increased seedling transplanting density with reduced nitrogen application level; grain yield; quality traits

摘 要: 【目的】探究不同增苗减氮处理对水稻产量和品质的影响,为苏南地区水稻绿色高效生产提供科学依据。【方法】以中熟晚粳水稻(南粳46)为材料,在2023年和2024年选择稻油轮作的试验田,设置两种基本苗数(常规苗数: 1.1×10^6 苗/hm², 增苗50%: 1.7×10^6 苗/hm², 分别记为D1、D2)、三个氮肥施用量(以纯氮计270 kg/hm²、230 kg/hm²、190 kg/hm²,分别为常规施氮量,氮肥减施15%、氮肥减施30%,记为N1、N2、N3),分析其对水

收稿日期: 2025-10-07; 修改稿收到日期: 2025-12-24。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32372215, 32372212); 国家重点研发计划资助项目(2024YFD2300301); 常州市科技计划资助项目(CAIC(2023)005)。

稻产量、干物质积累量、叶面积指数、光合势及品质等性状的影响。【结果】常规苗数搭配氮肥减施 15%(1.1×10^6 苗/ hm^2 , 230 kg/hm^2)处理的产量最高;增苗 50%搭配氮肥减施 30%(1.7×10^6 苗/ hm^2 , 190 kg/hm^2)处理的产量与之相当。与常规处理(1.1×10^6 苗/ hm^2 , 270 kg/hm^2)相比,增苗 50%搭配氮肥减施 30%处理的两年平均产量提高了 1.53%。从产量构成要素来看,主要是提高了水稻的有效穗数、结实率和千粒重。与常规处理相比,增苗 50%搭配氮肥减施 30%处理在成熟期的叶面积指数两年平均提高了 7.48%,在抽穗期-成熟期光合势、地上部干物质积累量两年平均分别提高 7.03%、1.01%。增苗 50%搭配氮肥减施 30%处理下稻米的糙米率、精米率和整精米率两年平均分别降低了 4.07%、4.51%和 6.16%,稻米的外观品质、蒸煮食味品质及淀粉糊化特性均显著提高。【结论】油菜秸秆还田下,增苗 50%搭配氮肥减施 30%(1.7×10^6 苗/ hm^2 , 190 kg/hm^2)处理通过平衡营养生长与生殖生长,优化群体的物质生产与分配,促进花后物质积累,最终实现了水稻产量和品质的协同提升。

关键词: 水稻;油菜秸秆还田;增苗减氮;产量;品质

水稻是中国最主要的粮食作物之一,其高产、优质生产是我国水稻粮食安全的重要保障^[1]。水稻的高产、优质性状不仅与自身的遗传特性及环境条件有关,还受到栽培管理措施的综合调控^[2]。氮肥作为影响水稻生长发育的重要栽培措施,增加氮肥施用量能促进植株的氮素吸收利用及幼穗分化,从而促进增产^[3]。然而在农业生产上为了获得高产往往存在氮肥滥用的现象。另外,鉴于目前生产上应用的高产水稻品种往往是在施氮量较高的条件下选育而成,其抗倒伏性得到较明显的改良,这也在一定程度上助长了农民增施氮肥的倾向^[4]。目前,我国大部分地区水稻施氮量普遍较高,氮肥年投入约 630 万 t,约占全球氮肥施用量的 30%,而氮肥吸收利用率约为 41%,比发达国家低 10~20 个百分点^[5-6]。过量的氮肥施用不仅导致无效分蘖增多从而降低氮肥利用率,影响水稻的生长发育,还会引发水体富营养化、温室气体排放增加等一系列环境问题^[7-8]。因此,在保证粮食安全下减少氮肥投入具有积极作用。然而,氮肥施用量减少往往会导致水稻群体有效穗数减少,并伴有叶面积下降或叶片过早衰老,最终导致籽粒产量下降^[9]。

为实现减少氮肥施用量而不影响高产群体建立的目标,生产上往往结合其他栽培措施^[10]。基本苗数作为水稻栽培管理的主要调控方向之一,对协调植株个体发育、优化群体建成有重要的影响^[11-12]。增加基本苗数之所以能与减氮协同增效,关键在于它能够增加单位面积有效穗数、促进剑叶光合作用及光合产物向籽粒的转移与再分配,以此弥补减少氮肥施用量所造成的产量损失^[13]。因此合理的基本苗数、氮肥处理可以优化水稻群体的光截获能力,调节植株氮浓度,提高资源利用效率,从而促进水稻的高产高效^[14]。

除栽插基本苗数、氮肥施用量以外,秸秆还田作为我国正在推广的培肥方式之一,也对水稻的生长发育产生影响^[15]。秸秆腐解后,释放的 C、N、P

以有机质的形式储存在土壤中,可以缓解土壤酸化、提高土壤肥力、促进水稻生长^[16]。但在腐解前期水稻的生长受到一定的抑制,配施氮肥可缓解秸秆腐解与水稻生长的“争氮效应”、加快秸秆的腐解^[17]。然而过量施氮促进土壤碳排放,反作用于秸秆腐解^[18]。因此,在秸秆还田下探究增苗减氮处理对水稻生长发育的影响对农业绿色可持续发展具有重要意义。本研究以中熟晚粳水稻南粳 46 为材料,在油菜秸秆全量还田下设置多个增苗减氮处理,解析不同处理下中熟晚粳稻产量和品质的变化趋势,以期为苏南地区油菜秸秆还田下的增苗减氮管理策略提供科学依据,进一步实现水稻产量和品质的协同提升。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2023–2024 连续 2 年在扬州大学校外试验基地江苏省溧阳市南渡镇庆丰村(119.28° E, 31.45° N)进行。试验地前茬为油菜,土壤类型为黄壤土,耕作层(0–20 cm)土壤含有机质 27.9 g/kg,全氮 1.30 g/kg,速效磷 24.74 mg/kg,速效钾 281.24 mg/kg, pH 值 6.02。该试验地属亚热带季风气候,年均降水量为 1160 mm,年均温度为 15.5°C,年均日照时数为 1932 h。

1.2 试验设计

选择稻油轮作的试验田,前茬作物秸秆采用翻埋还田的方式全量还田。供试品种为中熟晚粳水稻南粳 46,小区面积为 40 m^2 。试验采用裂区设计,以施氮量为主区设置三种水平,分别为 N1(常规施氮量,即 270 kg/hm^2)、N2(氮肥减量 15%,即 230 kg/hm^2)、N3(氮肥减量 30%,即 190 kg/hm^2),各主区间筑埂并用黑色塑料薄膜包裹,实行单独排灌。以基本苗数为裂区设置两种水平:D1(每穴 4 苗, 1.1×10^6 苗/ hm^2)、D2(每穴 6 苗, 1.7×10^6 苗/ hm^2),

表 1 不同氮肥处理的施用量

Table 1. Application rates of different nitrogen fertilizer treatments				kg/hm ²
施氮水平	基肥	分蘖肥	穗肥	合计
N application level	Basal fertilizer	Fertilizer for tillering	Fertilizer for panicle initiation	Total
常规施氮 (N1)	95	95	81	270
氮肥减施 15% (N2)	66	95	69	230
氮肥减施 30% (N3)	38	95	57	190

N1, Regular fertilization; N2, 15% nitrogen fertilizer reduction; N3, 30% nitrogen fertilizer reduction.

