

施氮量对巨胚水稻产量、品质及 γ -氨基丁酸含量的影响

胡明明, 兰 艳, 彭立功, 李从美, 陈光毅, 况湖东,

何星枚, 杨 洪, 张秋秋, 梁朝德, 李 天*

(四川农业大学农学院/作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川成都 611130)

摘要: 【目的】巨胚水稻富含对人体具有多种调节功能的 γ -氨基丁酸 (GABA), 明确施氮量对巨胚水稻产量和品质的影响, 以期对巨胚水稻合理施用氮肥提供科学依据。【方法】于 2020—2021 年在四川农业大学崇州市现代化农业科研园区进行大田试验, 以巨胚水稻 J20 和常规水稻越光为材料, 设置 0 (N_0)、90 (N_{90})、135 (N_{135})、180 (N_{180})、225 (N_{225}) kg/hm^2 5 个施氮水平, 测定了不同处理下巨胚水稻产量、加工品质、外观品质、淀粉 RVA 谱特征值、食味值、蛋白质含量、17 种水解氨基酸含量及功能成分 γ -氨基丁酸含量。【结果】两水稻品种的产量均以 N_{135} 处理最高, 这与其具有较高的有效穗数和每穗颖花数有关。随着施氮量增加, 稻米的糙米率、精米率、整精米率、GABA 含量和胚重量呈先增后降的趋势; 垩白粒率、垩白度呈先降后增的趋势, 均以 N_{135} 处理最低; 米质、功能成分 GABA 含量和胚重量在施氮量高于 135 kg/hm^2 后均下降。随着施氮量的增加, 稻米的峰值黏度显著下降, 各施氮处理的平均峰值黏度较 N_0 处理分别下降了 7.44% (J20) 和 9.74% (越光), 崩解值、消减值和糊化温度对施氮量总体上不敏感; J20 外观、口感和食味值随着施氮量增加而显著下降, 各施氮处理的平均食味值较 N_0 处理下降了 10.73%, 越光水稻外观、口感和食味值表现为 $N_{135} > N_0 > N_{90} > N_{180} > N_{225}$, 但 N_{135} 与 N_0 处理外观品质差异不显著。随着施氮量增加, 两个品种的蛋白质含量均呈增加趋势, N_{225} 处理达到最大, 分别较 N_0 处理增加了 10.29% (J20) 和 8.62% (越光); 各水解氨基酸的含量也整体呈增加趋势, N_{225} 处理下两个品种的氨基酸总量、必需氨基酸含量、非必需氨基酸含量分别较 N_0 处理增加了 29.25%、23.49%、31.68% (J20) 和 19.34%、14.88%、21.33% (越光)。根据水稻产量、糙米率、整精米率、垩白粒率、GABA 含量与施氮量建立的效应方程计算得出, 两品种高产优质的适宜施氮范围为 130~140 kg/hm^2 。与常规水稻越光相比, 巨胚水稻 J20 的产量、整精米率、崩解值和食味值对氮肥更敏感, 且相同施氮量下 J20 的蛋白质含量、水解氨基酸总量及 GABA 含量均高于越光。【结论】合理施用氮肥可有效提高巨胚水稻的产量, 改善加工、外观及营养品质, 但过量施氮导致稻米蒸煮食味品质变劣; 在本试验条件下, 实现巨胚水稻 J20 高产优质、功能特性俱佳的适宜施氮量为 130~140 kg/hm^2 。

关键词: 巨胚水稻; 施氮量; 产量; 品质; γ -氨基丁酸

Effects of nitrogen application rate on yield, quality, and γ -aminobutyric acid content of giant embryo rice

HU Ming-ming, LAN Yan, PENG Li-gong, LI Cong-mei, CHEN Guang-yi, KUANG Hu-dong,

HE Xing-mei, YANG Hong, ZHANG Qiu-qiu, LIANG Chao-de, LI Tian*

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Crop Ecophysiology and Cultivation

Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: 【Objectives】Giant embryo rice is highly nutritious because it is rich in γ -aminobutyric acid (GABA). Here, we studied the suitable N application rate for high yield, quality and GABA content of giant embryo rice. 【Methods】In 2020 and 2021, field experiments were conducted in the Modern Agricultural Scientific Research Park of Chongzhou City, Sichuan Agricultural University, using giant embryo rice cultivar J20 and Koshihikari as test materials. Five N dosages of 0 (N_0), 90 (N_{90}), 135 (N_{135}), 180 (N_{180}), and 225 (N_{225})

收稿日期: 2022-03-31 接受日期: 2022-07-21

基金项目: 四川省科技计划项目 (2020YFH0146)。

联系方式: 胡明明 E-mail: 957937991@qq.com; * 通信作者 李天 E-mail: lit@sicau.edu.cn

kg/hm² were applied. The yield, processing quality, appearance quality, starch RVA spectrum characteristic value, taste value, protein content, 17 hydrolyzed amino acids and γ -aminobutyric acid (GABA) content were investigated. 【 **Results** 】 Both rice cultivars reached the maximum yield and higher effective panicle and spikelet number per panicle in N₁₃₅. With increasing N dosage, the brown rice rate, milled rice rate, head rice rate, GABA content, and embryo weight of rice increased at first and then decreased. The chalky grain rate and chalkiness decreased at first and then increased, with the lowest value recorded in N₁₃₅. The N dosage higher than N₁₃₅ decreased the functional component and embryo weight. Increasing N dosage ($P<0.05$) decreased the peak viscosity of rice, with the average decrease under N application reaching 7.44% (J20) and 9.74% (Koshihikar), respectively. N application rate did not change ($P>0.05$) the breakdown and setback values and the pasting temperature. The appearance, taste, and taste value of J20 decreased as N dosage increased ($P<0.05$), with an average decrease of 10.73% in the taste value recorded in N₀ treatment. For Koshihikari, the appearance, taste, and taste value were in the order N₁₃₅ > N₀ > N₉₀ > N₁₈₀ > N₂₂₅. The protein content total amino acid, essential amino acid, and non-essential amino acid content of the two cultivars increased with the increasing N application rate. The suitable range of N application rate for high yield and good quality of the two rice cultivars was estimated at 130–140 kg/hm². Compared with Koshihikari, the yield, head rice rate, breakdown value and taste value of J20 were more sensitive to N application rate. Also, it had a higher protein content, total hydrolyzed amino acids and GABA under the same N application rate. 【 **Conclusions** 】 Reasonable application of nitrogen fertilizer can improve yield, processing quality, appearance and nutrition, but excessive nitrogen fertilization will reduce cooking and eating quality of rice. For the giant embryo rice cultivars, applying N 130–140 kg/hm² is recommended for a high yield, quality and good functional characteristics.

Key words: giant embryo rice; nitrogen application rate; yield; quality; γ -aminobutyric acid

水稻是当今世界最重要的粮食作物之一，全球有超过一半以上的人口以稻米为主食^[1]。近年来，随着经济的快速发展，人民生活水平日益改善，稻米的营养价值越来越受到重视^[2]。巨胚水稻是具有高营养、多功能的一种特种稻，其胚大小是普通稻米胚的2~3倍，有的甚至可以达到5倍以上^[3-4]。米胚内含有丰富的蛋白质、脂肪、维生素等天然营养元素，尤其富含对人体具有多种调节功能的 γ -氨基丁酸(GABA)^[5-6]，具有降血压、降血脂、活化肝肾、预防肥胖等功能，素有“长寿米”、“高营养功能性稻米”的美誉^[7-9]。而氮素是水稻生产中较大的限制因素之一，在水稻的生长发育、产量提高以及品质改善等方面具有重要作用^[10]。长期以来，施用氮肥是保证水稻高产优质的措施，但施氮过多不仅会降低其产量品质，更易造成环境污染^[11]。因此，适宜的施氮量是确保巨胚水稻优质栽培的关键因素。

目前，国内关于巨胚水稻的研究并不多，且主要涉及种质资源创新^[12]、籽粒灌浆特性^[13]、营养价值分析^[14]、胚发育的解剖学观察^[15]等方面，国内已先后培育出“巨胚香糯 1547”^[16]、“巨胚稻 TgeB”^[17]、“上师大 5 号”^[18]等多个巨胚稻品种，巨胚糙米内的粗蛋白、粗脂肪、矿物质、维生素、氨基酸含量等均有

不同程度的提高^[19]，尤其是 γ -氨基丁酸(GABA)含量明显增加，有的甚至较普通稻高2~6倍^[20]。而国内对于巨胚水稻的配套栽培技术研究甚少，尤其是不同施氮量对GABA含量的影响鲜有报道。巨胚水稻在我国还是零星种植，一方面是由于缺乏高产优质适应性广的品种，另一方面是没有成熟的栽培技术，难以得到大面积推广^[21]。因此，本试验选用笔者课题组从日本引进的巨胚稻，经多年种植并筛选出适合四川地区生态环境的品种J20，并以日本常规粳稻越光作对照，研究施氮量对巨胚水稻产量、品质及GABA含量的影响，以期对巨胚水稻的推广应用奠定理论和技术基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为巨胚水稻J20(常规粳稻)和越光(常规粳稻)。巨胚水稻为日本九州大学和农业生物资源研究院先后利用化学诱变的方法，从越光中选育出巨大胚的突变体(J20胚达越光胚的2倍)；越光为1956年日本育成的中粳稻品种，稻米品质优、口感好。两品种经本课题组引进，在四川多年种

植, 产量稳定, 全生育期为 135~138 天, J20 株高 1.31 m, 穗长 20.77 cm, 剑叶叶面积 59.32 cm², 越光株高 1.19 m, 穗长 20.20 cm, 剑叶叶面积 30.90 cm²。试验于 2020—2021 年在四川农业大学崇州市现代化农业科研园区进行, 前茬为油菜, 耕层土壤 (0—20 cm) 质地为砂壤土。土壤基本理化性状见表 1。巨胚 J20 和越光糙米粒型对比见图 1。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 设置 5 个氮水平, 分别为 N₀、N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀、N₂₂₅ 处理, 以 N₀ 为对照。小区面积 5 m×4 m=20 m², 重复 3 次, 共计 30 个小区, 行穴距 30 cm×25 cm, 每穴栽 2 苗。2 年均采用水育秧, 2020 年于 4 月 12 日播种, 5 月 16 日进行人工移栽, 8 月 25 日收获; 2021 年于 4 月 16 日播种, 5 月 20 日进行人工移栽, 8 月 29 日收获。氮肥为尿素 (N≥46%), 按基肥: 蘖肥=6: 4 施入, 钾肥为氯化钾 (K₂O≥60%, 180 kg/hm²), 磷肥为过磷酸钙

