

引用格式:

胡田, 袁帅, 胡溶, 易镇邪, 陈光辉. 施氮量和种植密度对优质晚稻稻米品质的调控效应及其机制[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(3): 251–259.

HU T, YUAN S, HU R, YI Z X, CHEN G H. Regulatory effects of nitrogen and density interaction on grain quality of high-quality late rice and its mechanism[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(3): 251–259.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



施氮量和种植密度对优质晚稻稻米品质的调控效应及其机制

胡田, 袁帅, 胡溶, 易镇邪*, 陈光辉*

(湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要: 以‘玉针香’为材料, 设计 4 个施氮量处理, 分别为 N1(不施氮)、N2(尿素 180 kg/hm²)、N3(尿素 126 kg/hm²)、N4(180 kg/hm² 尿素+生物炭 200 t/hm²), 2 个种植密度处理, 分别为 D1(18 cm×25 cm)、D2(14 cm×25 cm), 于 2020—2021 年开展大田试验, 研究施氮量、种植密度及其互作对稻米品质与叶片氮代谢特征的影响。结果表明: 种植密度对稻米出米率、直链淀粉含量、胶稠度、蛋白质组分均无显著影响, D2 处理各指标均略高于 D1 处理; 施氮提高了出米率与各蛋白质组分含量, 降低了垩白粒率和垩白度, 以 N4 处理的效果最好; 施氮量与种植密度互作对稻米品质影响显著, N4D2 处理的稻米加工品质与外观品质最优, 胶稠度最长, 蛋白质组分含量最高; 种植密度对叶片含氮量、硝态氮含量以及硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)活性均无显著影响; D2 处理的叶片含氮量以及 NR、NiR 活性较高; 施氮提高了叶片全氮含量、硝态氮含量以及 NR、NiR 活性, 以 N4 处理的最高; 相关性分析结果表明, 叶片全氮含量、NR 活性、NiR 活性与整精米率、直链淀粉含量、胶稠度、蛋白组分含量呈显著或极显著正相关, 与垩白粒率和垩白度呈显著或极显著负相关; 增施生物炭可显著提高整精米率, 显著降低垩白度和垩白粒率。本试验条件下, N4D2 处理对优质晚稻稻米品质的调控效应最好, 其调控机制在于提高了叶片全氮含量和氮代谢酶活性。

关 键 词: 晚稻; 施氮量; 种植密度; 稻米品质

中图分类号: S511.044

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)03-0251-09

Regulatory effects of nitrogen and density interaction on grain quality of high-quality late rice and its mechanism

HU Tian, YUAN Shuai, HU Rong, YI Zhenxie*, CHEN Guanghui*

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: In order to understand the regulatory effect and mechanism of nitrogen application rate and density on the quality of high-quality late rice, Yuzhenxiang was used as material to conduct field experiment under four nitrogen application rates including no nitrogen(N1), 180 kg/hm² urea(N2), 126 kg/hm² urea(N3), 180 kg/hm² urea+200 t/hm² biochar(N4) and two densities including 18 cm×25 cm(D1), 14 cm×25 cm(D2), and the rice quality and leaf nitrogen metabolism characteristics were collected for further comparative analysis for each treatment. The results showed that density had no significant effect on head rice yield, amylose content, gel consistency and protein fraction, and the

收稿日期: 2022-10-26

修回日期: 2023-04-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0301005)

作者简介: 胡田(1987—), 男, 湖南湘阴人, 博士研究生, 主要从事水稻高产优质栽培研究, 1935550134@qq.com; *通信作者, 易镇邪, 博士, 教授, 主要从事作物高产生理与资源高效利用研究, yizhenxie@126.com; *通信作者, 陈光辉, 博士, 教授, 主要从事水稻栽培与遗传育种研究, cgh68@163.com