栽插株行距为 11.8 cm×30 cm。供试肥料为尿素(纯 N 46%)过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、氯化钾(含 K₂O 60%)。氮肥运筹为 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{穗肥}}=7:3$, 其中固定分蘖肥为 95 kg/hm², 基肥、分蘖肥、穗肥分别于移栽前、移栽后 7d、叶龄余数 3.5 时施用(表 1)。磷钾肥按 N(纯 N):P(P₂O₅):K(K₂O)=2:1:2 施用, 其中磷肥一次性基施, 钾肥分别于移栽前和拔节期等量施入。水稻 2023 年于 5 月 16 日播种, 6 月 13 日移栽, 10 月 31 日收获; 2024 年于 5 月 20 日播种, 6 月 14 日移栽, 10 月 24 日收获。水分管理及病虫害防控参照当地高产栽培措施进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 茎蘖动态

于水稻返青后, 在每个小区内选择 10 个连续的植株并标记, 重复 3 次, 每 7 d 对水稻茎蘖数进行调查。

茎蘖成穗率=(成熟期穗数/分蘖盛期分蘖数)×100%。

1.3.2 地上部干物质量

分别在拔节期、抽穗期和成熟期在每个小区内根据平均茎蘖数取 20 株植株, 并将其分为茎、叶、穗(抽穗后)三部分后放入烘箱, 于 105℃烘 30 min, 之后于 80℃烘干至恒重后称取干物质量。

收获指数=产量/成熟期地上部干物质积累量×100%。

1.3.3 叶面积指数和光合势

根据各小区的每穴平均茎蘖数, 分别于拔节期、抽穗期和成熟期取样, 用比重法^[19]测定植株叶面积。

光合势(m² d/m²)=1/2×(L₁+L₂)×(t₂-t₁)。式中 L₁、L₂ 代表前后两个时期的叶面积指数, (t₂-t₁)代表两个时期相差的天数。

1.3.4 产量及其构成

按照成熟期考察的平均有效穗数, 各小区取 20 株水稻植株, 统计每穗粒数、结实率和千粒重, 在每个小区中心选取 1 m² 长势均匀的区域, 收割该区域内所有植株, 自然风干后脱粒, 含水量按 14.5% 换算, 计算产量。

1.3.5 稻米品质

在水稻收获晾干并保存 3 个月后, 根据 GB/T 17891-2017《优质稻谷》测定糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度等。采用凯氏定氮法测定米粉全氮的含量, 并乘以 5.95 的转换系数得到米粉的蛋白质含量^[20]。采用李冬梅等^[21]的方法测定稻米的直链淀粉及胶稠度。使用食味分析仪(STA1A, 日本佐竹公司)测定米饭的食味品质。淀粉的糊化特性: 使用快速黏度分析仪测定, TWC 软件数据分析。

1.4 数据处理及分析

所有的数据使用 Microsoft Excel 2019 进行整理, 使用 SPSS 26.0 进行方差分析, 并使用最小显著差异法(LSD)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻产量及其构成要素的影响

基本苗数和氮肥水平均对水稻产量影响显著(表 2)。在 N1、N2 条件下, 水稻产量随基本苗数的增加而降低, D2 处理的两年平均产量分别较 D1 处理下降了 4.24%、2.60%。在 N3 条件下, 产量随基本苗数的增加呈上升趋势, D2 处理的两年平均增幅达 10.17%。在 D1 处理下, 随施氮量减少, 产量呈先增后降的趋势, 在 N2 处理最高, 其两年平均产量较 N1 处理显著提高了 1.90%; 而 N3 处理较 N1 处理显著减产 7.84%。在 D2 处理下, 水稻产量随施氮量减少而逐渐提高。与 N1 处理相比, N2、N3 处理的两年平均产量分别增加 3.65%、6.03%, 且均达到显著水平。综合分析表明, D1N2 处理的水稻产量最高, 但 D2N3 处理的产量与之相当, 且无显著差异。与当地常规 D1N1 处理相比, D2N3 处理的两年平均产量提高了 1.53%。

由表 2 可知, 在相同施氮量下, 增加基本苗数提高了水稻的有效穗数, 但每穗粒数、结实率及千粒重均有所下降。D2 处理的两年平均有效穗数较 D1 处理提高了 1.90%~15.05%, 而每穗粒数、结实

表 2 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻产量及其构成因子的影响

Table 2. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on yield and its components in mid-maturing late japonica rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedling	氮肥水平 Nitrogen level	有效穗数 Panicle number (10 ⁴ /hm ²)	每穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed-setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight(g)	产量 Grain yield (t/hm ²)
2023	D1	N1	379.50 bc	134.60 a	86.80 d	25.23 abc	10.99 b
		N2	374.85 c	130.91 bc	90.64 b	25.59 abc	11.16 a
		N3	340.73 d	123.82 d	93.11 a	26.20 a	10.06 d
	D2	N1	387.90 ab	133.27 b	85.51 d	24.42 c	10.45 c
		N2	380.63 bc	128.56 c	89.36 c	25.20 bc	10.89 b
		N3	391.28 a	121.35 c	92.25 a	25.79 ab	11.12 ab
2024	D1	N1	388.43 c	140.92 a	80.24 e	24.95 b	10.68 b
		N2	384.30 c	138.65 b	82.29 c	25.24 b	10.92 a
		N3	349.88 d	132.31 d	85.03 a	26.11 a	9.90 d
	D2	N1	402.15 ab	139.19 ab	78.79 f	24.03 c	10.29 c
		N2	393.00 bc	136.20 c	81.30 d	24.70 bc	10.61 b
		N3	403.28 a	128.64 c	83.49 b	25.38 ab	10.88 a
年份 Year(Y)			61.17**	460.24**	2211.72**	10.81**	92.93**
密度 Planting density(D)			276.14**	56.72**	47.62**	38.24**	13.47**
氮肥 Nitrogen level(N)			57.36**	322.04**	362.75**	46.90**	99.41**
Y×D			ns	ns	ns	ns	ns
Y×N			ns	ns	6.22*	ns	ns
D×N			103.16**	ns	ns	ns	367.35**
Y×D×N			ns	ns	ns	ns	ns

D1: 12×10⁵ 株/hm²; D2: 18×10⁵ 株/hm²; N1: 常规施肥; N2: 氮肥减施 15%; N3: 氮肥减施 30%。不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著, ns 表示无显著差异。

D1, 12×10⁵ hill/hm²; D2, 18×10⁵ hill/hm²; N1, Regular fertilization; N2, 15% nitrogen fertilizer reduction; N3, 30% nitrogen fertilizer reduction. Different letters indicate significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference.

率及千粒重则平均分别降低了 1.10%~2.39%、1.31%~1.65%、1.83%~3.43%。在 D1 处理下, 减少施氮量降低了水稻的有效穗数。与 N1 处理相比, N2、N3 处理的两年平均有效穗数分别降低了 1.14%、10.07%。在 D2 处理下, 随施氮量减少, 水稻的有效穗数呈先降后增的趋势, 在 N3 处理最高, 其两年平均有效穗数较 N1 处理显著提高了 0.57%; N2 处理则较 N1 处理两年平均降低了 2.08%。在相同基本苗数处理下, 减少施氮量降低了水稻的每穗粒数, 提高了结实率和千粒重。与 N1 处理相比, 相同基本苗数的 N2、N3 处理两年平均每穗粒数分别显著降低了 2.51%、7.66%, 结实率平均分别显著提高了 3.67%、6.77%, 千粒重平均分别提高了 2.14%、4.93%。

2.2 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻茎蘖动态的影响

基本苗数和氮肥水平均对水稻的茎蘖动态和成穗率影响显著(表 3)。在相同施氮量下, 茎蘖数随基本苗数的增加呈上升趋势。D2 处理在分蘖盛期、

拔节期和抽穗期的两年平均茎蘖数较 D1 处理分别提高了 4.73%~11.35%、2.80%~5.90%、3.17%~12.75%。在 D1 处理下, 各生育期茎蘖数随施氮量减少逐渐降低; 而在 D2 处理下, 抽穗期和成熟期的茎蘖数随施氮量减少呈先降后增的趋势, 并在 N3 处理下最高。