(P₂O₅≥12%, 90 kg/hm²), 基肥氮和全部磷钾肥在移栽前 1 天施入, 其余田间管理措施保持一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 产量测定 成熟期每小区选取 30 穴调查有效穗数, 并按平均有效穗数从每小区选取 5 穴进行考种, 调查每穗总粒数、着粒数、千粒重、结实率、理论产量等指标, 然后分区收获, 晒干, 待稻谷含水量为 14% 时实测产量。

1.3.2 品质测定 各处理稻谷晒干, 存放 3 个月后进行稻米品质测定。稻米的糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度等均按照中华人民共和国国家标准《GB/T 17891—2017》测定。

稻米淀粉黏滞性使用澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司生产的 RVA-4 型 RVA 仪进行快速测定, 并用 TCW (Thermal cycle for Windows) 配套软件进行分析。米粉过 0.15 mm 筛, 每一品种称取 3.00 g 精米加 25.00 mL 蒸馏水。测定时间 12.5 min, 在此过程中罐内温度先在 50℃ 保持 1 min, 然后上升到

表 1 土壤基本理化性状
Table 1 Basic soil physical and chemical properties

年份 Year	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Alkali-hydrolyzed N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
2020	5.93	21.50	1.91	110.54	18.91	58.31
2021	6.04	24.50	1.72	108.35	19.75	60.24



图 1 供试巨胚水稻品种 J20 与越光粒型的比较
Fig. 1 Comparison between the test giant embryo rice cultivar J20 and Koshihikari grains

95℃ 保持 2.5 min, 最后降至 50℃ 保持 1.4 min, 温度变化速率为 11.84℃/min。搅拌器的转速在最初 10 s 内为 960 r/min, 此后保持在 160 r/min。黏滞值用 RVU (RVA 黏度单位) 表示。

稻米食味采用日本佐竹 SATAKE STA1B 米饭食味计测定: 称取 30.00 g 精米于钢罐中, 用清水清洗稻米 3 次, 每次 30 s, 按照米: 水=1:1.3 的比例加入蒸馏水。覆上滤纸, 用胶皮圈密封, 从洗涤开始计时浸泡 30 min, 连同滤纸一起置于电饭煲中加热蒸煮 30 min, 切断电源, 保温 10 min。取出钢罐, 将其中米饭轻轻搅拌呈翻起状态, 拌后盖过滤纸, 放入配套风冷装置 (米饭食味仪配套) 冷却 20 min, 风冷后取滤纸, 改换配套钢盖, 密封自然冷却 90 min。后称取 (8.00 ± 0.01) g 米饭于带铁环的压饼中, 制成成型的米饼, 在食味计上选择测定稻米类型, 直接读取外观、口感、硬度、粘度、平衡度、弹性和食味值评分。

蛋白质含量测定: 称取 1.00 g 糙米粉, 分别注入 250 mL 消化管中, 注入 12 mL 浓硫酸及 7 g K_2SO_4 和 0.8 g $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 的混合物, 420℃ 下消化 1 h 后, 采用 Kjelttec 2300 全自动凯氏定氮仪 (瑞典 FOSSTECATOR 公司生产) 测定米粉含氮量, 再乘以 5.95 转换成粗蛋白量。

1.3.3 γ -氨基丁酸 (GABA) 含量测定 分别取适量糙米样品粉碎过筛, 再准确称取 0.4 g 米粉于 15 mL 离心管中, 加入 8 mL 0.1 mol/L 的盐酸, 手动摇匀、浸提过夜; 然后摇床震荡 60 min; 取上清液 2 mL 离心 (4℃ 下 14500 r/min 离心 15 min); 再取上清液 500 μ L, 加入等体积 10% 的磺基水杨酸, 充分混匀, 4℃ 静置 15 min, 能看到沉淀生成; 用 1 mL 注射器取上清液 500 μ L, 用 0.45 μ m 滤膜过滤, 于氨基酸分析仪上检测。

1.3.4 胚重量测定 各小区分别取 100 粒糙米, 烘干至恒重 (W_1), 再用蒸馏水浸泡 2 天, 取出后用滤纸吸干表面水分, 然后用镊子小心剥去胚, 将去胚糙米烘干至恒重 (W_2), 根据公式 ($W=W_1-W_2$) 计算胚重量。

1.3.5 水解氨基酸含量测定 各处理分别取适量糙米样品粉碎过筛, 再准确称取 200 mg 米粉置于顶空进样瓶中, 加入 10 mL 6 mol/L 的盐酸后封口, 置于恒温干燥箱中 110℃ 水解 24 h; 将水解好的样品取出冷却至室温, 用漏斗和滤纸进行过滤, 后定容至 50 mL 容量瓶中; 取 1 mL 定容后的样品溶液置于水浴锅上 70℃ 进行脱酸, 至底部留有少许痕渍为止;

脱酸完成后, 用 1 mL 的样品稀释液复溶, 用 0.45 μ m 滤膜过滤, 氨基酸分析仪上检测。

1.4 数据处理

所有数据利用 SPSS 25.0 (SPSS Institute Inc, Chicago, USA)、Excel (2010) 进行分析, 并利用最小显著差数 (LSD) 在 $P=0.05$ 水平上进行差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 施氮量对水稻产量及其构成因素的影响

由表 2 可知, J20 高产的适宜施氮量与越光一致, 各水稻品种两年的产量均随施氮量增加呈先上升后下降的趋势, 在 N_{135} 处理下最高, 2020 年 N_{135} 处理下两品种分别较 N_0 处理增产 44.37% (J20) 和 41.00% (越光), 2021 年分别增产 37.32% (J20) 和 28.73% (越光), N_{135} 、 N_{180} 、 N_{225} 处理间差异不显著, 但三者均显著高于 N_0 处理。两年试验均以 J20 产量的变异系数最大, 但相同施氮量下 J20 的产量均低于越光。根据 J20、越光两年的平均产量与施氮量, 建立效应方程 $y=-0.1075x^2+29.287x+5002.5$ ($R^2=0.9979$)、 $y=-0.0929x^2+25.396x+5481.9$ ($R^2=0.9628$), 两品种产量均与施氮量呈开口向下的抛物线关系 (图 2), 计算得出 J20 最适宜施氮量为 136.22 kg/hm², 理论最高产量为 6997.22 kg/hm², 越光最适宜施氮量为 136.68 kg/hm², 理论最高产量为 7217.52 kg/hm²。

从产量构成因素来看, 各品种两年的有效穗数均随施氮量增加呈先增后降的趋势, 在 N_{135} 处理下最高, N_{135} 、 N_{180} 、 N_{225} 处理与 N_0 处理差异显著; 每穗颖花数随施氮量增加而增加, N_{225} 处理最高, 与 N_0 处理达到显著差异水平; 结实率与千粒重呈相同的变化趋势, 多随施氮量增加而下降, N_0 处理与其余处理多差异显著。相同施氮量下越光的有效穗数、结实率和千粒重均高于 J20, 但每穗颖花数低于 J20。方差分析结果表明, 品种与施氮量对水稻产量、产量构成因素影响达显著或极显著水平, 年份、年份和品种交互作用、年份和施氮量交互作用、品种和施氮量交互作用, 以及年份×品种×施氮量三者间的交互作用, 对每穗颖花数、结实率和千粒重的影响达极显著水平。

2.2 施氮量对水稻加工品质及外观品质的影响

由表 3 可知, 两个水稻品种的加工品质对施氮量的响应表现一致。糙米率、精米率和整精米率随

表 2 施氮量对水稻产量及其构成因素的影响
Table 2 Effects of N application rate on rice yield and yield components

年份 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	有效穗数 (×10 ⁴ /hm ²) Effective panicles	每穗颖花数 Spikelets per panicle	结实率 (%) Seed-setting rate	千粒重 (g) 1000-grain weight	产量 (kg/hm ²) Yield	
2020	J20	N ₀	195.6±15.4 c	137.4±0.5 d	74.1±0.1 a	22.7±0.1 a	4852.2±382.0 c	
		N ₉₀	222.2±27.8 bc	145.1±0.4 c	71.2±0.1 b	22.8±0.1 a	5633.8±703.7 bc	
		N ₁₃₅	266.7±23.1 a	161.4±0.4 b	69.2±0.1 c	21.8±0.1 b	7004.9±606.6 a	
		N ₁₈₀	253.3±13.3 ab	175.9±0.1 a	64.7±0.1 d	21.3±0.1 c	6631.0±349.0 ab	
		N ₂₂₅	240.0±26.7 ab	176.4±0.5 a	63.4±0.1 e	21.0±0.1 d	6053.7±672.6 ab	
		变异系数 CV (%)	11.8	11.1	6.5	3.7	14.0	
		越光 Koshihikari	N ₀	226.7±13.3 b	97.1±1.3 e	87.9±0.2 a	24.9±0.4 a	5192.2±305.4 c
	N ₉₀		262.2±7.7 b	100.0±0.5 d	85.4±0.5 b	24.6±0.1 b	5933.1±174.2 bc	
	N ₁₃₅		337.8±33.6 a	101.6±0.2 c	80.4±0.1 c	24.6±0.1 b	7321.0±727.3 a	
	N ₁₈₀		333.3±35.3 a	105.1±0.1 b	77.2±0.1 d	22.9±0.1 c	6679.8±706.9 ab	
	N ₂₂₅		324.4±33.6 a	111.1±0.1 a	72.6±0.1 e	22.9±0.1 c	6443.9±666.4 ab	
	变异系数 CV (%)		16.8	5.2	7.6	4.1	12.7	
	2021		J20	N ₀	191.1±7.7 b	138.2±0.2 e	77.1±0.1 a	23.5±0.1 a
		N ₉₀		240.0±13.3 a	140.7±0.3 d	70.8±0.1 b	22.9±0.1 b	5887.2±327.1 bc
N ₁₃₅		275.6±15.4 a		153.1±0.3 c	68.4±0.1 c	22.8±0.1 b	7065.5±394.8 a	
N ₁₈₀		262.2±20.4 a		166.5±0.5 b	65.3±0.1 d	22.3±0.1 c	6841.5±531.4 a	
N ₂₂₅		244.4±33.6 a		178.8±0.6 a	62.5±0.1 e	21.4±0.1 d	6295.0±864.1 ab	
变异系数 CV (%)		13.3		11.1	8.1	3.5	12.3	
越光 Koshihikari		N ₀		240.0±13.3 c	100.0±0.2 d	85.4±0.1 a	26.0±0.1 b	5743.6±319.1 c
		N ₉₀	266.7±40.0 bc	100.3±0.4 d	82.9±0.1 b	26.2±0.1 a	6255.4±938.3 bc	
		N ₁₃₅	337.8±33.6 a	103.7±0.12 c	76.6±0.1 c	25.6±0.1 c	7393.5±734.5 a	
		N ₁₈₀	324.4±7.7 a	108.8±0.3 b	72.5±0.1 d	25.4±0.1 d	6988.0±165.8 ab	
		N ₂₂₅	315.6±27.8 ab	113.3±0.3 a	68.3±0.1 e	25.5±0.1 c	6710.9±590.3 abc	
		变异系数 CV (%)	14.0	5.5	9.2	1.3	9.7	
		方差分析 (<i>F</i> 值) One way ANOVA analysis (<i>F</i> value)						
年份 Year (Y)		0.32 ns	54.13**	2118.01**	1841.75**	3.19 ns		
品种 Cultivar (C)	83.21**	238696.06**	86117.84**	8995.97**	5.06*			
施氮量 N rate (N)	27.61**	8623.86**	21760.71**	497.31**	22.21**			
Y×C	0.32 ns	768.36**	2998.84**	391.52**	0.10 ns			
Y×N	0.13 ns	122.41**	218.88**	40.94**	0.15 ns			
C×N	1.96 ns	2432.46**	691.00**	19.35**	0.19 ns			
Y×C×N	0.25 ns	134.20**	86.82**	54.55**	0.02 ns			