indexes of D2 treatments were slightly higher than those of D1 treatments. Nitrogen application increased head rice yield and protein content, reduced chalkiness grain rate and chalkiness, and N4 treatment had the best effect. The interaction effect of nitrogen application rate and density on rice quality was significant, and N4D2 treatment had the best processing quality and appearance quality, the longest gel consistency and the highest protein fraction content. Density had no significant effect on leaf nitrogen content, nitrate nitrogen content, nitrate reductase(NR) and nitrite reductase(NiR) activities, while D2 treatments had slightly higher leaf nitrogen content, NR and NiR activities. Nitrogen application increased leaf nitrogen content, nitrate nitrogen content, NR and NiR activity, and N4 treatment was the highest. The correlation analysis showed that leaf nitrogen content, NR and NiR activity were significantly or extremely significantly positively correlated with head rice rate, amylose content, gel consistency and protein fraction content, and significantly or extremely significantly negatively correlated with chalkiness grain rate and chalkiness. Increasing biochar application could improve rice quality, mainly by increasing head rice rate and decreasing chalkiness and chalky grain rate. In the studied conditions, N4D2 treatment had the best regulatory effect on the quality of high-quality rice, and its regulatory mechanism was to improve the nitrogen content in leaves and the activity of nitrogen metabolism enzymes.

Keywords: late rice; nitrogen application rate; density; rice quality

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,人们对稻米品质的要求越来越高。优质晚稻通常具有蛋白质含量低、外观品质和食味品质好等特点。前人就栽培技术对优质晚稻稻米品质的影响开展了较多研究^[1-4],发现通过合理密植和优化施肥等栽培措施能显著提高稻米品质^[5],但具体的氮肥运筹和种植密度模式尚存在争议^[6-8],仍需因地制宜开展研究。

为解决湖南水稻生产的结构性缺陷,研究人员较早地提出了专用稻(米粉专用稻、高蛋白饲料稻、优质食用稻)发展策略^[9],也创造性地提出了早季加工稻+晚季优质稻(“早加晚优”)的双季稻种植模式,但由于生产规模小、组织化程度低以及专用稻加工企业滞后等原因,“早加晚优”模式发展缓慢,其配套栽培技术也不完善。

为明确“早加晚优”模式下优质晚稻的关键栽培技术措施,笔者开展了连续2年的大田试验,比较研究了施氮量和种植密度对优质晚稻稻米品质的影响,并从叶片氮代谢特征角度探讨了施氮量和种植密度对优质晚稻稻米品质的影响机制,旨在为建立优质晚稻保优栽培技术体系提供参考。

1 试验地基本概况

于2020—2021年在湖南省浏阳市沿溪镇进行晚稻大田试验。2020年供试土壤pH5.33,碱解氮、

速效磷、速效钾含量分别为89.89、46.64、130.00 mg/kg,有机质含量为26.28 g/kg;2021年供试土壤pH5.39,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为95.14、50.37、123.00 mg/kg,有机质含量为27.33 g/kg。

2 材料与方法

2.1 材料

供试品种为‘玉针香’,属中熟晚籼稻品种,全生育期114 d。

2.2 试验设计

开展施氮量与种植密度双因素试验,裂区设计,施氮量为主区,种植密度为副区。施氮量处理为:N1,0 kg/hm²;N2,180 kg/hm²;N3,126 kg/hm²;N4,180 kg/hm²+生物炭(稻壳炭,20 t/hm²,移栽前一次性施用)。插秧密度处理:D1,18 cm×25 cm;D2,14 cm×25 cm。氮肥为含N 46%的尿素。氮肥中基肥、蘖肥、穗肥的施用比例为4:3:3。主区面积20 m²,副区面积10 m²。3次重复。各处理磷肥(P₂O₅ 50 kg/hm²)、钾肥(K₂O 100 kg/hm²)总量一致,磷肥为含P₂O₅ 12%的过磷酸钙,钾肥为含K₂O 60%的氯化钾。磷肥和钾肥全部作基肥施用。6月24日播种,7月21日移栽,10月27日收获。采用机械插秧,每蔸插4~5粒谷苗。小区间田埂用塑料薄膜覆盖,两侧压至犁底层。其他管理同当地大田管理。