由表 3 可知, 在 N1、N2 条件下, 成穗率随基本苗数增加而显著降低。在 N3 条件下, D2 处理的两年平均成穗率较 D1 处理显著提高了 3.32%。在相同基本苗数处理下, 成穗率随施氮量减少而提高。与 N1 处理相比, 相同基本苗数的 N2、N3 处理两年平均成穗率分别显著提高了 6.62%、7.48%。综合分析表明, D2N3 处理的成穗率最高, 较当地常规 D1N1 处理两年平均提高了 14.96%。

2.3 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻叶面积指数及光合势的影响

基本苗数和氮肥水平均对水稻的叶面积指数和光合势影响显著(表 4)。在相同施氮量下, 各生育期叶面积指数均随基本苗数增加而上升, D2 处理

表 3 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻茎蘖动态和成穗率的影响

Table 3. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on tiller dynamics and productive tillers in mid-maturing late japonica rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedlings	氮肥水平 Nitrogen level	分蘖盛期 Peak tillering stage (×10 ⁴ /hm ²)	拔节期 Jointing stage (×10 ⁴ /hm ²)	抽穗期 Heading stage (×10 ⁴ /hm ²)	成熟期 Maturity stage (×10 ⁴ /hm ²)	成穗率 Productive tiller percentage(%)
2023	D1	N1	614.73 b	431.10 b	386.65 bc	379.50 bc	61.73 e
		N2	546.13 c	406.87 d	383.66 c	374.85 c	68.64 c
		N3	489.47 d	392.00 f	352.70 d	340.73 d	69.61 b
	D2	N1	639.86 a	444.12 a	395.67 a	387.90 ab	60.62 f
		N2	604.10 b	420.72 c	391.98 ab	380.63 bc	63.01 d
		N3	544.65 c	399.50 e	397.67 a	391.28 a	71.84 a
2024	D1	N1	635.76 b	458.51 b	401.50 cd	388.43 c	61.10 e
		N2	582.97 c	436.98 d	391.59 d	384.30 c	65.92 c
		N3	521.73 d	396.95 e	373.30 e	349.88 d	67.06 b
	D2	N1	669.88 a	473.78 a	417.58 ab	402.15 ab	60.03 f
		N2	632.70 b	446.62 c	409.29 bc	393.00 bc	62.11 d
		N3	581.34 c	436.17 d	420.86 a	403.28 a	69.37 a
年份 Year(Y)			156.94**	624.71**	184.78**	61.17**	108.84**
密度 Planting density(D)			362.31**	252.77**	342.17**	276.14**	56.51**
氮肥 Nitrogen level(N)			614.05**	656.78**	40.37**	57.36**	998.49**
Y×D			ns	22.72**	6.01*	ns	ns
Y×N			ns	5.88*	4.32*	ns	12.35**
D×N			12.45**	11.79**	74.34**	103.16**	164.74**
Y×D×N			ns	28.86**	ns	ns	ns

不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著；ns 表示在 0.05 的概率水平上无显著差异。

Different letters indicated significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference.

表 4 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻叶面积指数及光合势的影响

Table 4. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on leaf area index and leaf area duration in mid-maturing late japonica rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedlings	氮肥水平 Nitrogen level	叶面积指数 Leaf area index			光合势 Leaf area duration (m ² · d m ⁻²)			
			拔节期	抽穗期	成熟期	播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟	
			Jointing stage	Heading stage	Maturity stage	SO-JT	JT-HD	HD-MA	
2023	D1	N1	4.95 b	7.44 b	3.57 c	185.76 b	204.61 b	272.90 c	
		N2	4.59 c	7.17 c	3.41 d	172.18 c	194.14 c	264.58 d	
		N3	4.43 d	6.90 d	3.07 e	166.12 d	187.07 d	249.45 e	
	D2	N1	5.27 a	7.72 a	3.68 b	197.74 a	214.50 a	285.66 b	
		N2	5.03 b	7.47 b	3.59 bc	188.80 b	206.31 b	276.93 c	
		N3	5.01 b	7.79 a	3.85 a	188.08 b	211.43 a	291.28 a	
	2024	D1	N1	4.48 b	6.98 d	3.49 b	167.99 b	189.08 c	258.70 c
			N2	4.17 c	6.79 e	3.22 c	156.27 c	180.82 d	250.29 d
			N3	3.90 d	6.48 f	2.86 d	146.46 d	171.38 e	233.68 e
D2		N1	4.81 a	7.22 b	3.60 ab	180.50 a	198.54 a	270.62 b	
		N2	4.60 b	7.10 c	3.50 b	172.76 b	193.22 b	265.15 c	
		N3	4.56 b	7.37 a	3.73 a	171.16 b	196.96 a	277.62 a	
年份 Year(Y)			329.38**	275.36**	54.07**	355.95**	939.09**	320.85**	
密度 Planting density(D)			334.18**	350.46**	512.61**	340.38**	1066.42**	796.75**	
氮肥 Nitrogen(N)			87.18**	27.94**	51.27**	89.43**	162.82**	69.64**	
Y×D			ns	ns	ns	ns	ns	ns	
Y×N			ns	ns	ns	ns	ns	ns	
D×N			11.34**	61**	163.48**	11.75**	97.3**	186.6**	
Y×D×N			ns	ns	ns	ns	ns	ns	

不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著；ns 表示在 0.05 的概率水平上无显著差异。

Different letters indicated significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference. SO, Sowing; JT, Jointing; HD, Heading; MA, Maturity.

在拔节期、抽穗期和成熟期的两年平均叶面积指数较 D1 处理分别显著提高了 6.95%~15.04%、3.60%~13.32%和 3.21%~27.86%。在 D1 处理下，各生育期叶面积指数随施氮量减少呈下降趋势，N2 处理在各生育期的两年平均叶面积指数较 N1 处理分别显著降低了 7.14%、3.18%和 6.09%；N3 处理则

较 N1 处理两年平均分别显著降低了 11.69%、7.19% 和 15.91%。在 D2 处理下，随着施氮量减少，拔节期叶面积指数逐渐降低，而抽穗期和成熟期的叶面积指数呈先降后增的趋势，且在 D2N3 处理下最大；与当地常规 D1N1 处理相比，其抽穗期和成熟期叶面积指数两年平均分别提高了 5.17%、7.48%。

由表 4 可知，在相同施氮量下，各阶段光合势均随基本苗数的增加而上升，D2 处理在播种-拔节期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期的两年平均光合势较 D1 处理分别显著提高了 6.95%~15.04%、4.92%~13.97% 和 4.64%~17.79%。在 D1 处理下，各阶段光合势随施氮量减少而降低；在 D2 处理下，播种-拔节期的光合势随施氮量减少呈下降趋势，而拔节-抽穗期、抽穗-成熟期的光合势则呈先降后升的趋势。N2 处理在拔节-抽穗期、抽穗-成熟期的两年平均光合势较 N1 处理分别显著降低了 3.25%、2.54%；N3 处理在拔节-抽穗期的两年平均光合势显著降低了 1.11%，而在抽穗-成熟期的两年平均光合势显著提高了 2.28%。综合分析表明，抽穗-成熟期的光合势

在 D2N3 处理下达到最大，较当地常规 D1N1 处理两年平均提高了 7.03%。

2.4 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻地上部干物质积累及收获指数的影响

基本苗数和氮肥水平均对水稻地上部干物质积累量和收获指数影响显著(表 5)。在相同施氮量下，拔节期、抽穗期和成熟期的地上部干物质积累量均随基本苗数增加而显著提高，D2 处理在各生育期的两年平均地上部干物质积累量较 D1 处理分别提高了 6.90%~12.13%、4.98%~6.17% 和 1.82%~5.97%。在相同基本苗数处理下，各生育期地上部干物质积累量均随施氮量减少而显著降低。N2 处理在各生育期的两年平均地上部干物质积累量较 N1 处理分别降低了 11.70%、9.57% 和 4.93%；N3 处理则较 N1 处理两年平均分别降低了 25.20%、18.20% 和 11.61%。