注: 同列数据后不同小写字母表示同一年份同一品种处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, *、**分别表示在0.05和0.01水平效果显著, ns表示无显著效果。
Note: Different lowercase letters after the data in a column indicate significant difference among treatments of a cultivar in the same year ($P<0.05$). In the ANOVA analysis, * and ** indicate significant effects at the 0.05 and 0.01 levels respectively, and ns indicates no significant effect.

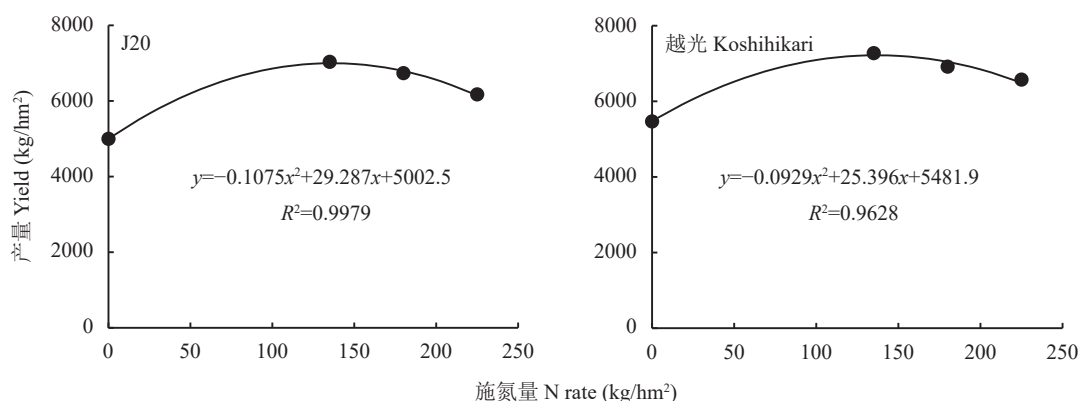


图2 产量与施氮量的关系

Fig. 2 The relationship between yield and N application rate

着施氮量的增加呈先上升后下降的趋势, 在 N_{135} 处理下达到最大, 再增施氮肥水稻的加工品质有变劣的趋势。两年试验加工品质均以整精米率的变异系数最大, 且 2021 年 J20 整精米率的变异系数明显大于越光。相同施氮量下越光的糙米率、精米率均高于 J20, 但整精米率略低于 J20。根据 J20、越光两年的平均糙米率与施氮量, 建立效应方程 $y = -0.0002x^2 + 0.0452x + 75.267$ ($R^2 = 0.9823$)、 $y = -0.0002x^2 + 0.0529x + 77.316$ ($R^2 = 0.9879$), 计算得出 J20 和越光糙米率达到最大的适宜施氮量分别为 113 和 132.25 kg/hm²。根据 J20、越光两年的平均整精米率与施氮量, 建立效应方程 $y = -0.0003x^2 + 0.0789x + 54.445$ ($R^2 = 0.956$)、 $y = -0.0002x^2 + 0.0501x + 53.521$ ($R^2 = 0.9754$), 计算得出 J20 和越光整精米率达到最大的适宜施氮量分别为 131.50 和 125.25 kg/hm² (图 3)。

从外观品质来看, 除 2020 年越光的垩白粒率和垩白度在 N_0 处理最低, 与 N_{135} 处理差异不显著外, 各品种的垩白粒率和垩白度多随施氮量增加先降后增, 在 N_{135} 处理下最低, 与 N_0 处理达显著差异水平。两年试验均以越光垩白粒率、垩白度的变异系数最大, 但相同施氮量下 J20 的垩白粒率、垩白度均高于越光。根据两品种的垩白粒率与施氮量, 建立效应方程 $y = 0.0002x^2 - 0.0571x + 78.206$ ($R^2 = 0.9238$)、 $y = 0.0005x^2 - 0.1409x + 27.052$ ($R^2 = 0.9977$), 计算得出 J20 和越光垩白粒率达到最低的适宜施氮量分别为 142.75 和 140.90 kg/hm² (图 3)。方差分析结果表明, 年份、品种、施氮量、年份和品种交互作用、年份和施氮量交互作用 (精米率除外) 对各指标的影响达极显著水平, 品种和施氮量交互作用以及年份×品种×施氮量三者交互作用对整精米率、垩白粒率、垩白度影响达极显著水平。

2.3 施氮量对稻米淀粉黏滞性及食味值的影响

如表 4 所示, 随着施氮量增加, 两个品种的峰值黏度、热浆黏度和最终黏度呈下降趋势, 其中 J20 的峰值黏度在各处理间差异显著, 越光的峰值黏度在 N_{180} 、 N_{225} 处理间差异不显著, 其余各处理间多差异显著, 各施氮处理的平均峰值黏度分别较 N_0 处理下降 7.44% (J20) 和 9.74% (越光)。随施氮量增加, 两品种的崩解值和消减值无明显变化规律, 均在 N_{135} 处理下表现最好, 此时崩解值最大, 消减值最小, 但与 N_0 处理差异不显著。糊化温度随施氮量增加整体呈上升趋势, 各处理间差异未达到显著水平。两品种均以消减值的变异系数最大, 且 J20 崩解值的变异系数明显大于越光。相同施氮量下越光的峰值黏度、热浆黏度、崩解值和最终黏度均高于 J20, 但消减值均低于 J20。方差分析结果表明, 品种对各指标 (糊化温度除外) 的影响达极显著水平, 施氮量对峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、消减值影响达极显著水平, 品种与施氮量二者交互对峰值黏度、热浆黏度、最终黏度的影响达极显著水平。

水稻食味品质的优劣一般通过外观、口感、硬度、粘度、平衡度和弹性进行评判, 综合这 6 个指标最终得出食味值, 食味值得分越高, 则食味品质越好。由表 5 可知, 随着施氮量增加, J20 的外观、口感和食味值均呈下降趋势, 其中除 N_0 与 N_{90} 处理差异不显著外, 其余处理间差异显著, 各施氮处理的平均食味值较 N_0 处理下降 10.73%, 硬度、粘度和平衡度随施氮量增加整体呈增加趋势, 弹性则相反, 整体呈下降趋势。随着施氮量增加, 越光的外观、口感和食味值由高到低依次为 $N_{135} > N_0 > N_{90} > N_{180} > N_{225}$, 但 N_{135} 与 N_0 处理观感品质差异不显著, 硬度、粘度、平衡度和弹性均随施氮量增加整体呈

表 3 施氮量对水稻加工品质及外观品质的影响

Table 3 Effects of N application rate on processing and appearance quality of rice

年份 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	糙米率 (%) Brown rice rate	精米率 (%) Milled rice rate	整精米率 (%) Head rice rate	垩白粒率 (%) Chalky grain rate	垩白度 (%) Chalkiness
2020	J20	N ₀	75.1±0.6 c	65.6±0.3 a	54.3±0.3 c	86.9±2.0 a	50.4±2.0 a
		N ₉₀	77.3±0.3 ab	66.7±0.1 a	55.1±0.3 bc	85.4±1.6 ab	48.8±1.1 ab
		N ₁₃₅	77.7±0.1 a	67.0±0.1 a	56.3±1.1 ab	84.3±1.2 b	47.4±1.1 b
		N ₁₈₀	77.5±0.2 a	66.9±1.9 a	56.3±0.6 ab	84.8±0.6 ab	47.8±0.8 b
		N ₂₂₅	76.7±0.4 b	66.7±0.2 a	56.6±1.0 a	85.1±0.9 ab	48.0±1.6 ab
		变异系数 CV (%)	1.4	0.9	1.8	1.2	2.5
		越光 Koshihikari	N ₀	78.7±0.6 b	70.0±1.1 b	52.0±1.1 b	15.3±2.2 c
	N ₉₀		80.5±0.7 a	72.8±1.4 a	53.0±0.7 ab	30.2±4.4 a	14.1±1.8 a
	N ₁₃₅		81.5±1.0 a	73.3±0.6 a	53.4±0.5 a	15.8±2.4 c	5.8±0.9 c
	N ₁₈₀		80.5±1.0 a	73.1±0.3 a	53.1±0.5 ab	22.6±1.5 b	11.7±1.3 b
	N ₂₂₅		80.2±0.7 a	72.0±0.8 a	52.3±0.6 ab	21.4±0.7 b	10.2±0.6 b
	变异系数 CV (%)		1.3	1.9	1.1	28.8	40.7
	2021	J20	N ₀	75.4±0.2 c	65.0±0.3 c	54.5±1.1 d	69.6±3.2 a
N ₉₀			77.9±0.4 b	67.4±1.0 b	57.0±0.2 c	67.4±2.9 ab	36.4±2.0 ab
N ₁₃₅			79.3±0.3 a	69.3±0.7 a	63.8±0.4 a	63.7±1.5 b	32.3±0.9 b
N ₁₈₀			78.0±0.4 b	67.2±0.9 b	60.1±0.9 b	66.4±2.4 ab	34.7±3.8 ab
N ₂₂₅			77.5±0.3 b	67.0±0.5 b	57.8±1.0 c	67.0±0.2 ab	35.3±4.7 ab
变异系数 CV (%)			1.8	2.3	6.0	3.2	7.3
越光 Koshihikari			N ₀	75.9±0.4 c	66.2±0.5 c	55.0±0.9 c	27.1±3.8 a
		N ₉₀	78.7±0.2 b	68.4±0.6 b	57.5±0.5 b	18.5±0.5 c	7.6±0.7 b
		N ₁₃₅	80.6±0.3 a	70.0±1.0 a	60.4±1.0 a	18.1±0.6 c	7.3±0.2 b
		N ₁₈₀	80.0±0.5 a	68.3±1.3 b	58.6±0.5 b	26.6±0.8 ab	7.5±0.6 b
		N ₂₂₅	78.6±0.2 b	68.7±0.3 ab	57.6±0.3 b	22.6±3.1 b	9.7±0.3 a
		变异系数 CV (%)	2.3	2.0	3.4	19.0	14.7
方差分析 (<i>F</i> 值) One way ANOVA analysis (<i>F</i> value)							
年份 Year (Y)		7.70**	67.18**	508.20**	230.76**	258.16**	
品种 Cultivar (C)		288.60**	279.38**	106.73**	9460.41**	5864.77**	
施氮量 N rate (N)		74.12**	25.60**	71.24**	10.27**	7.83**	
Y×C		76.04**	123.37**	32.36**	320.98**	186.77**	
Y×N		4.51**	2.31 ns	28.11**	12.20**	6.02**	
C×N		0.63 ns	0.52 ns	6.35**	4.98**	6.64**	
Y×C×N		1.99 ns	1.31 ns	3.90**	11.49**	5.33**	