2.3 测定项目与方法

2.3.1 稻米品质指标的测定

稻米品质指标的测定：水稻成熟收割后晒干，在常温下储存 3 个月，参照 GB/T 17891—1999《优质稻谷》测定稻米的碾米品质(糙米率、精米率、整精米率)和外观品质(垩白粒率、垩白度)及蒸煮品质(胶稠度、直链淀粉含量)等主要品质指标。

蛋白质组分含量的测定：用蒸馏水、5%NaCl、70%乙醇和 0.2%氢氧化钠等 4 种溶剂对稻米谷蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和清蛋白进行分离提取，采用北京天根生化科技有限公司的 BCA 蛋白定量试剂盒测定各组分蛋白的含量。

2.3.2 氮代谢特征指标的测定

分别于水稻分蘖盛期、孕穗期、齐穗期、灌浆中期取植株顶部 1 片全展叶，每小区取 3 穴约 30 片叶。一部分鲜叶 105 °C 杀青 30 min 后 80 °C 烘干至恒重，粉碎过筛， $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消化，采用连续流动分析仪测定植株样品的全氮含量；另一部分鲜叶洗净、擦干后将样品剪碎，混匀，称取 0.5~1.0 g 放入刻度试管中，加入 10 mL 去离子水，在沸水浴中提取 30 min 后用流水冷却，将提取液过滤至 50 mL 离心管内，用少量去离子水多次清洗提取残渣，冲洗液并入试管内，定容至 25 mL，吸取 0.1 mL 样品液于 15 mL 试管中，加入 0.4 mL 5% 水杨酸-硫酸溶液，摇匀，室温下放置 20 min 后再加入 9.5 mL 8%NaOH，混匀，冷至室温后于 410 nm 处测定其吸光度，计算硝态氮含量。取灌浆中期的新鲜叶片，采用试剂盒法测定硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NiRs)的活性。

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据统计和绘图；采用 DPS 24.0 进行方差分析。

3 结果与分析

3.1 施氮量和种植密度对优质稻稻米品质的影响

3.1.1 对稻米加工品质和外观品质的影响

由表 1 可见，不同种植密度处理对晚稻加工品

质的影响存在年度间差异，2020 年 2 个处理间的糙米率、精米率及整精米率均无显著差异，但 2021 年 D2 处理的上述 3 个指标均显著高于 D1 处理的。综合 2 年的数据，D2 处理的糙米率均达到了 GB/T 17891—1999《优质稻谷》一级优质稻谷的要求(糙米率 $\geq 79\%$)，精米率达到了三级优质稻谷的要求(精米率 $\geq 67\%$)，但整精米率未达到国家优质稻谷标准(整精米率 $\geq 56\%$)。4 种氮肥处理间，N4 处理的糙米率、精米率及整精米率均最高，且显著高于 N1 和 N3 处理的(2021 年 N3 处理的糙米率除外)。综合 2 年的研究结果，N4 处理的糙米率与精米率均达到了 GB/T 17891—1999《优质稻谷》一级优质稻谷的要求(出糙率 $\geq 79\%$ ，精米率 $\geq 70\%$)，其他处理的糙米率与精米率均未达到国家优质稻谷标准；各处理的整精米率均未达国家优质稻谷标准，N4 处理的整精米率接近三级优质稻谷的要求(整精米率 $\geq 50\%$)。表明增施氮肥和添加生物炭有利于改善稻米的加工品质，特别是在提高整精米率上表现较明显。

不同种植密度对稻米的外观品质也有一定的影响。2 年数据显示，D1 处理的垩白粒率与垩白度均较高；2021 年，D1 处理的垩白粒率与垩白度显著高于 D2 处理的，2 个处理的垩白度与垩白粒率均达到 GB/T 17891—1999《优质稻谷》国家标准二级优质稻谷的要求(垩白度 $\leq 2.0\%$ ，垩白粒率 $\leq 20\%$)。不同氮肥处理间 N1 处理的垩白粒率与垩白度均最高，N4 处理的最低，且 2 个处理间的差异达显著水平；N4 处理的垩白粒率与垩白度均接近 GB/T 17891—1999《优质稻谷》一级优质稻谷的要求(垩白度 $\leq 1.0\%$ ，垩白粒率 $\leq 10\%$)，N2 和 N3 处理的垩白粒率与垩白度达到国家标准二级优质稻谷的要求(垩白度 $\leq 2.0\%$ ，垩白粒率 $\leq 20\%$)。表明增施氮肥和添加生物炭有利于改善稻米外观品质。施氮量和种植密度交互效应中，N1D1 处理的稻米垩白度与垩白粒率均最高，N4D2 处理的最低。综合来看，N4D2 处理的外观品质接近国家标准一级优质稻谷的要求。