在 N1、N2 条件下，收获指数随基本苗数增加呈下降趋势；而在 N3 条件下呈相反的变化。在 D1 处理下，收获指数随施氮量减少呈先升后降的趋

表 5 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻干物质积累量及收获指数的影响

Table 5. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on dry matter weight and harvest index in mid-maturing late japonica rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedlings	氮肥水平 Nitrogen level	干物质积累量 Dry matter accumulation				收获指数 Harvest index (%)
			拔节期 Jointing stage (t/hm ²)	抽穗期 Heading stage (t/hm ²)	成熟期 Maturity stage (t/hm ²)	抽穗-成熟 HD-MA (t/hm ²)	
2023	D1	N1	5.21 b	12.22 b	19.59 b	7.36 b	47.97 e
		N2	4.45 d	11.05 d	18.54 d	7.48 a	51.48 c
		N3	3.72 f	10.00 f	16.87 f	6.87 d	51.00 c
	D2	N1	5.62 a	12.84 a	19.86 a	7.02 c	45.01 f
		N2	4.95 c	11.75 c	19.06 c	7.31 b	48.88 d
		N3	4.13 e	10.50 e	17.97 e	7.47 a	52.90 a
2024	D1	N1	4.85 b	11.91 b	19.15 b	7.24 b	47.67 e
		N2	4.38 d	10.73 d	18.13 d	7.40 a	51.49 b
		N3	3.62 f	9.82 f	16.68 f	6.87 c	50.75 c
	D2	N1	5.14 a	12.69 a	19.58 a	6.89 c	44.93 f
		N2	4.59 c	11.38 c	18.61 c	7.23 b	48.74 d
		N3	4.10 e	10.30 e	17.59 e	7.29 ab	52.89 a
年份 Year(Y)			142.69**	29.68**	37.60**	36.50**	ns
密度 Planting density(D)			395.22**	177.75**	116.01**	ns	191.34**
氮肥 Nitrogen level(N)			1549.00**	787.96**	523.69**	84.95**	1470.68**
Y×D			9.91**	ns	ns	ns	ns
Y×N			27.90**	ns	ns	ns	ns
D×N			ns	ns	11.85**	248.19**	356.58**
Y×D×N			7.44**	ns	ns	ns	ns

不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著；ns 表示在 0.05 的概率水平上无显著差异。

Different letters indicated significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference.

表 6 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻加工品质的影响

Table 6. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on grain processing quality in mid-maturing late japonica rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedling	氮肥水平 Nitrogen level	糙米率 Brown rice rate(%)	精米率 Milled rice rate (%)	整精米率 Head rice rate (%)	
2023	D1	N1	87.66 a	76.99 a	68.76 a	
		N2	85.93 bc	75.97 c	67.13 b	
		N3	84.75 d	74.34 e	65.49 c	
	D2	N1	86.46 b	76.46 b	68.24 a	
		N2	85.36 cd	75.24 d	66.57 b	
		N3	83.96 e	73.69 f	64.75 c	
	2024	D1	N1	85.21 a	75.55 a	67.56 a
			N2	84.18 b	74.73 b	66.14 b
			N3	82.62 d	72.53 d	63.70 cd
D2		N1	84.65 ab	75.03 ab	66.97 ab	
		N2	83.47 c	73.88 c	64.73 c	
		N3	81.86 e	71.98 d	63.18 d	
年份 Year(Y)			280.52**	131.51**	17.64**	
密度 Planting density(D)			40.00**	23.92**	4.39*	
氮肥 Nitrogen level(N)			166.39**	164.75**	36.61**	
Y×D			ns	ns	ns	
Y×N			ns	ns	ns	
D×N			ns	ns	ns	
Y×D×N			ns	ns	ns	

不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著；ns 表示在 0.05 的概率水平上无显著差异。

Different letters indicated significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference.

势，以 N2 处理最高，其两年平均收获指数较 N1 处理显著提高了 7.67%。在 D2 处理下，收获指数随施氮量减少而显著提高。综合分析表明，D2N3 处理的收获指数最高，较当地常规 D1N1 处理两年平均提高 10.61%。

2.5 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻品质的影响

2.5.1 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻加工品质的影响

在相同施氮量下，水稻籽粒的糙米率、精米率和整精米率均随基本苗数增加而呈下降趋势，但未达到显著水平(表 6)，D2 处理的两年平均糙米率、精米率和整精米率较 D1 处理分别降低了 0.75%~1.01%、0.69%~1.05%和 0.82%~1.48%。在相同基本苗数处理下，糙米率、精米率和整精米率均随施氮量减少而显著降低。与 N1 处理相比，相同基本苗数的 N2、N3 处理两年平均糙米率分别降低了 1.46%、3.14%，精米率平均分别降低了 1.39%、3.78%，整精米率平均分别降低了 2.57%，5.32%。综合分析表明，D2N3 处理下的加工品质最差。与当地常规 D1N1 处理相比，其糙米率、精米率和整精米率两年平均分别降低了

4.07%、4.51%和 6.16%。

2.5.2 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻外观品质的影响

在相同施氮量下，增加基本苗数降低了水稻籽粒的长宽比，同时提高了垩白粒率和垩白度，但均未达到显著水平(表 7)。D2 处理的两年平均籽粒长宽比较 D1 处理下降了 0.21%~0.31%，而垩白粒率和垩白度分别提高了 1.51%~3.75%、1.77%~5.53%。在相同密度处理下，减少施氮量提高了籽粒的长宽比，但未达到显著水平；而垩白粒率和垩白度则显著降低。与 N1 处理相比，相同基本苗数的 N2、N3 处理两年平均籽粒长宽比分别提高了 0.63%、1.01%，垩白粒率平均分别降低了 4.34%、9.52%，垩白度平均分别降低了 6.75%、15.98%。综合分析表明，与当地常规 D1N1 处理相比，D2N3 处理显著改善了水稻的外观品质，其垩白粒率与垩白度两年平均分别降低了 7.16%、11.84%。

2.5.3 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻营养品质的影响

在相同施氮量下，水稻籽粒的蛋白质含量、直链淀粉含量和胶稠度均随基本苗数增加而提高，但

表 7 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻外观品质的影响
Table 7. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on appearance quality in mid-maturing late japonica rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedling	氮肥水平 Nitrogen level	长宽比 Length to width ratio	垩白粒率 Chalky grain rate (%)	垩白度 Chalkiness degree (%)
2023	D1	N1	1.678 a	22.38 ab	7.74 ab
		N2	1.687 a	21.41 cd	7.33 bc
		N3	1.692 a	19.78 e	6.39 d
	D2	N1	1.673 a	22.79 a	8.09 a
		N2	1.684 a	21.77 bc	7.44 ab
		N3	1.689 a	20.89 d	6.66 cd
	D1	N1	1.781 a	24.03 a	9.10 ab
		N2	1.795 a	22.84 bc	8.57 bc
		N3	1.804 a	21.77 d	7.69 d
2024	D1	N1	1.779 a	24.31 a	9.48 a
		N2	1.789 a	23.44 ab	8.74 bc
		N3	1.796 a	22.22 cd	8.21 cd
	D2	N1	1.779 a	24.31 a	9.48 a
		N2	1.789 a	23.44 ab	8.74 bc
		N3	1.796 a	22.22 cd	8.21 cd
	D1	N1	1.781 a	24.03 a	9.10 ab
		N2	1.795 a	22.84 bc	8.57 bc
		N3	1.804 a	21.77 d	7.69 d
年份 Year(Y)			280.34**	150.25*	183.86**
密度 Planting density(D)			ns	16.38*	9.05*
氮肥 Nitrogen level(N)			ns	96.06**	62.33**
Y×D			ns	ns	ns
Y×N			ns	ns	ns
D×N			ns	ns	ns
Y×D×N			ns	ns	ns

不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著；ns 表示在 0.05 的概率水平上无显著差异。
Different letters indicate significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference.