注: 同列数据后不同小写字母表示同一年份同一品种处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, *, **分别表示在0.05和0.01水平效果显著, ns表示无显著效果。

Note: Different lowercase letters after the data in a column indicate significant difference among treatments of a cultivar in the same year ($P<0.05$). In the ANOVA analysis, ** indicates significant effect at the 0.01 level, and ns indicates no significant effect.

增加趋势。两品种均以粘度的变异系数最大, 且 J20 食味值的变异系数大于越光。相同施氮量下越光 的外观、口感和食味值均高于 J20。方差分析结果表明, 品种对外观、口感、食味值影响达极显著水

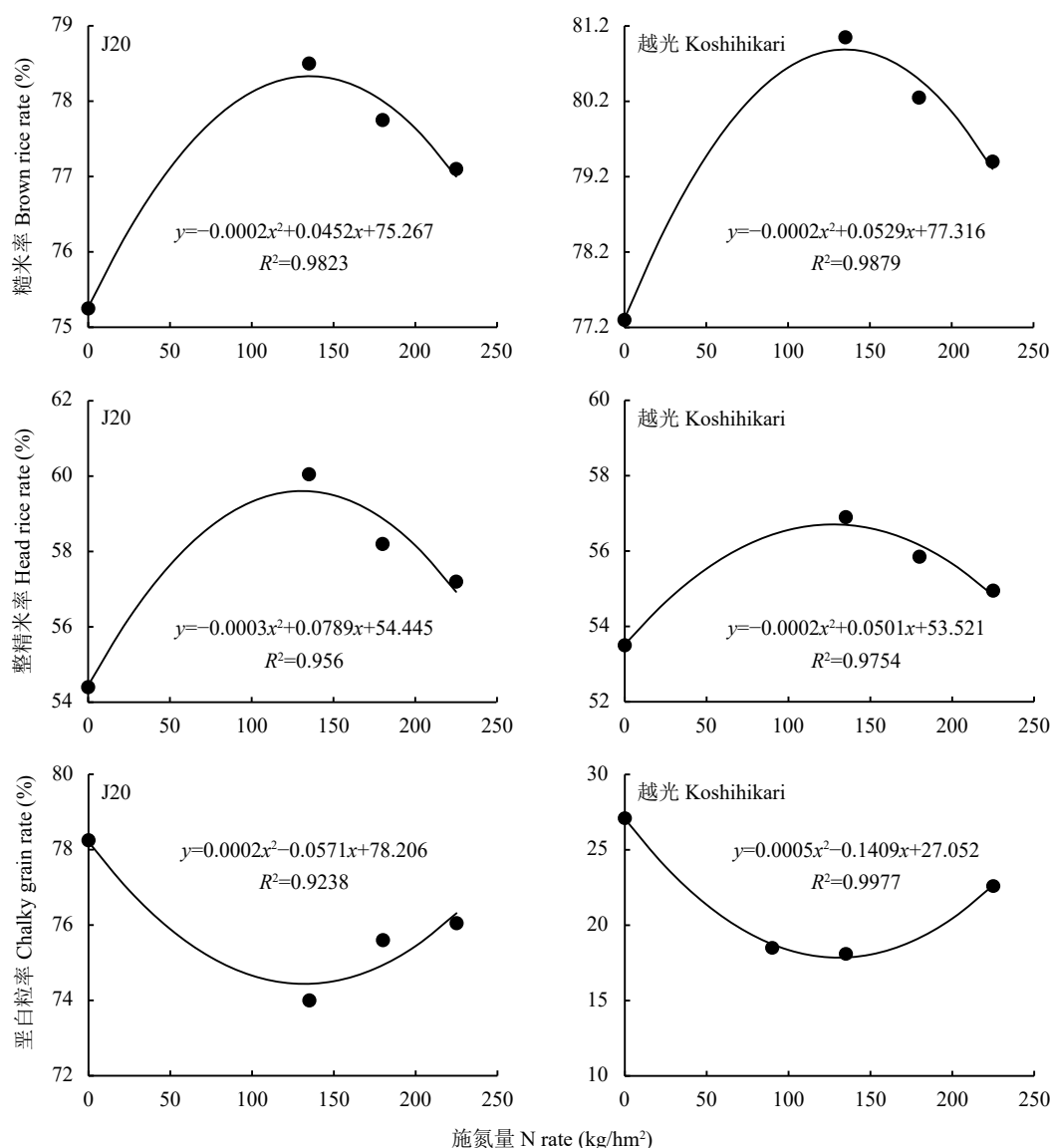


图3 稻米加工品质、外观品质与施氮量的关系

Fig. 3 The relationship between rice processing quality, appearance quality, and N application rate

平, 施氮量对外观、口感、硬度、食味值影响达极显著水平, 品种与施氮量二者互作对外观、口感、弹性、食味值影响达显著或极显著水平。

2.4 施氮量对稻米蛋白质含量、 γ -氨基丁酸(GABA)含量及胚重量的影响

由表6可知, 随着施氮量增加, 两个品种的蛋白质含量呈增加趋势, N_{225} 处理最大, 分别较 N_0 处理增加10.29% (J20) 和8.62% (越光), 其中J20的 N_0 、 N_{90} 处理与 N_{225} 处理差异显著, 越光各处理间无显著差异。随着施氮量增加, 两个品种的GABA含量和胚重量先增后降, 在 N_{135} 处理达到最大, 再增施氮肥两者均下降, 但各处理间无显著差异。相同施氮量下J20的蛋白质含量、GABA含量和胚重量

均高于越光, 其中J20各处理的平均GABA含量较越光显著增加48.92%, J20胚重达越光胚的2倍。方差分析结果表明, 品种对糙米中GABA含量、胚重量影响达极显著水平, 施氮量对蛋白质含量影响达显著水平。根据J20、越光GABA含量与施氮量, 建立效应方程 $y = -0.0002x^2 + 0.0559x + 18.474$ ($R^2 = 0.9953$)、 $y = -0.0002x^2 + 0.0566x + 11.317$ ($R^2 = 0.8632$), 计算得出J20最适宜施氮量为139.75 kg/hm², 最高GABA含量为22.38 mg/100g, 越光最适宜施氮量为141.50 kg/hm², 最高GABA含量为15.32 mg/100g (图4)。

由表7可知, 随着施氮量增加, 两个品种的氨基酸含量整体呈增加趋势, N_{225} 处理下的氨基酸总

表 4 施氮量对稻米淀粉黏滞性的影响 (RVU)
Table 4 Effects of N application rate on starch viscosity of rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	峰值黏度 (RVU) Peak viscosity	热浆黏度 (RVU) Trough viscosity	崩解值 (RVU) Breakdown	最终黏度 (RVU) Final viscosity	消减值 (RVU) Setback	糊化温度 (°C) Pasting temperature
J20	N ₀	215.4±1.2 a	166.2±13.7 a	49.2±14.9 ab	239.8±6.9 a	24.4±8.1 bc	72.8±1.1 a
	N ₉₀	209.6±1.9 b	158.1±2.8 ab	51.5±1.0 ab	239.5±3.5 a	29.9±1.6 ab	73.6±0.1 a
	N ₁₃₅	206.6±0.6 c	142.6±4.1 bc	64.0±3.5 a	221.1±2.2 b	14.5±1.7 c	73.0±0.1 a
	N ₁₈₀	195.1±0.9 d	150.9±5.8 ab	44.2±4.9 b	233.5±5.7 a	38.3±4.8 a	73.6±0.1 a
	N ₂₂₅	186.1±0.7 e	128.8±5.4 c	57.3±4.7 ab	206.0±3.5 c	19.9±2.8 bc	73.0±0.2 a
	变异系数 CV (%)	5.8	9.7	14.4	6.3	36.1	0.5
越光 Koshihikari	N ₀	311.1±1.0 a	239.0±17.3 a	72.2±18.3 a	318.2±2.1 a	7.1±1.1 ab	72.5±0.5 a
	N ₉₀	280.5±3.1 c	211.6±11.4 ab	68.8±8.3 a	289.3±8.3 c	8.8±5.2 ab	72.4±1.7 a
	N ₁₃₅	300.5±7.2 b	226.1±7.3 ab	74.5±0.1 a	303.5±8.5 b	3.0±1.3 b	72.1±0.1 a
	N ₁₈₀	268.8±2.4 d	201.6±4.0 b	67.2±6.4 a	282.6±2.0 c	13.8±4.4 a	73.6±0.1 a
	N ₂₂₅	273.6±1.1 cd	204.7±11.6 b	69.0±12.7 a	280.9±1.4 c	7.2±0.3 ab	73.2±0.6 a
	变异系数 CV (%)	6.3	7.2	4.2	5.4	48.9	0.9
方差分析 (F 值) One way ANOVA analysis (F value)							
品种 Cultivar (C)		4782.52**	402.49**	36.74**	828.18**	136.46**	1.61ns
施氮量 N rate (N)		108.34**	12.41**	2.47ns	24.21**	15.24**	1.29ns
品种×施氮量 C×N		17.76**	3.69**	0.89ns	9.65**	2.73ns	0.66ns

注: 同列数据后不同小写字母表示同一品种处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, **表示0.01水平效果显著, ns表示无显著效果。
Note: Different lowercase letters after the data in a column indicate significant difference among treatments of a cultivar ($P<0.05$). In the ANOVA analysis, ** indicates significant effect at the 0.01 level, and ns indicates no significant effect.