表 1 各处理稻米的加工品质和外观品质

Table 1 Processing and appearance quality of tested rice in different treatments										%
处理	糙米率		精米率		整精米率		垩白粒率		垩白度	
	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年
N1D1	78.17bc	75.01c	67.07c	65.85b	38.74c	38.81bc	20.43a	23.91a	2.12a	2.92a
N1D2	77.55c	76.73c	66.09c	67.90b	34.95d	40.58b	19.00a	19.06b	1.76b	1.71bc
N2D1	79.25b	75.84c	68.91bc	67.80b	43.22b	36.39c	17.65ab	14.62c	1.81b	1.47c
N2D2	80.05ab	78.49bc	69.83b	66.25b	39.98bc	41.37b	17.64ab	14.52c	1.10cd	2.02b
N3D1	78.26bc	80.26b	64.79d	61.24c	37.35c	38.20bc	15.88b	17.52bc	1.27c	2.14b
N3D2	79.49b	80.58b	66.19c	66.20b	38.44c	40.50b	13.85bc	14.87c	2.18a	1.81bc
N4D1	80.78ab	80.25b	70.58ab	70.64a	46.20a	45.06a	11.06c	11.31cd	1.38c	1.20c
N4D2	81.33a	81.97a	72.02a	70.45a	47.23a	47.63a	10.51c	10.16d	0.74d	1.08c
D1	79.12a	77.84b	67.84a	66.38b	41.38a	39.62b	16.26a	16.84a	1.65a	1.93a
D2	79.61a	79.54a	68.53a	67.70a	41.10a	42.52a	15.25a	14.65b	1.45a	1.66b
N1	77.86b	75.87c	66.58b	66.88b	36.35c	39.70b	19.72a	21.49a	1.94a	2.32a
N2	79.65ab	77.17bc	69.37a	67.03b	41.60b	38.88b	17.65ab	14.57b	1.46b	1.75ab
N3	78.88b	80.42ab	65.49b	63.72c	37.90c	39.35b	14.87b	16.20b	1.73ab	1.98ab
N4	81.06a	81.11a	71.30a	70.55a	46.72a	46.35a	10.79c	10.74c	1.06c	1.14b

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.1.2 对稻米蒸煮品质和营养品质的影响

由表 2 可知, D1、D2 处理的直链淀粉含量和胶稠度均较高, 均符合 GB/T 17891—1999《优质稻谷》一级优质稻谷的要求(直链淀粉含量 17%~23%, 胶稠度 ≥ 70 mm)。不同氮肥处理下, N3 处理的直链淀粉含量最高, N4 处理的胶稠度最长, N1 处理的直链淀粉含量和胶稠度均较低; 除 2020 年 N1 处理外, 2 年间其他处理的直链淀粉含量和胶稠度均

符合 GB/T 17891—1999《优质稻谷》国家标准一级优质稻谷的要求; 比较 N2 和 N4 处理发现, 添加生物炭对直链淀粉含量和胶稠度没有明显影响。从两者交互效应来看, N3D2 处理的直链淀粉含量最高, N4D2 处理的胶稠度最长, 除 N1D1 和 N1D2 外, 其他互作处理的直链淀粉含量和胶稠度均符合国家标准一级优质稻谷的要求。