各项指标的变化均未达到显著水平(表 8)，D2 处理的两年平均蛋白质含量、直链淀粉含量和胶稠度较 D1 处理分别提高了 3.73%~5.14%、3.20%~4.24%和 0.98%~3.35%。在相同基本苗数处理下，减少施氮量降低了籽粒的蛋白质含量，但显著提高了籽粒的直链淀粉含量和胶稠度。与 N1 处理相比，相同基本苗数的 N2、N3 处理两年平均蛋白质含量分别降低了 5.06%、9.41%，而直链淀粉含量平均分别提高了 7.20%、6.36%，胶稠度平均分别提高了 3.69%、2.40%。综合分析表明，与当地常规 D1N1 处理相比，D2N3 处理的直链淀粉含量和胶稠度两年平均分别提高了 18.26%、8.77%，蛋白质含量则平均降低了 5.33%。

2.5.4 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻食味品质的影响

在相同施氮量下，食味值随基本苗数的增加呈下降趋势，但未达到显著水平(表 9)。从食味评价指标来看，稻米的外观值、黏度值和平衡度随基本苗数的增加而下降，硬度值随基本苗数的增加呈上升趋势，D2 处理的两年平均食味值较 D1 处理降低了

0.94%~2.22%，其中，外观值、黏度值和平衡度两年平均分别降低了 1.56%~2.96%、0.82%~4.47%和 1.53%~3.88%，硬度值则两年平均提高了 1.10%~2.71%。在相同基本苗数处理下，水稻食味值随施氮量减少而提高，主要表现为外观值、黏度值和平衡度上升，硬度值下降。与 N1 处理相比，相同基本苗数的 N2、N3 处理两年平均食味值分别提高了 3.65%、9.18%，外观值平均分别提高了 5.78%、15.61%，黏度值平均分别提高了 4.77%、8.88%，平衡度平均分别提高了 5.90%、15.06%，硬度值则平均降低了 3.37%、6.89%。综合分析表明，与当地常规 D1N1 处理相比，D2N3 处理显著改善了稻米的食味品质，其食味值两年平均提高了 7.44%。

2.5.5 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻米粉糊化特性的影响

在相同施氮量下，水稻 RVA 谱的峰值黏度、热浆黏度和最终黏度均随基本苗数增加而呈下降趋势(表 10)，D2 处理的两年平均峰值黏度、热浆黏度和最终黏度较 D1 处理分别降低了 2.64%~3.44%、

表 8 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻营养品质的影响

Table 8. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on nutritional quality in mid-maturing late *japonica* rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedlings	氮肥水平 Nitrogen level	蛋白质 Protein content (%)	直链淀粉 Amylose content (%)	胶稠度 Gel consistency (mm)
2023	D1	N1	8.39 ab	9.76 e	74.28 d
		N2	8.08 bc	10.41 cd	78.08 bc
		N3	7.89 c	11.23 ab	79.37 ab
	D2	N1	8.65 a	10.14 de	76.92 c
		N2	8.37 ab	10.86 bc	78.59 abc
		N3	8.19 bc	11.66 a	80.76 a
	D1	N1	9.44 ab	11.39 e	70.86 e
		N2	8.85 c	12.32 cd	74.17 cd
		N3	8.13 d	12.99 ab	76.07 ab
2024	D1	N1	9.89 a	11.91 d	73.09 d
		N2	9.19 bc	12.71 bc	75.13 bc
		N3	8.66 cd	13.33 a	77.11 a
	D2	N1	9.89 a	11.91 d	73.09 d
		N2	9.19 bc	12.71 bc	75.13 bc
		N3	8.66 cd	13.33 a	77.11 a
	D1	N1	9.44 ab	11.39 e	70.86 e
		N2	8.85 c	12.32 cd	74.17 cd
		N3	8.13 d	12.99 ab	76.07 ab
年份 Year(Y)			66.27**	578.71**	130.49**
密度 Planting density(D)			15.12**	31.93**	21.59**
氮肥 Nitrogen level(N)			29.22**	139.82**	70.04**
Y×D			ns	ns	ns
Y×N			6.06*	ns	ns
D×N			ns	ns	ns
Y×D×N			ns	ns	ns

不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著；ns 表示在 0.05 的概率水平上无显著差异。

Different letters indicate significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference.

表 9 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻食味品质的影响

Table 9. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on cooked rice eating quality in mid-maturing late *japonica* rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedlings	氮肥水平 Nitrogen level	外观 Appearance	硬度 Hardness	黏度 Viscosity	平衡度 Balance degree	食味值 Taste value
2023	D1	N1	7.00 cd	6.90 a	8.6 bc	7.35 bc	74.80 bc
		N2	7.40 bc	6.65 b	8.75 abc	7.70 b	77.20 b
		N3	8.00 a	6.40 c	9.15 a	8.30 a	80.90 a
	D2	N1	6.80 d	7.05 a	8.35 c	7.15 c	73.65 c
		N2	7.35 bc	6.70 b	8.70 abc	7.65 b	76.80 b
		N3	7.75 ab	6.65 b	9.00 ab	8.15 a	80.10 a
	D1	N1	6.55 b	7.15 ab	8.30 ab	6.95 b	72.40 b
		N2	6.85 b	6.95 c	8.70 a	7.30 ab	74.55 ab
		N3	7.55 a	6.60 d	8.90 a	7.95 a	78.75 a
2024	D1	N1	6.35 b	7.20 a	7.80 b	6.60 b	70.30 b
		N2	6.65 b	7.05 bc	8.45 ab	7.05 b	73.20 b
		N3	7.55 a	6.70 d	8.90 a	7.85 a	78.05 a
	D2	N1	6.35 b	7.20 a	7.80 b	6.60 b	70.30 b
		N2	6.65 b	7.05 bc	8.45 ab	7.05 b	73.20 b
		N3	7.55 a	6.70 d	8.90 a	7.85 a	78.05 a
	D1	N1	6.55 b	7.15 ab	8.30 ab	6.95 b	72.40 b
		N2	6.85 b	6.95 c	8.70 a	7.30 ab	74.55 ab
		N3	7.55 a	6.60 d	8.90 a	7.95 a	78.75 a
年份 Year(Y)			31.36**	45.34**	7.13*	23.02**	23.10**
密度 Planting density(D)			ns	13.15**	ns	ns	ns
氮肥 Nitrogen level(N)			52.77**	76.53**	20.03**	45.75**	47.53**
Y×D			ns	ns	ns	ns	ns
Y×N			ns	ns	ns	ns	ns
D×N			ns	ns	ns	ns	ns
Y×D×N			ns	ns	ns	ns	ns

不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著；ns 表示在 0.05 的概率水平上无显著差异。

Different letters indicate significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference at the 0.05 probability level.