表 5 施氮量对稻米食味值的影响
Table 5 Effects of N application rate on rice taste value

品种 Cultivar	处理 Treatment	外观 Appearance	口感 Taste	硬度 Hardness	粘度 Viscosity	平衡度 Balance degree	弹性 Springiness	食味值 Taste value
J20	N ₀	6.5±0.1 a	6.9±0.1 a	4.4±0.1 bc	0.8±0.4 a	0.2±0.1 a	0.7±0.1 a	77.7±0.6 a
	N ₉₀	6.5±0.1 a	6.7±0.1 a	3.9±0.1 c	0.8±0.4 a	0.2±0.1 a	0.7±0.1 ab	76.3±0.6 a
	N ₁₃₅	5.7±0.3 b	6.1±0.3 b	4.8±0.3 ab	1.0±0.4 a	0.2±0.1 a	0.7±0.1 a	70.7±1.5 b
	N ₁₈₀	5.3±0.1 c	5.7±0.1 c	5.1±0.4 a	1.0±0.6 a	0.2±0.1 a	0.6±0.1 b	67.3±1.5 c
	N ₂₂₅	4.6±0.1 d	5.1±0.1 d	4.8±0.6 ab	1.1±0.3 a	0.2±0.1 a	0.7±0.1 ab	63.0±1.7 d
	变异系数 CV (%)	14.2	12.1	10.1	14.3	0.0	6.6	8.7
越光 Koshihikari	N ₀	8.3±0.2 a	7.9±0.2 b	4.5±0.4 b	0.8±0.4 b	0.2±0.1 bc	0.6±0.2 a	85.3±0.6 b
	N ₉₀	7.6±0.2 b	7.4±0.1 c	4.2±0.2 b	1.0±0.1 ab	0.2±0.1 abc	0.7±0.1 a	82.3±1.2 c
	N ₁₃₅	8.5±0.1 a	8.3±0.2 a	4.7±0.4 ab	1.4±0.1 a	0.3±0.1 a	0.7±0.1 a	87.7±0.6 a
	N ₁₈₀	6.8±0.3 c	6.9±0.3 d	5.2±0.3 a	0.9±0.4 b	0.2±0.1 c	0.7±0.1 a	76.0±1.7 d
	N ₂₂₅	6.8±0.1 c	6.8±0.1 d	4.6±0.1 b	1.3±0.1 ab	0.3±0.1 ab	0.7±0.1 a	75.3±0.6 d
	变异系数 CV (%)	10.6	8.6	7.9	24.0	22.8	6.6	6.8
方差分析 (F 值) One way ANOVA analysis (F value)								
品种 Cultivar (C)		857.35**	489.94**	0.15 ns	0.93 ns	1.09 ns	2.29 ns	528.67**
施氮量 N rate (N)		106.40**	83.24**	10.54**	1.14 ns	1.14 ns	1.60 ns	115.58**
品种×施氮量 C×N		19.74**	17.91**	0.52 ns	0.53 ns	0.62 ns	2.98*	19.09**

注: 同列数据后不同小写字母表示同一品种处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, *, **分别表示在0.05、0.01水平效果显著, ns表示无显著效果。
Note: Different lowercase letters after the data in a column indicate significant difference among treatments of a cultivar ($P<0.05$). In the ANOVA analysis, * and ** indicate significant effects at the 0.05 and 0.01 levels respectively, and ns indicate no significant effect.

表 6 施氮量对稻米蛋白质含量、γ-氨基丁酸含量及胚重量的影响

Table 6 Effects of N application rate on protein content, GABA content, and embryo weight of rice

处理 Treatment	蛋白质含量 Protein (%)		GABA (mg/100 g)		粒胚重 Embryo weight (mg/100 embryo)	
	J20	越光 Koshihikari	J20	越光 Koshihikari	J20	越光 Koshihikari
N ₀	8.4±0.1 b	8.2±0.1 a	18.5±2.1 a	11.5±2.1 a	193.3±14.9 a	97.5±19.3 a
N ₉₀	8.4±0.1 b	8.4±0.1 a	21.5±0.7 a	14.0±2.8 a	228.2±47.4 a	88.3±13.5 a
N ₁₃₅	8.8±0.3 ab	8.4±0.1 a	23.5±2.1 a	16.5±0.7 a	252.4±29.8 a	128.6±41.1 a
N ₁₈₀	8.9±0.5 ab	8.5±0.1 a	21.0±1.4 a	13.0±2.8 a	230.4±49.8 a	106.8±23.7 a
N ₂₂₅	9.2±0.1 a	9.0±0.6 a	19.0±2.8 a	14.5±0.7 a	214.8±9.5 a	110.0±21.8 a
变异系数CV (%)	3.9	3.5	9.8	13.3	9.7	14.2
方差分析 (F 值) One way ANOVA analysis (F value)						
品种 Cultivar (C)	3.50 ns		55.05**		113.12**	
施氮量 N rate (N)	4.69*		3.14 ns		1.80 ns	
品种×施氮量 C×N	0.32 ns		0.44 ns		1.50 ns	

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。方差分析中，*、**表示0.05、0.01水平效果显著，ns表示无显著效果。
Note: Different lowercase letters after the data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). In the ANOVA analysis, * and ** indicate indicate significant effects at the 0.05 and 0.01 levels respectively, and ns indicate no significant effect.

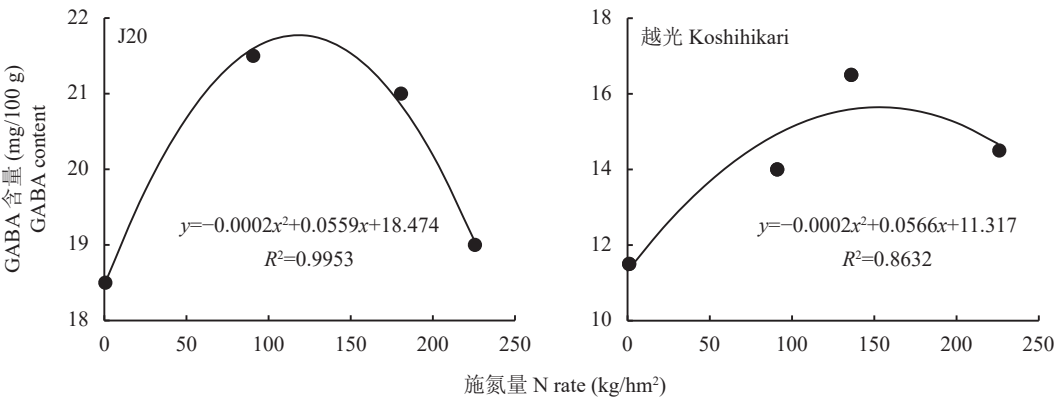


图 4 糙米 GABA 含量与施氮量的关系

Fig. 4 The relationship between GABA content of brown rice and N application rate

量、必需氨基酸含量、非必需氨基酸含量分别较 N₀ 处理增加 29.25%、23.49%、31.68% (J20) 和 19.34%、14.88%、21.33% (越光)。两个品种中各种氨基酸的平均含量以谷氨酸最高，其次为天冬氨酸、精氨酸、亮氨酸、丙氨酸、丝氨酸，甲硫氨酸最低。相同施氮量下 J20 的氨基酸总量均高于越光。

J20 产量与品质的相关性分析 (表 8) 表明，施氮量与每穗颖花数、蛋白质含量呈显著或极显著正相关，而与结实率、千粒重呈极显著或显著负相关；产量与有效穗数、糙米率、精米率、整精米率呈极显著或显著正相关，而与垩白粒率、垩白度呈极显著负相关；蛋白质含量与每穗颖花数呈极显著正相关，而与结实率、千粒重呈显著或极显著负相关；GABA 含量与精米率呈显著正相关。

3 讨论

3.1 施氮量对巨胚水稻产量及产量构成因素的影响

施氮量是决定水稻产量的关键性因素，只有在适宜的施氮量范围内，才能保障水稻高产、稳产。前人研究发现，在一定的施氮量范围 (0~390 kg/hm²) 内，水稻产量随施氮量增加而增加，但过量施氮会延缓植株成熟，导致非结构性碳水化合物在茎秆中积累，从而造成水稻减产^[22]。成臣等^[23]研究表明，随着施氮量增加，水稻的氮肥利用率先增后降，产量呈抛物线趋势，在施氮量为 225 kg/hm² 时达到最高产量，有效穗数和每穗粒数的提高是产量增加的主要原因，这一点也在本试验中得到验证。徐春梅等^[24]研究指出，低密度种植时，在施氮量为 165 kg/hm²

表 7 施氮量对糙米中水解氨基酸含量的影响 (mg/100 mg)
Table 7 Effects of N application rate on hydrolyzed amino acid content in brown rice