表 2 各处理稻米的蒸煮品质和营养品质

Table 2 Cooking and nutrient quality of tested rice in different treatments												
处理	清蛋白含量/(g kg ⁻¹)		球蛋白含量/(g kg ⁻¹)		醇溶蛋白含量/(g kg ⁻¹)		谷蛋白含量/(g kg ⁻¹)		直链淀粉含量/%		胶稠度/mm	
	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年
N1D1	4.52c	3.55b	4.50c	4.08c	11.28b	10.46b	31.40	30.99	16.10b	17.59b	67.5b	67.0c
N1D2	4.53c	3.60b	5.66b	5.64b	11.66ab	10.71b	31.52	31.11	16.18b	18.01ab	66.0b	77.5bc
N2D1	5.41b	4.49a	6.40ab	5.07b	11.77ab	10.85ab	31.83	31.23	17.09b	17.33b	73.5b	95.5ab
N2D2	5.59b	4.52a	6.22b	5.21b	12.17a	11.20a	32.00	31.09	19.75a	18.18ab	89.5a	73.5bc
N3D1	5.65b	4.26ab	6.13b	5.09b	11.44b	10.81ab	31.90	30.83	20.15a	18.75ab	74.5b	76.5bc
N3D2	5.75b	4.31ab	6.49ab	5.08b	12.00a	11.15a	32.03	31.59	20.92a	19.64a	74.0b	76.0bc
N4D1	6.63a	4.77a	6.59ab	5.20b	12.06a	11.23a	31.94	31.35	17.97ab	18.70ab	80.5ab	82.5b
N4D2	6.84a	4.91a	7.02a	7.09a	12.25a	11.53a	32.11	31.61	18.31ab	19.04a	90.0a	102.0a
D1	5.55a	4.27a	5.90b	4.86b	11.63a	10.84a	31.77	31.16	17.83a	18.09a	74.0a	80.4a
D2	5.68a	4.34a	6.35a	5.76a	12.02a	11.15a	31.91	31.28	18.79a	18.72a	79.9a	82.3a
N1	4.53c	3.58c	5.08b	4.86b	11.40b	10.59c	31.46	31.05	16.14b	17.80b	66.8c	72.3b
N2	5.50b	4.51ab	6.31a	5.14b	11.97ab	11.02b	31.91	31.16	18.42ab	17.76b	81.5ab	84.5ab
N3	5.70b	4.29b	6.31a	5.09b	11.72ab	10.98b	31.97	31.21	20.54a	19.20a	74.3b	76.3b
N4	6.74a	4.84a	6.80a	6.14a	12.15a	11.38a	32.02	31.48	18.14ab	18.87ab	85.3a	92.3a

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

施氮量与种植密度互作对晚稻蛋白质组分有显著影响, 且规律表现基本一致。不同种植密度处理间, D2 处理的各蛋白组分较高, 但与 D1 处理的差异不显著。不同氮肥处理间, N4 处理的各蛋白

组分最高, N2 和 N3 处理的略低, N1 处理的最低; 除谷蛋白含量外, N4 处理的其他 3 个指标均显著高于 N1 处理的。互作处理间, N4D2 处理的各蛋白组分最高, N1D1 处理的均较低。

3.2 施氮量和种植密度对优质稻叶片生理特性的影响

3.2.1 对叶片氮含量的影响

由表 3 可知，不同种植密度处理间，D2 处理的

叶片硝态氮含量略高。不同氮肥处理间，N1 处理的叶片硝态氮含量最低，N4 处理的最高，孕穗期之后 N2 处理的低于或显著低于 N4 处理的，表明增施氮肥与生物炭都可提高叶片硝态氮含量。互作处理间，N4D2、N4D1 处理的叶片硝态氮含量较高。