表 10 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻淀粉糊化特性的影响
Table 10. Effects of increased seedling transplanting density with reduced nitrogen fertilizer application level on starch pasting properties in mid-maturing late japonica rice under rapeseed straw incorporation

年份 Year	基本苗数 Basic seedlings	氮肥水平 Nitrogen level	峰值黏度 Peak viscosity (cP)	热浆黏度 Trough viscosity(cP)	最终黏度 Final viscosity(cP)	崩解值 Breakdown(cP)	消减值 Setback(cP)
2023	D1	N1	1990 d	1458 c	1862 c	532 b	-128 a
		N2	2155 bc	1556 b	1991 ab	599 ab	-164 ab
		N3	2245 a	1633 a	2051 a	613 a	-195 b
	D2	N1	1912 e	1382 d	1794 d	530 b	-118 a
		N2	2097 c	1538 b	1938 b	560 ab	-160 ab
		N3	2188 ab	1581 ab	2003 a	607 a	-185 b
2024	D1	N1	1877 d	1353 c	1757 c	524 b	-120 a
		N2	2075 b	1525 ab	1939 b	550 b	-136 abc
		N3	2190 a	1582 a	2016 a	608 a	-174 c
	D2	N1	1821 e	1312 c	1716 c	509 b	-105 a
		N2	2021 c	1493 b	1893 b	528 b	-128 ab
		N3	2119 b	1562 ab	1953 ab	557 ab	-166 bc
年份(Y)			65.80**	26.19**	38.01**	7.80*	5.27*
密度 Planting density(D)			39.10**	14.52**	29.02**	5.28*	ns
氮肥 Nitrogen level(N)			282.96**	146.53**	181.44**	18.46**	16.84**
Y×D			ns	ns	ns	ns	ns
Y×N			ns	ns	ns	ns	ns
D×N			ns	ns	ns	ns	ns
Y×D×N			ns	ns	ns	ns	ns

不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平上差异显著。*和**分别表示同因素不同水平间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著；ns 表示在 0.05 的概率水平上无显著差异。
Different letters indicate significant difference between treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant differences among levels within a factor at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns indicates no significant difference.

1.64%~4.12%和 2.52%~2.99%；崩解值平均降低了 1.57%~5.26%，而消减值平均提高了 4.35%~9.98%。在相同基本苗数处理下，峰值黏度、热浆黏度和最终黏度均随施氮量减少而提高。与 N1 处理相比，相同基本苗数的 N2、N3 处理两年平均峰值黏度分别提高了 9.88%、15.07%，热浆黏度平均分别提高了 11.12%、15.57%，最终黏度平均分别提高了 8.91%、12.60%；崩解值平均分别提高了 6.72%、13.84%，而消减值平均分别降低了 24.54%、52.78%。综合分析表明，与当地常规 D1N1 处理相比，D2N3 处理除消减值外的其余各项指标均显著提高。

3 讨论

3.1 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻产量及其构成因素的影响

基本苗数和施氮量对水稻产量的影响均呈现出开口向下的抛物线关系，且二者对产量有显著的交互作用^[22]。由于本研究所用晚稻品种有效分蘖期较长、分蘖能力较强，合理的氮素分配成为影响水

稻产量提升的关键。在本研究中，常规苗数搭配减氮 15%(D1N2)处理下水稻产量最高，但增苗搭配减氮 30%(D2N3)处理下水稻产量与之相当，且 D2N3 处理与常规苗数搭配常规施氮量(D1N1)处理相比产量两年平均提高了 1.53%。这与 Gong 等^[23]的研究结果一致。这归因于 D1N1、D1N2 处理的氮肥施用量高于 D2N3 处理，最高分蘖数增加，但施氮量超过一定范围造成无效分蘖增多，抑制了氮素的有效利用，使有效分蘖数和成穗率降低^[24]。而 D2N3 处理通过增加基本苗数显著增加了水稻的穗数，有利于有效穗数的形成，同时搭配减氮有效抑制了无效分蘖的发生，维持了水稻营养生长和生殖生长间的平衡，构建出适宜的高产水稻群体，从而在维持适宜有效穗数的基础上，提高了水稻的产量^[25]。此外，花后干物质积累量对促进籽粒干物质的积累具有重要作用，为产量形成提供了物质基础^[26]。叶片是水稻光合产物的主要来源，而叶面积指数(LAI)是衡量群体光合生产能力的重要指标^[27]。增加基本苗数，提升单位面积的个体数量，为形成更大的 LAI 奠定了基础^[28]。前人研究认为在一定范围内，减少

施氮量不利于水稻的生长发育并导致水稻的 LAI 降低^[29-31]。但在本研究中, 增苗对 LAI 的正效应弥补了减氮的负效应, 导致 D2N3 处理下 LAI 显著高于 D1N1 处理。此外, 水稻的群体光合生产能力还与光合势有关。在 D2N3 处理下花后关键期能够维持较高的光合势, 增加了叶片光合同化物的供应, 因而提高了干物质积累量^[32]。在本研究中, D2N3 处理下水稻花后干物质积累量显著高于 D1N1 处理, 这也是 D2N3 处理下水稻产量高于 D1N1 处理的重要原因。

3.2 油菜秸秆还田下增苗减氮对中熟晚粳稻品质的影响

稻米品质是水稻生产中的一重要指标。在诸多品质中, 水稻加工品质的优劣直接影响单位质量水稻可用于销售的稻米量^[33]。本研究中虽然 D2N3 处理通过增加穗数、提高结实率和千粒重实现了高产, 但其水稻的糙米率、精米率和整精米率显著低于 D1N1 处理。这可能是因为基本苗数从 1.1×10^6 苗/hm²(D1) 提高到 1.7×10^6 苗/hm²(D2), 加剧了植株对营养元素的竞争, 导致籽粒结构强度下降, 加工过程中更易破损^[34]; 也可能是 D1 处理较 D2 处理能更好地优化群体光资源利用, 增强籽粒灌浆的均匀性, 从而改善稻米的加工品质^[35]。同时施氮量从 270 kg/hm²(N1)、230 kg/hm²(N2) 降到 190 kg/hm²(N3), 蛋白质含量减少, 籽粒硬度下降, 不利于加工品质的改善^[36]。相比之下, 与 D1N1 处理相比, D1N2 处理下水稻的糙米率、精米率和整精米率的降幅更低, 因此 D1N2 处理作为另一高产处理, 具有较高的经济价值。而就外观品质而言, 本研究中 D1N3 处理下水稻的垩白粒率及垩白度最低, D2N3 处理与之相比增幅较小, 且与 D1N1、D1N2 处理相比, D2N3 处理下水稻的垩白粒率与垩白度显著降低。这可能是因为虽然增苗影响籽粒灌浆, 但减少施氮量可以协调碳氮代谢, 优化群体结构, 促进胚乳充实, 从而降低稻米的垩白粒率和垩白度^[37,38]。董士琦等^[39]的研究也有类似的结果。

蛋白质和直链淀粉是稻米成分的重要组成部分, 二者与胶稠度是影响稻米蒸煮食味品质的关键理化指标^[33]。而增苗减氮对三者的调控效应, 是阐明对水稻蒸煮食味品质影响的关键。在本研究中, 相较于 D1N1、D1N2 处理, D2N3 处理的蛋白质含量降低, 而直链淀粉的含量和胶稠度显著提高, 这影响了水稻的硬度和黏度, 使稻米的食味值增加^[40,41]。此外, 已有研究证实, RVA 谱特征值与米饭食味值之间存在显著相关性, 其中具有较高 BDV、较低 SBV

的稻米食味值较好^[42]。本研究中, 在 D1N3、D2N3 处理下, RVA 谱特征表现为较高的崩解值(BDV)和较低的消减值(SBV)。这一结果进一步表明, 增苗减氮有助于改善淀粉的糊化特性, 进而提升稻米的蒸煮食味品质。

4 结论

油菜秸秆还田下, 中熟晚粳水稻采用增苗 50% 搭配氮肥减施 30%(每穴 6 苗、 1.7×10^6 苗/hm², 190 kg/hm²) 的处理, 相较常规氮苗(每穴 4 苗、 1.1×10^6 苗/hm², 270 kg/hm²) 处理, 有效协调了营养生长与生殖生长的关系, 优化群体的物质生产与分配效率, 促进花后干物质的积累, 从而实现产量提升。同时, 在该处理下虽使加工品质略有下降, 但改善了外观品质、食味品质和米粉的糊化特性。因此, 在油菜秸秆还田下, 增苗 50% 搭配氮肥减施 30% 处理有助于实现苏南地区中熟晚粳水稻产量和品质的协同提升, 为该区域水稻的高产优质生产提供了参考。