氨基酸 Amino acid	J20					越光 Koshihikari				
	N ₀	N ₉₀	N ₁₃₅	N ₁₈₀	N ₂₂₅	N ₀	N ₉₀	N ₁₃₅	N ₁₈₀	N ₂₂₅
必需氨基酸 Essential amino acid										
苏氨酸 (Thr)	0.20±0.03 b	0.21±0.03 ab	0.22±0.01 ab	0.24±0.01 ab	0.25±0.01 a	0.19±0.01 c	0.20±0.01 bc	0.21±0.01 bc	0.21±0.01 ab	0.23±0.01 a
缬氨酸 (Val)	0.29±0.01 a	0.35±0.10 a	0.26±0.01 a	0.26±0.02 a	0.30±0.02 a	0.28±0.01 ab	0.30±0.02 a	0.30±0.01 a	0.26±0.01 b	0.28±0.01 ab
甲硫氨酸 (Met)	0.09±0.01 a	0.11±0.05 a	0.10±0.03 a	0.06±0.04 a	0.14±0.12 a	0.08±0.01 a	0.10±0.01 a	0.08±0.01 a	0.09±0.03 a	0.08±0.01 a
异亮氨酸 (Ile)	0.15±0.01 b	0.19±0.03 ab	0.19±0.01 ab	0.20±0.01 a	0.20±0.01 a	0.19±0.01 ab	0.21±0.01 a	0.21±0.01 a	0.19±0.01 b	0.19±0.01 ab
亮氨酸 (Leu)	0.47±0.01 c	0.49±0.04 bc	0.51±0.04 abc	0.57±0.01 ab	0.58±0.03 a	0.45±0.01 c	0.49±0.01 bc	0.51±0.01 b	0.51±0.01 b	0.56±0.03 a
苯丙氨酸 (Phe)	0.25±0.01 c	0.26±0.02 bc	0.30±0.02 ab	0.32±0.01 a	0.33±0.02 a	0.27±0.01 b	0.33±0.01 a	0.32±0.04 a	0.30±0.01 ab	0.33±0.02 a
赖氨酸 (Lys)	0.21±0.01 c	0.21±0.01 bc	0.25±0.01 a	0.24±0.01 ab	0.25±0.01 a	0.22±0.01 c	0.24±0.01 bc	0.24±0.01 abc	0.25±0.01 ab	0.26±0.01 a
天冬氨酸 (Asp)	0.64±0.15 a	0.66±0.13 a	0.65±0.01 a	0.69±0.01 a	0.72±0.04 a	0.55±0.01 c	0.58±0.01 bc	0.60±0.01 b	0.61±0.02 b	0.67±0.02 a
丝氨酸 (Ser)	0.31±0.03 b	0.31±0.03 b	0.34±0.01 ab	0.35±0.01 ab	0.38±0.02 a	0.29±0.01 b	0.30±0.01 ab	0.32±0.01 ab	0.34±0.01 ab	0.36±0.05 a
谷氨酸 (Glu)	1.08±0.09 b	1.10±0.05 b	1.16±0.03 ab	1.21±0.01 ab	1.29±0.08 a	1.08±0.02 a	1.13±0.03 a	1.20±0.02 a	1.15±0.02 a	1.20±0.12 a
甘氨酸 (Gly)	0.27±0.01 b	0.28±0.01 b	0.31±0.04 ab	0.35±0.01 a	0.36±0.01 a	0.28±0.01 c	0.30±0.01 bc	0.30±0.01 bc	0.33±0.01 ab	0.35±0.03 a
丙氨酸 (Ala)	0.35±0.01 c	0.35±0.01 c	0.43±0.04 b	0.50±0.01 a	0.51±0.01 a	0.35±0.01 b	0.37±0.01 ab	0.40±0.01 ab	0.40±0.02 ab	0.43±0.05 a
半胱氨酸 (Cys)	0.11±0.05 b	0.15±0.01 b	0.14±0.04 b	0.19±0.04 b	0.31±0.04 a	0.05±0.01 b	0.06±0.01 b	0.06±0.01 b	0.19±0.06 a	0.18±0.02 a
酪氨酸 (Tyr)	0.20±0.01 c	0.21±0.02 c	0.25±0.01 b	0.29±0.01 a	0.30±0.01 a	0.23±0.01 c	0.25±0.01 bc	0.27±0.01 ab	0.26±0.01 ab	0.28±0.02 a
精氨酸 (Arg)	0.41±0.01 c	0.49±0.03 b	0.53±0.04 b	0.60±0.01 a	0.62±0.03 a	0.52±0.02 b	0.55±0.01 ab	0.55±0.01 ab	0.52±0.01 b	0.57±0.03 a
脯氨酸 (Pro)	0.28±0.04 b	0.29±0.01 b	0.29±0.01 b	0.32±0.01 ab	0.35±0.01 a	0.27±0.01 a	0.25±0.01 a	0.29±0.01 a	0.28±0.12 a	0.25±0.03 a
组氨酸 (His)	0.17±0.03 a	0.17±0.08 a	0.16±0.03 a	0.17±0.01 a	0.19±0.03 a	0.13±0.01 a	0.14±0.01 a	0.13±0.01 a	0.17±0.04 a	0.26±0.12 a
总量 Total	5.47±0.03 d	5.82±0.28 cd	6.08±0.12 c	6.55±0.04 b	7.07±0.20 a	5.43±0.08 c	5.77±0.13 bc	5.98±0.09 b	6.04±0.15 b	6.48±0.21 a

注: 同行数据后不同小写字母表示同一品种处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the data in a row indicate significant difference among treatments of a cultivar ($P < 0.05$).

表 8 水稻产量与品质的相关性分析
Table 8 Correlation analysis between rice yield and quality traits

指标 Index	施氮量 N rate	有效穗数 EP	每穗颖花数 SPA	结实率 SSR	千粒重 1000-GW	产量 Yield	糙米率 BRR	精米率 MRR	整精米率 HRR	垩白粒率 CGR	垩白度 Chalkiness	蛋白质 Protein	GABA
施氮量 N rate	1												
有效穗数 EP	0.743	1											
每穗颖花数 SPA	0.959**	0.646	1										
结实率 SSR	-0.995**	-0.703	-0.974**	1									
千粒重 1000-GW	-0.958*	-0.584	-0.989**	0.969**	1								
产量 Yield	0.72	0.991**	0.658	-0.687	-0.584	1							
糙米率 BRR	0.622	0.947*	0.448	-0.569	-0.396	0.904*	1						
精米率 MRR	0.596	0.944*	0.426	-0.532	-0.387	0.903*	0.983**	1					
整精米率 HRR	0.64	0.972**	0.575	-0.595	-0.511	0.982**	0.887*	0.918*	1				
垩白粒率 CGR	-0.628	-0.975**	-0.512	0.571	0.461	-0.961**	-0.946*	-0.976**	-0.982**	1			
垩白度 Chalkiness	-0.742	-0.992**	-0.638	0.694	0.59	-0.978**	-0.939*	-0.957*	-0.978**	0.987**	1		
蛋白质 Protein	0.923*	0.602	0.973**	-0.927*	-0.984**	0.615	0.386	0.406	0.57	-0.505	-0.621	1	
GABA	0.174	0.767	0.006	-0.109	0.064	0.742	0.871	0.882*	0.783	-0.844	-0.763	-0.032	1

Note: EP—Effective panicle; SPA—Spikelets per panicle; SSR—Seed-setting rate; 1000—GW—1000-grain weight; BRR—Brown rice rate; MRR—Milled rice rate; HRR—Head rice rate; CGR—Chalky grain rate. *— $P<0.05$; **— $P<0.01$.

时产量最高, 结实率随施氮量增加整体呈下降趋势, 千粒重在各处理间差异不显著, 产量增加主要是由于高施氮处理提高了有效穗数。综上, 由于品种及地域差异, 不同水稻品种获得最高产量的施氮量也不尽相同。本研究结果表明, 随着施氮量增加, 两个品种的产量呈先上升后下降的趋势, 以施氮量为 135 kg/hm^2 时产量最高, 再增施氮肥, 容易造成群体量过大而引起倒伏减产, 且施氮量过多易增加无效分蘖, 导致水稻秆细穗小, 最终产量下降, 同时根据两品种产量与施氮量建立效应方程计算得出, J20 最高产量的施氮量为 136.22 kg/hm^2 , 越光最高产量的施氮量为 136.68 kg/hm^2 , 与实际值较吻合。前人研究发现, 随着施氮量增加, 水稻增产的原因有的是由于有效穗数和穗粒数同步提高^[25], 有的只是由于穗粒数增加, 而有效穗数先增后减^[26], 本研究结果与后者较为一致, 这可能是由于四川盆地的气候特点是弱光寡照、高湿度, 从而限制了单位面积水稻的容穗量^[27], 加之氮肥用量过高易导致群体生长过密, 加剧无效分蘖的发生和生长, 降低成穗率^[26]。值得注意的是, 在本研究中, 相同施氮量下越光的千粒重、产量均高于巨胚稻 J20, 这可能是由于巨胚稻 J20 的胚所占的比例增加, 籽粒没有充足的空间积累淀粉, 胚乳发育不良而导致千粒重明显下降^[19], 也可能是由于胚增大所消耗的能量来源于水稻中的淀粉, 淀粉的大量减少导致千粒重减少、产量下降^[28]。

3.2 施氮量对巨胚水稻加工品质、外观品质及蒸煮食味品质的影响

关于施氮量对水稻加工品质及外观品质的影响, 不同的研究人员有着不同的结论。张军等^[29]研究发现, 施氮量与稻米的糙米率、精米率和整精米率呈正相关, 而与垩白粒率和垩白度呈负相关, 说明增加施氮量有利于加工品质及外观品质的提升。兰艳等^[30]认为, 适宜的施氮量可提高根系活力, 促进物质运转, 增加籽粒质量和充实度, 从而提高加工品质, 但施氮量过高也会导致籽粒灌浆受阻, 不饱满度增加, 最终加工品质下降。殷春渊等^[31]研究表明, 施氮量对稻米的糙米率、精米率和整精米率影响较小, 低氮处理下加工品质较优, 而垩白粒率和垩白度随施氮量增加先降后增, 说明适宜的施氮量有利于外观品质改善。本研究表明, 在一定范围内, 两个品种的糙米率、精米率和整精米率随施氮量增加而增加, 垩白粒率和垩白度随施氮量增加而降低, 但当氮肥用量超过 135 kg/hm^2 时, 加工品质及外观

品质变劣, 同时根据两品种的糙米率、整精米率、垩白粒率与施氮量建立效应方程计算得出, 糙米率达到最大的适宜施氮量分别为 113 kg/hm^2 (J20)、 132.25 kg/hm^2 (越光), 整精米率达到最大的适宜施氮量分别为 131.50 kg/hm^2 (J20)、 125.25 kg/hm^2 (越光), 垩白粒率达到最低的适宜施氮量分别为 142.75 kg/hm^2 (J20)、 140.90 kg/hm^2 (越光)。糙米中蛋白质含量增加会导致淀粉分散性降低, 或是稻米硬度增加, 抗碾磨能力得到增强^[32], 这可能是 J20 的整精米率略高于越光的原因, 相同施氮量下, J20 蛋白质含量高于越光。相同施氮量下 J20 的垩白粒率、垩白度均高于越光, 推测是由于胚的异常发育, 导致过度消耗进入籽粒的碳源, 进而影响胚乳淀粉合成所致, 或是垩白部位距胚较远, 碳源运输效率降低, 导致淀粉填充不足所致^[33], 也可能是由于 J20 叶面积过大, 叶片重叠加剧, 植株光合作用减弱, 制造的有机物少所致^[30]。