表 3 各处理水稻的叶片硝态氮含量

Table 3 Nitrate nitrogen contents in leaves of tested rice in different treatments								
处理	2020 年硝态氮含量				2021 年硝态氮含量			
	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期
N1D1	0.50b	0.37c	0.41b	0.54c	1.54b	1.46b	0.57c	1.50b
N1D2	0.46b	0.37c	0.42b	0.56c	1.55b	1.45b	0.60c	1.44b
N2D1	0.57ab	0.54ab	0.50a	0.68b	1.73a	1.66a	0.63b	1.84a
N2D2	0.63a	0.59a	0.51a	0.64bc	1.71a	1.58ab	0.56c	1.86a
N3D1	0.61a	0.52b	0.47ab	0.66b	1.60ab	1.54b	0.56c	1.84a
N3D2	0.65a	0.59a	0.50a	0.67b	1.55b	1.60ab	0.60c	1.83a
N4D1	0.63a	0.60a	0.52a	0.82a	1.58b	1.63a	0.77a	1.82a
N4D2	0.64a	0.62a	0.54a	0.82a	1.59b	1.67a	0.71ab	1.88a
D1	0.58a	0.51a	0.47a	0.67a	1.62a	1.57a	0.63a	1.75a
D2	0.59a	0.54a	0.49a	0.67a	1.64a	1.58a	0.64a	1.76a
N1	0.48b	0.37b	0.42b	0.55c	1.55b	1.45b	0.53b	1.47b
N2	0.60a	0.56a	0.51a	0.66b	1.72a	1.62a	0.60b	1.85a
N3	0.63a	0.55a	0.48a	0.67b	1.58b	1.57a	0.58b	1.83a
N4	0.63a	0.61a	0.53a	0.82a	1.59b	1.65a	0.74a	1.85a

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

由表 4 可知，不同种植密度处理间，D1 处理的叶片全氮含量较高。不同氮肥处理间，N1 处理的叶片全氮含量最低，N4 处理的最高，各时期 N4 处理

的显著高于 N2、N3 处理的，表明增施氮肥与生物炭有助于提高叶片全氮含量。互作处理间，N4D1、N4D2 处理的叶片全氮含量均较高。

表 4 各处理水稻的叶片全氮含量

Table 4 Total nitrogen contents in leaves of tested rice in different treatments								
处理	2020 年全氮含量				2021 年全氮含量			
	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期
N1D1	11.72b	12.60b	9.14b	8.70d	11.75cd	12.58c	8.47c	7.70c
N1D2	10.07c	11.67b	9.24b	8.60d	11.06d	12.13c	8.14c	7.65c
N2D1	12.31a	15.59a	10.64a	10.36b	13.57b	16.11ab	10.74b	9.52b
N2D2	11.45b	15.07a	10.34ab	10.49b	13.01bc	15.36b	10.55b	8.88bc
N3D1	11.90ab	12.51b	10.40ab	9.40c	12.29c	15.22b	10.65b	7.79c
N3D2	11.03b	12.23b	10.47a	9.27cd	11.10d	14.72bc	9.33bc	7.48c
N4D1	13.31a	15.61a	10.94a	11.10ab	15.91a	17.92a	15.10a	11.99a
N4D2	12.18ab	15.81a	11.02a	11.38a	15.01a	17.25a	15.07a	11.94a
D1	12.31a	14.08a	10.28a	9.89a	13.38a	15.46a	11.24a	9.25a
D2	11.18b	13.69b	10.27a	9.94a	12.55b	14.86b	10.77a	8.99a
N1	10.90c	12.14b	9.19b	8.65d	11.41c	12.36c	8.30c	7.68c
N2	11.88ab	15.33a	10.49a	10.43b	13.29b	15.73b	10.65b	9.20b
N3	11.47bc	12.37b	10.44a	9.34c	11.70c	14.97b	9.99bc	7.63c
N4	12.75a	15.71a	10.98a	11.24a	15.46a	17.59a	15.08a	11.97a

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.2.2 对氮代谢关键酶活性的影响

由表 5 可知,不同种植密度处理间,各生育时期 D2 处理的叶片亚硝酸还原酶(NiR)活性均最高;分蘖期 D1、D2 处理的差异不显著,后期差异达显著水平。不同氮肥处理间,各生育时期 N4 处理的

叶片 NiR 活性均最高, N1 处理的最低, 2 个处理间的差异显著; N4 处理的略高于 N2 处理的,表明增施生物炭可提升叶片 NiR 活性,但效果不显著。互作处理中,各生育时期 N4D2 处理的叶片 NiR 活性均最高。