参考文献:

- [1] 覃金华, 洪卫源, 冯向前, 李子秋, 周子榆, 王爱冬, 李瑞杰, 王丹英, 张运波, 陈松. 基于氮肥运筹下水稻产量与品质协同的农艺生理指标解析[J]. 作物学报, 2025, 51(2): 485-502.
Qin J H, Hong W Y, Feng X Q, Li Z Q, Zhou Z Y, Wang A D, Li R J, Wang D Y, Zhang Y B, Chen S. Analysis of agronomic and physiological indicators of rice yield and grain quality under nitrogen fertilization management[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(2): 485-502. (in Chinese with English abstract)
- [2] 邢志鹏, 朱明, 吴培, 钱海军, 曹伟伟, 胡雅杰, 郭保卫, 魏海燕, 许轲, 霍中洋, 戴其根, 张洪程. 稻麦两熟制条件下钵苗机插方式对不同类型水稻品种米质的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(4): 581-595.
Xing Z P, Zhu M, Wu P, Qian H J, Cao W W, Hu Y J, Guo B W, Wei H Y, Xu K, Huo Z Y, Dai Q G, Zhang H C. Effect of mechanical transplanting with pothole seedlings on grain quality of different types of rice in rice-wheat rotation system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(4): 581-595. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘劲松, 伍龙梅, 包晓哲, 刘志霞, 张彬, 杨陶陶. 短期减施氮肥对华南地区早晚兼用型水稻产量和稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58(8): 1508-1520.
Liu J S, Wu L M, Bao X Z, Liu Z X, Zhang B, Yang T T. Effects of a short-term reduction in nitrogen fertilizer application rates on the grain yield and rice quality of early

- and late-season dual-use rice in South China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(8): 1508-1520. (in Chinese with English abstract)
- [4] 种浩天. 增密减氮对不同类型水稻品种产量、资源利用效率和稻米品质的影响[D]. 荆州: 长江大学, 2022.
- Chong H T. Effects of densification and nitrogen reduction on yield, resource utilization efficiency and rice quality of different rice varieties[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [5] Wang X M, Wu M, Wei Z J, Nicol G W, Zhao H C, Liu B B, Zhang J B, Shan J, Yan X Y. Investigating drivers of free-living diazotroph activity in paddy soils across China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 199: 109601.
- [6] Zhang H P, Mi K L, Chen J, Cui P Y, Lu H, Zhang H C, Yang Y J. Enhancing rice yield, quality and nitrogen utilization through side-deep placement of nitrogen and zinc fertilizers[J]. *Field Crops Research*, 2025, 333: 110096.
- [7] Wu W, Dong X O, Chen G M, Lin Z X, Chi W C, Tang W J, Yu J, Wang S S, Jiang X Z, Liu X L. The elite haplotype OsGATA8-H coordinates nitrogen uptake and productive tiller formation in rice[J]. *Nature Genetics*, 2024, 56(7): 1516-1526.
- [8] Ju C X, Buresh R J, Wang Z Q, Zhang H, Liu L J, Yang J C, Zhang J H. Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application[J]. *Field Crops Research*, 2015, 175: 47-55.
- [9] Hu Q, Gu Y K, Lu X Z, Jiang W Q, Zhang K W, Zhu H B, Li G Y, Xu F F, Zhu Y, Liu G D, Zhang H C, Wei H Y. Effects of one-time reduced basal application of controlled-release nitrogen fertilizer with increased planting density on yield and nitrogen utilization of mechanically transplanted japonica rice[J]. *Agronomy-Basel*, 2024, 14(12): 3072.
- [10] Chen L, Xie H, Wang G L, Yuan L M, Qian X Q, Wang W L, Xu J Y, Zhang W Y, Zhang H, Liu L J, Wang Z Q, Gu J F, Yang J C. Reducing environmental risk by improving crop management practices at high crop yield levels[J]. *Field Crops Research*, 2021, 265: 108123.
- [11] Zhang H W, Jiang S C, Du B, Zhou Q S, Wu Q X, Zhu J Q. Tillage intensity and planting density significantly affected photosynthesis, growth, and yield of rice[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(4): 2662-2671.
- [12] 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 Y. 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)
- [13] 刘俊峰, 牟静怡, 赵红艳, 郭诗梦, 李漪濛, 梁超, 周婵婵, 王术, 黄元财. 施氮方式与行距配置对不同穗型粳稻品种产量和氮素利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(6): 672-684.
- Liu J F, Mou J Y, Zhao H Y, Guo S M, Li Y M, Liang C, Zhou C C, Wang S, Huang Y C. Effects of nitrogen application practice and row spacing on yield and nitrogen use efficiency in japonica rice with different panicle types[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(6): 672-684. (in Chinese with English abstract)
- [14] Liu Z C, Li W C, Geng S J, Zhang R, Dou M, Wu M K, Li L D, Wang D C, Wei X S, Tian P, Yang M Y, Wu Z H, Wu L. Improvement of transplanting rice yield and nitrogen use efficiency by increasing planting density in Northeast China under the optimal nitrogen split-fertilizer applications[J]. *Agriculture-Basel*, 2024, 14(11): 2015.
- [15] Ran C, Gao D P, Liu W Y, Guo L Y, Bai T Q, Shao X W, Geng Y Q. Straw and nitrogen amendments improve soil, rice yield, and roots in a saline sodic soil[J]. *Rhizosphere*, 2022, 24: 100606.
- [16] Liu J, Fang L, Qiu T, Chen J, Wang H, Liu M X, Yi J, Zhang H L, Wang C, Sardan J, Huang M, Penuelas J. Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: A global meta-analysis [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(6): 78.
- [17] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 胡志华, 金千瑜. 秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2015(3): 282-290.
- Pei P G, Zhang J H, Zhu L F, Hu Z H, Jin Q Y. Effects of straw returning coupled with N application on rice photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield formation[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015(3): 282-290. (in Chinese with English abstract)
- [18] 戴相林, 孙建平, 马瑞萍, 赵子婧, 李皓, 姚玉涛, 刘雅辉, 何萍, 董磊明. 滨海盐渍稻田秸秆还田、氮肥减施及秸秆腐熟剂的优化组合研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(5): 956-971.
- Dai X L, Sun J P, Ma R P, Zhao Z J, Li H, Yao Y T, Liu Y H, He P, Dong L M. Optimum combination of straw returning, nitrogen reduction and straw-decomposing inoculants in coastal saline paddy soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(5): 956-971. (in Chinese with English abstract)
- [19] 罗小仁, 王学华, 徐优, 杨泉. 水肥耦合对双季杂交晚稻丰源优 227 物质生产的影响[J]. 杂交水稻, 2018, 33(3): 64-69.
- Luo X R, Wang X H, Xu Y, Yang Q. Effects of water and fertilizer coupling on plant production of double-cropping late hybrid rice Fengyuanyou 227[J]. *Hybrid Rice*, 2018, 33(3): 64-69. (in Chinese)
- [20] 翁文安, 邢志鹏, 胡群, 魏海燕, 史扬杰, 奚小波, 李