淀粉 RVA 谱特性与稻米的食味性有着密切关系, 食味品质较好的稻米一般表现为峰值黏度高、崩解值大、消减值小, 而品质差的稻米则相反^[34]。一般认为, 随着施氮量增加, 稻米的峰值黏度和崩解值呈下降趋势, 消减值则呈上升趋势, 说明施氮量与稻米淀粉 RVA 谱特性呈负相关^[35-36]。而郭涛等^[37]发现, 峰值黏度、热浆黏度、最终黏度随施氮量增加而下降, 崩解值先增后降, 消减值无明显变化规律, 表明过高或过低的氮肥水平均使 RVA 谱变差。本研究表明, 随着施氮量的增加, 两个品种的峰值黏度、热浆黏度和最终黏度呈下降趋势, 崩解值和消减值无明显规律性变化, N_{135} 处理下两品种的崩解值最大, 消减值最小, 但与 N_0 处理差异不显著, 糊化温度整体呈上升趋势, 各处理间差异不显著。相同施氮量下 J20 的峰值黏度、热浆黏度、崩解值和最终黏度均低于越光, 这可能是由于 J20 蛋白质含量较高, 抑制水分与米粉的结合, 从而降低黏度^[38]。

食味计测得的食味值是对米质的综合评价, 该值越大则说明食味品质越好。高辉等^[39]认为, 随施氮量增加稻米的食味值呈下降趋势, 且不同品种对氮肥用量的反应敏感程度不同, 施氮量和水稻生育类型对食味值存在极显著影响。王艳等^[40]研究也发现随施氮量增加稻米的食味值显著下降。本研究表明, 不同品种对施氮量的响应存在差异, J20 的食味值随施氮量增加而逐渐下降, 各施氮处理的平均食味值较 N_0 处理下降了 10.73%, 越光的食味值在 N_{135} 处理达到最大, N_{225} 处理最小, 施氮量对稻米食味各指标

影响不同,其中外观和口感最易受到氮肥影响,这与姜元华等^[41]研究结果一致。

综上所述,同一品种对不同食味评价方法的响应存在差异,不同品种对氮肥响应的敏感程度也有所不同,J20 食味品质受施氮量的影响大于越光。综合淀粉 RVA 谱特性和食味计综合评分,在本试验条件下,以 N_0 处理 J20 的蒸煮食味品质较好,在实际生产上,我们应根据不同品种选择适宜的氮肥用量。

3.3 施氮量对巨胚稻米蛋白质含量、 γ -氨基丁酸(GABA)含量及胚重量的影响

稻米的蛋白质品质主要由两方面构成:蛋白质含量和蛋白质质量。蛋白质含量是指糙米中蛋白质占糙米干重的百分比,蛋白质质量一般由赖氨酸(第一限制性氨基酸)的含量来评价^[42]。张庆等^[43]研究发现,增加施氮量能够提高稻米的蛋白质含量,降低直链淀粉含量,其原因可能为植株体内氮素积累,蛋白合成相关酶活性加强,从而促进蛋白质合成。但稻米的蛋白质含量过高,会制约早期蒸煮过程中稻米对水分的吸收,影响米粒的水合作用,导致食味品质下降^[44]。徐大勇等^[45]认为,稻米的蛋白质含量和氨基酸含量随施氮量增加而增加,其中以谷氨酸含量最高,组氨酸含量最低,且不同品种的蛋白质及氨基酸含量对施氮量的敏感性不同,本研究结论与其较为一致。随着施氮量增加,两个品种的蛋白质含量和氨基酸含量整体呈增加趋势,各种氨基酸的平均含量以谷氨酸最高,甲硫氨酸最低,说明增施氮肥可有效提高稻米的营养品质,而且非必需氨基酸对施氮量的响应比必需氨基酸敏感,与 N_0 处理比,蛋白质和氨基酸含量在 N_{225} 处理下的增幅最大。相同施氮量下 J20 的蛋白质含量、氨基酸总量均高于越光,但赖氨酸含量与越光差异不明显。

γ -氨基丁酸(GABA)是一种天然存在的非蛋白质氨基酸,具有多种生理功能,特别是对高血压、脑血管疾病等有着特殊疗效。周鑫^[46]研究发现,巨胚糙米和预先发芽的巨型胚糙米均能明显降低自发性高血压大鼠的血压,而正常血压大鼠在整个试验周期内的血压无明显差异变化,且发芽巨胚糙米组血浆中甘油三酯(TG)含量明显降低。Kang 等^[47]认为,在高脂饮食条件下,饲喂巨胚糙米能显著抑制小鼠体重增加,降低血糖浓度、血浆总胆固醇和甘油三酯浓度。因此,食疗同源的巨胚水稻具有独特和潜在的经济利用价值以及广泛的应用前景。本研究表明,随着施氮量增加,两个品种的 GABA 含量和胚

重量先增后降,在 N_{135} 处理达到最大,J20 各处理的平均 GABA 含量较越光显著增加 48.92%,J20 胚重达越光胚的 2 倍,说明 J20 功能特性明显优于普通稻,在治疗或预防高血压等疾病中,其可以成为一种较好的饮食选择,同时根据两品种 GABA 含量与施氮量建立效应方程计算得出,功能成分(GABA)含量最高的施氮量分别为 139.75 kg/hm^2 (J20)、 141.50 kg/hm^2 (越光),略高于实际值。值得注意的是,GABA 主要存在于米胚中,而在加工碾磨过程中这部分往往随米糠层一同被废弃,另因为糙米的膨胀性和吸水性较差,蒸煮困难,米饭口感粗糙,且不易消化吸收,最终导致不受人们欢迎。因此,如何兼顾巨胚糙米的蒸煮食味品质和营养品质,成为科学家研究的问题之一。有研究表明,糙米浸水后可提高胚中的谷氨酸脱羧酶活性,促进谷氨酸转化为 GABA^[48],并且发芽糙米米糠中的纤维被软化,糙米的蒸煮性和口感得到改善,即发芽糙米的食用性与精白米相近,其营养价值及功能特性大大高于糙米,更胜于精白米^[42]。综上,在对巨胚糙米研究的基础上,发芽的巨胚糙米也值得我们深入研究。

4 结论

施氮 135 kg/hm^2 时,巨胚水稻产量最高,加工品质、外观品质及 GABA 含量最佳,超过此用量会降低巨胚水稻产量、米质及功能成分含量,蒸煮食味品质变劣。根据水稻产量、糙米率、整精米率、垩白粒率、GABA 含量与施氮量建立的效应方程计算得出,两品种高产优质的适宜施氮范围为 $130 \sim 140 \text{ kg/hm}^2$ 。与品种越光相比,品种 J20 的产量、整精米率和食味值对氮肥较为敏感,且相同施氮量下 J20 的蛋白质含量、水解氨基酸总量及 GABA 含量均高于越光。

参考文献:

- [1] Chen Q, He A B, Wang W Q, *et al.* Comparisons of regeneration rate and yields performance between inbred and hybrid rice cultivars in central China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 223: 164–170.
- [2] 胡时开, 胡培松. 功能稻米研究现状与展望[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(4): 311–325.
Hu S K, Hu P S. Research status and prospects of functional rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(4): 311–325.
- [3] 方慧敏, 葛城成, 张晶, 张龙. 水稻巨胚突变体的基因克隆与功能研究进展[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(21): 7092–7100.
Fang H M, Ge C C, Zhang J, Zhang L. Gene cloning and functional research progress of giant embryo mutant in rice[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(21): 7092–7100.

- [4] 魏振承, 张名位, 池建伟, 等. 引进巨胚稻与普通稻的米质和营养成分分析比较[J]. *植物遗传资源学报*, 2005, 6(4): 386–389.
Wei Z C, Zhang M W, Chi J W, *et al.* Analysis and comparison of rice quality and nutritional components between introduced giant embryo rice and ordinary rice[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2005, 6(4): 386–389.
- [5] 郑植, 黄忠财, 张艳华, 等. 巨胚水稻的研究进展[J]. *亚热带农业研究*, 2012, 8(4): 221–225.
Zheng Z, Huang Z C, Zhang Y H, *et al.* Research progress on giant embryo rice[J]. *Subtropical Agricultural Research*, 2012, 8(4): 221–225.
- [6] Peng B, Xu K, He K, *et al.* Genetic basis of giant embryo traits and effects of environmental factors on giant embryo rice[J]. *Journal of Molecular Biology Research*, 2019, 9(1): 149–159.
- [7] Kawakami K, Yamada K, Yamada T, *et al.* Antihypertensive effect of γ -aminobutyric acid-enriched brown rice on spontaneously hypertensive rats[J]. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 2018, 64(1): 56–62.
- [8] Chung S I, Kang M Y, Tundis R. Oral administration of germinated, pigmented, giant embryo rice (*Oryza sativa* L. cv. Keunnamjamsi) extract improves the lipid and glucose metabolisms in high-fat diet-fed mice[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021, 2021: 1–9.
- [9] Hee-K S, Hye-W S, Eun-S J, *et al.* Gochujang prepared using rice and wheat koji partially alleviates high-fat diet-induced obesity in rats[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(3): 1562–1573.
- [10] Pan J F, Liu Y Z, Zhong X H, *et al.* Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in south China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 191–200.
- [11] Ju C, Buresh R J, Wang Z, *et al.* 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.
- [12] 张鑫, 平宝哲, 张英侠, 等. “上师大5号”巨胚水稻巨胚基因分子标记的建立[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(11): 4512–4517.
Zhang X, Ping B Z, Zhang Y X, *et al.* Establishment of molecular markers of giant embryo gene in “Shangshida No. 5” giant embryo rice[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(11): 4512–4517.
- [13] 章清杞, 张静, 陈健勇, 等. 巨胚稻籽粒灌浆特性研究[J]. *核农学报*, 2006, 20(1): 6–9.
Zhang Q Q, Zhang J, Chen J Y, *et al.* Study on grain filling characteristics of giant embryo rice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2006, 20(1): 6–9.
- [14] 张艳华, 郑植, 陈幼玉, 等. 巨胚稻新品系的营养成分分析[J]. *核农学报*, 2013, 27(9): 1331–1336.
Zhang Y H, Zheng Z, Chen Y Y, *et al.* Analysis of nutritional components of new giant embryo rice lines[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(9): 1331–1336.
- [15] 张晶. 巨胚水稻突变体胚的发育和糙米理化特性研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学硕士学位论文, 2021.
Zhang J. Study on embryo development and physicochemical properties of brown rice[D]. Yangzhou, Jiangsu: MS Thesis of Yangzhou University, 2021.
- [16] 韩龙植, 南钟浩, 全东兴, 曹桂兰. 特种稻种质创新与营养特性评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2003, 4(3): 207–213.
Han L Z, Nan Z H, Quan D X, Cao G L. Germplasm innovation and nutritional characteristics evaluation of special rice[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2003, 4(3): 207–213.
- [17] 章清杞, 陈健勇, 黄荣华, 张书标. 巨胚稻胚发育的解剖学观察[J]. *核农学报*, 2008, 22(2): 122–126.
Zhang Q Q, Chen J Y, Huang R H, Zhang S B. Anatomical observation on embryo development of giant embryo rice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22(2): 122–126.
- [18] 任永刚, 张建中, 张红梅, 等. 通过成熟胚离体培养获得巨胚水稻新品种及性状和稻米品质分析[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 40(3): 289–294.
Ren Y G, Zhang J Z, Zhang H M, *et al.* New giant embryo rice varieties obtained by in vitro culture of mature embryos and their characters and rice quality analysis[J]. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 40(3): 289–294.
- [19] 张琳琳. 水稻巨大胚突变的特征特性与灌浆启动代谢谱[D]. 浙江杭州: 浙江大学博士学位论文, 2008.
Zhang L L. Characteristics of giant embryo mutation in rice and metabolic spectrum of grain filling and germination[D]. Hangzhou, Zhejiang: PhD Dissertation of Zhejiang University, 2008.
- [20] 杨艳荔. 优质巨胚稻营养成分分析及发芽试验[D]. 福建福州: 福建农林大学硕士学位论文, 2008.
Yang Y L. Analysis of nutritional components and germination test of high-quality giant embryo rice[D]. Fuzhou, Fujian: MS Thesis of Fujian Agriculture and Forestry University, 2008.
- [21] 戴红燕, 张荣萍, 华劲松, 蔡光泽. 不同栽培方式对粳型巨胚稻产量与品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 179–183.
Dai H Y, Zhang R P, Hua J S, Cai G Z. Effects of different cultivation methods on yield and quality of japonica giant embryo rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 179–183.
- [22] 李俊周, 邵鹏, 陈星, 等. 氮肥用量对杂交籼稻Y两优886冠层结构和产量的影响[J]. *中国稻米*, 2018, 24(4): 113–116.
Li J Z, Shao P, Chen X, *et al.* Effects of nitrogen application on canopy structure and yield of indica hybrid rice Yliangyou 886[J]. *China Rice*, 2018, 24(4): 113–116.
- [23] 成臣, 曾勇军, 王祺, 等. 施氮量对晚粳稻甬优1538产量、品质及氮素吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 222–228.
Cheng C, Zeng Y J, Wang Q, *et al.* Effects of nitrogen application rate on yield, quality and nitrogen absorption and utilization of late japonica rice Yongyou 1538[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 222–228.
- [24] 徐春梅, 周昌南, 郑根深, 等. 施氮量和栽培密度对超级早稻不同器官氮素积累与转运及其吸收利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011, (1): 15–20.
Xu C M, Zhou C N, Zheng G S, *et al.* Effects of nitrogen application rate and cultivation density on nitrogen accumulation, transport and absorption and utilization efficiency in different organs of super early rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, (1): 15–20.

- [25] 从夕汉, 施伏芝, 阮新民, 等. 氮肥水平对不同基因型水稻氮素利用率、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1219–1226.
Cong X H, Shi F Z, Ruan X M, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer level on nitrogen use efficiency, yield and quality of different genotypes of rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1219–1226.
- [26] 魏海燕, 王亚江, 孟天瑶, 等. 机插超级梗稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 488–496.
Wei H Y, Wang Y J, Meng T Y, *et al.* Response of yield, quality and nitrogen use efficiency of machine transplanted super japonica rice to nitrogen fertilizer[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 488–496.
- [27] 李旭毅, 孙永健, 程洪彪, 等. 两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式水稻干物质积累和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 773–781.
Li X Y, Sun Y J, Cheng H B, *et al.* Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and yield of rice under different cultivation methods under two ecological conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(4): 773–781.
- [28] 杜冰. 巨胚稻胚生长动态及营养成分研究[D]. 吉林延吉: 延边大学硕士学位论文, 2014.
Du B. Study on embryo growth dynamics and nutritional components of giant embryo rice[D]. Yanji, Jilin: MS Thesis of Yanbian University, 2014.
- [29] 张军, 张洪程, 段祥茂, 等. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(11): 2020–2029.
Zhang J, Zhang H C, Duan X M, *et al.* Effects of soil fertility and nitrogen application rate on yield, quality and nitrogen use efficiency of super rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(11): 2020–2029.
- [30] 兰艳, 黄鹏, 江谷驰弘, 等. 成都平原稻作区施氮量和栽插密度对梗稻D46产量及品质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(1): 63–73.
Lan Y, Huang P, Jiang G C H, *et al.* Effects of nitrogen application rate and planting density on yield and quality of japonica rice D46 in Chengdu plain[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition), 2016, 42(1): 63–73.
- [31] 殷春渊, 王书玉, 刘贺梅, 等. 氮肥施用量对超级梗稻新稻18号强、弱势籽粒灌浆和稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(5): 503–510.
Yin C Y, Wang S Y, Liu H M, *et al.* Effects of nitrogen application rate on strong and weak grain filling and rice quality of super japonica rice Xindao 18[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2013, 27(5): 503–510.
- [32] 徐春梅, 王丹英, 邵国胜, 等. 施氮量和栽插密度对超高产水稻中早22产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(5): 507–512.
Xu C M, Wang D Y, Shao G S, *et al.* Effects of nitrogen application rate and planting density on yield and quality of super high yield rice Zhongzao 22[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(5): 507–512.
- [33] 葛鑫源, 刘世家, 李欣, 等. 水稻巨大胚突变体N2-52蛋白形成机制研究[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(2): 217–224.
Ge X Y, Liu S J, Li X, *et al.* Study on chalkiness formation mechanism of rice giant embryo mutant N2-52[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2021, 44(2): 217–224.
- [34] 杨陶陶, 解嘉鑫, 黄山, 等. 花后增温对双季晚梗稻产量和稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(7): 1338–1347.
Yang T T, Xie J X, Huang S, *et al.* Effects of post anthesis warming on yield and rice quality of double cropping late japonica rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(7): 1338–1347.
- [35] 文春燕, 熊运华, 姚晓云, 等. 氮肥施用对米粉专用稻产量、米质及加工特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(6): 574–585.
Wen C Y, Xiong Y H, Yao X Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application on rice quality and yield of special rice flour[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2020, 34(6): 574–585.
- [36] 胡雅杰, 钱海军, 吴培, 等. 秸秆还田条件下氮磷钾用量对软米梗稻产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 817–824.
Hu Y J, Qian H J, Wu P, *et al.* Effects of the amount of nitrogen, phosphorus and potassium on the yield and quality of soft rice japonica rice under the condition of straw returning[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(3): 817–824.
- [37] 郭涛, 王海凤, 薛芳, 等. 氮肥追施量对香稻1601品质和淀粉RVA谱特征值的影响[J]. 北方水稻, 2021, 51(1): 6–10.
Guo T, Wang H F, Xue F, *et al.* Effects of topdressing amount of nitrogen fertilizer on quality and RVA spectrum eigenvalues of starch of fragrant rice 1601[J]. North Rice, 2021, 51(1): 6–10.
- [38] Zhu D W, Zhang H C, Guo B W, *et al.* Effect of nitrogen management on the structure and physicochemical properties of rice starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(42): 8019–8025.
- [39] 高辉, 马群, 李国业, 等. 氮肥水平对不同生育类型梗稻米蒸煮食味品质的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21): 4543–4552.
Gao H, Ma Q, Li G Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer level on cooking and eating quality of japonica rice of different growth types[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(21): 4543–4552.
- [40] 王艳, 崔晶, 王小波, 等. 施肥对中日水稻品系土壤养分及食味品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 286–289.
Wang Y, Cui J, Wang X B, *et al.* Effects of fertilization on soil nutrients and eating quality of Chinese and Japanese rice strains[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 286–289.
- [41] 姜元华, 赵可, 许俊伟, 等. 氮肥水平对梗型软米食味特征与质构特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 288–295.
Jiang Y H, Zhao K, Xu J W, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer level on taste and texture characteristics of japonica soft rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(2): 288–295.
- [42] 叶新福. 不同基因型稻米营养保健品质及其利用技术研究[D]. 福建福州: 福建农林大学博士学位文, 2009.
Ye X F. Study on nutritional and health quality and utilization technology of different genotypes of rice[D]. Fuzhou, Fujian: PhD Dissertation of Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- [43] 张庆, 郭保卫, 胡雅杰, 等. 不同氮肥水平下优质高产软米梗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, *et al.* Yield and quality differences of high-quality and high-yield soft rice japonica rice under different nitrogen fertilizer levels[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2021,

- 35(6): 606–616.
- [44] Zhu D W, Zhang H C, Guo B W, *et al.* Effects of nitrogen level on yield and quality of japonica soft super rice[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5): 1018–1027.
- [45] 徐大勇, 金军, 杜永, 等. 氮磷钾肥运筹对水稻子粒蛋白质和氨基酸含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 506–508.
- Xu D Y, Jin J, Du Y, *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer operation on protein and amino acid contents of rice grains[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2003, 9(4): 506–508.
- [46] 周鑫. “上师大5号”巨胚糙米对缓解大鼠高血压效应分析[D]. 上海: 上海师范大学硕士学位论文, 2015.
- Zhou X. Effect of "Shangshida No. 5" giant embryo brown rice on relieving hypertension in rats[D]. Shanghai: MS Thesis of Shanghai Normal University, 2015.
- [47] Kang M Y, Moon J E, Lee S C. Modulatory effects of functional rice cultivars giant embryo and aranghyangchal on the body weight and lipid metabolism in mice fed with a high fat diet [J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2013, 16(2): 167–171.
- [48] 刘玲珑, 江玲, 刘世家, 等. 巨胚水稻W025糙米浸水后 γ -氨基丁酸含量变化的研究[J]. *作物学报*, 2005, 31(10): 1265–1270.
- Liu L L, Jiang L, Liu S J, *et al.* Giant embryo rice W025 brown rice soaked in water study on the change of γ -aminobutyric acid content [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(10): 1265–1270.