- 秀丽, 刘桂云, 陈娟, 袁风萍, 孟轶, 廖萍, 高辉, 张洪程. 无人化旱直播模式对水稻产量、品质和经济效益的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(17): 3350-3365.
- Weng W A, Xing Z P, Hu Q, Wei H Y, Shi Y J, Xi X B, Li X L, Liu G Y, Chen J, Yuan F P, Meng Y, Liao P, Gao H, Zhang H C. Effects of unmanned dry direct-seeded mode on yield, grain quality of rice and its economic benefits[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(17): 3350-3365. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李冬梅, 金梅娟, 王海候, 吕志伟, 陆长婴, 董明辉. 水稻-羊肚菌轮作对水稻产量及品质的影响[J]. *中国稻米*, 2025, 31(5): 112-116.
- Li D M, Jin M J, Wang H H, Lü Z W, Lu C Y, Dong M H. Effects of rice-morel rotation on rice yield and quality[J]. *China Rice*, 2025, 31(5): 112-116. (in Chinese with English abstract)
- [22] Chen G Y, Li C M, Hu M M, He X M, Yang H, Zhang Q Q, Wu C Y, Duan Q, Peng L G, Zhang Y. Evaluating rice lipid content, yield, and quality in response to nitrogen application rate and planting density [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1469264.
- [23] Gong D K, Wang Y, Chen Y, Liu X P, Yu G X. Effects of increased planting density and reduced nitrogen application on rice lodging resistance yield and quality [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 25524.
- [24] 徐莹莹, 刘玉涛, 王宇先, 杨慧莹, 高盼, 王俊河, 于海林, 樊景胜. 黑龙江省西部地区水稻旱直播氮肥施用量与播种密度研究[J]. *黑龙江农业科学*, 2020(11): 28-30.
- Xu Y Y, Liu Y T, Wang Y X, Yang H Y, Gao P, Wang J H, Yu H L, Fan J S. Study on nitrogen fertilizer amount and seeding density in dry direct seeding of rice in western Heilongjiang Province[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2020(11): 28-30. (in Chinese with English abstract)
- [25] 焦峰, 张宇涵, 董文军, 唐傲, 刘猷红, 孟英, 王硕. 减氮增密对寒地水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *河南农业科学*, 2024, 53(11): 41-49.
- Jiao F, Zhang Y H, Dong W J, Tang A, Liu Y H, Meng Y, Wang S. Effect of reducing nitrogen and increasing density on yield and nitrogen absorption and utilization of rice in cold region[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(11): 41-49. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(2): 565-580.
- [27] 郭保卫, 王岩, 蔡嘉鑫, 唐健, 唐闯, 胡雅杰, 邢志鹏, 张洪程. 氮肥用量对机插优质晚稻光合物质生产的影响[J]. *核农学报*, 2023, 37(4): 833-843.
- Guo B W, Wang Y, Cai J X, Tang J, Tang C, Hu Y J, Xing Z P, Zhang H C. Effect of nitrogen application on photosynthetic matter production of mechanical transplanting high quality late rice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(4): 833-843. (in Chinese)
- [28] Zhang H P, Mi K L, Ma M Z, Chen T, Zhang H C, Yang Y J. Effects of planting density on population characteristics and yield formation in conventional japonica rice with different yield levels [J]. *Agronomy Journal*, 2025, 117(6): e70233.
- [29] Ata-Ul-Karim S T, Yao X, Liu X, Cao W, Zhu Y. Determination of critical nitrogen dilution curve based on stem dry matter in rice[J]. *PLoS One*, 2014, 9(8): e104540.
- [30] Wu K, Ali I, Xie H M, Ullah S, Iqbal A, Wei S Q, He L, Huang Q Y, Wu X Y, Cheng F W, Jiang L G. Impact of fertilization with reducing in nitrogen and phosphorous application on growth, yield and biomass accumulation of rice (*Oryza sativa* L.) under a dual cropping system [J]. *PeerJ*, 2021, 9: e11668.
- [31] Gao J, Ran C, Hou H, Guo L, Zhang Q, Geng Y, Shao X. Synergistic improvement of straw decomposition and rice yield in saline sodic paddy soils by rational nitrogen application[J]. *Plant and Soil*, 2025, 510(1): 239-257.
- [32] Zhu T Z, Yin C J, Zhu T C, Zhou P F, Wu L Q, Wang G J, He H B, You C C, Zhang Q Q, Ke J. Delaying panicle nitrogen application to emergence of 3rd leaf from flag leaf increases the grain-filling ability and yield of large-panicle rice by increasing stem nonstructural carbohydrates at heading [J]. *Field Crops Research*, 2024, 312: 109405.
- [33] 姜沛琦, 柏珺焯, 赵维汉, 王东元, 汤兆军, 刘建, 赵飞. 钙镁硅肥施用对粳稻天隆优 619 产量和品质的影响[J]. *中国种业*, 2024(1): 108-112, 118.
- Jiang P Q, Bai J Z, Zhao W H, Wang D Y, Tang Z J, Liu J, Zhao F. The effect of calcium magnesium silicon fertilizer application on the yield and quality of Tianlongyou 619[J]. *China Seed Industry*, 2024(1): 108-112, 118. (in Chinese)
- [34] 易石武, 熊艺, 刘奕晗, 唐金萍, 杨庆飞, 吴建军, 陈浩, 王悦. 不同移栽密度和栽插苗数对早稻稻米品质的影响[J]. *湖南农业科学*, 2025(6): 16-20, 25.
- Yi S W, Xiong Y, Liu Y H, Tang J P, Yang Q F, Wu J J, Chen H, Wang Y. Effects of transplanting density and number of transplanted seedlings per hill on rice quality of early-season rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2025(6): 16-20, 25. (in Chinese with English abstract)
- [35] Mi K L, Lu Y Y, Zhang M Y, Xu F F, Yang Y J, Zhang H P, Zhang H C. Studies on the mechanism of the formation of yield differences in indica-japonica hybrid rice [J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 1084.
- [36] Su X Y, Xu S, Cao L Z, Wang L, Xu Z, Zhang N. Comprehensive evaluation of rice quality in response to

- nitrogen application [J]. *Agronomy Journal*, 2025, 117(4): e70128.
- [37] 黄志成, 姚宇, 付第慧, 程爽, 邢志鹏. 基本苗密度和氮肥管理措施对水稻产量和品质形成的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(18): 34-39.
Huang Z C, Yao Y, Fu D H, Cheng S, Xing Z P. Effects of basic seedling density and nitrogen management on formation of yield and quality of rice: A review[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(18): 34-39. (in Chinese)
- [38] 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(中英文), 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)
- [39] 董士琦, 葛佳琳, 韦还和, 陈英龙, 侯红燕, 董晓亮, 张茂林, 戴其根. 施氮量和密度对盐碱滩涂水稻产量和品质的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(4): 820-828.
Dong S Q, Ge J L, Wei H H, Chen Y L, Hou H Y, Dong X L, Zhang M L, Dai Q G. Effect of nitrogen application rate and density on rice yield and quality in coastal saline-alkali intertidal zone[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(4): 820-828. (in Chinese with English abstract)
- [40] Wang J H, Zhang X Q, Xiao Y, Chen H, Wang X C, Hu Y A. Effect of nitrogen fertilizer on the quality traits of indica rice with different amylose contents [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(14): 8492-8499.
- [41] 倪日群, 林华. 不同氮肥施用量对泰两优 217 稻谷产量和稻米品质的影响[J]. 杂交水稻, 2022, 37(3): 126-129.
Ni R Q, Lin H. Effects of different nitrogen rates on rice yield and grain quality of Tailiangyou 217[J]. *Hybrid Rice*, 2022, 37(3): 126-129. (in Chinese with English abstract)
- [42] 岳红亮, 张梦龙, 程新杰, 刘凯, 宛柏杰, 朱静雯, 唐红生, 孙明法. RVA 谱特征值的影响因素及其与稻米食味品质的关系综述[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 16-22.
Yue H L, Zhang M L, Cheng X J, Liu K, Wan B J, Zhu J W, Tang H S, Sun M F. Factors influencing characteristic values of RVA spectrum and their relationship with rice taste quality: A review[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 16-22. (in Chinese)