表 5 各处理水稻叶片的亚硝酸还原酶活性
Table 5 Nitrite reductase activities in leaves of tested rice in different treatments

处理	2020 年的 NiR 活性				2021 年的 NiR 活性			
	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期
N1D1	1777.0b	1864.0b	2255.0b	2022.0b	940.6b	1364.9b	1765.3b	1358.0b
N1D2	1793.0b	1888.0b	2271.0b	2093.0b	988.6b	1524.0b	1785.0b	1374.0b
N2D1	1983.0ab	2386.0ab	2678.0a	2411.0a	1076.7ab	1588.0ab	2022.0ab	1793.0ab
N2D2	2014.0ab	2425.0a	2710.0a	2426.0a	1100.7ab	1677.2a	2061.7a	1805.3ab
N3D1	1840.0b	2188.0ab	2532.0ab	2246.0ab	986.0b	1453.0ab	1817.0b	1772.0ab
N3D2	1880.0ab	2196.0ab	2623.0ab	2318.0ab	988.6b	1475.0ab	1822.0b	1793.0ab
N4D1	2164.0a	2441.0a	2812.0a	2457.0a	1260.8a	1589.1ab	2085.5a	2005.5a
N4D2	2172.0a	2512.0a	2844.0a	2512.0a	1364.9a	1738.0a	2197.6a	2022.0a
D1	1941.0a	2219.8b	2569.3b	2284.0b	1066.0a	1498.8b	1922.4b	1732.1a
D2	1964.8a	2255.3a	2612.0a	2337.3a	1110.7a	1603.5a	1966.6a	1748.6a
N1	1785.0b	1876.0b	2263.0b	2057.5b	964.6b	1444.5b	1775.1b	1366.0b
N2	1998.5ab	2405.5a	2694.0ab	2418.5a	1088.7b	1632.6a	2041.8a	1799.1ab
N3	1860.0ab	2192.0ab	2577.5ab	2282.0ab	987.3b	1464.0b	1819.5ab	1782.5ab
N4	2168.0a	2476.5a	2828.0a	2484.5a	1312.9a	1663.6a	2141.6a	2013.7a

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

由表 6 可知,施氮量与种植密度互作对晚稻硝酸还原酶(NR)活性有显著影响, NR 活性随着生育进程呈下降趋势。不同种植密度处理中, D2 处理的 NR 活性较高,但与 D1 处理的无显著差异。不同氮肥处理中,各时期 N4 处理的 NR 活性均最高,

N1 处理的较低;对比 2 年的数据, N4 处理的均高于 N2 处理的,且 2020 年 2 个处理间的差异显著,表明增施生物炭可提升叶片的 NR 活性。互作处理中,各时期均以 N4D2 处理的最高。

表 6 各处理水稻叶片的硝酸还原酶活性
Table 6 Nitrate reductase activities in leaves of tested rice in different treatments

处理	2020 年的 NR 活性				2021 年的 NR 活性			
	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期
N1D1	0.66d	0.64c	0.66b	0.61b	0.63c	0.60c	0.47b	0.44b
N1D2	0.69d	0.66c	0.64b	0.61b	0.75bc	0.69b	0.49b	0.46b
N2D1	0.92b	0.79b	0.70b	0.68b	0.80b	0.78ab	0.56ab	0.52a
N2D2	0.95b	0.81b	0.74b	0.67b	0.93a	0.82ab	0.67a	0.54a
N3D1	0.78b	0.75b	0.66b	0.64b	0.72bc	0.70b	0.55ab	0.48ab
N3D2	0.81b	0.77b	0.68b	0.63b	0.93a	0.74b	0.65a	0.53a
N4D1	1.22a	1.15a	1.08a	1.06a	0.89a	0.90a	0.64a	0.52a
N4D2	1.24a	1.19a	1.11a	1.06a	0.94a	0.92a	0.69a	0.57a
D1	0.90a	0.83a	0.77a	0.75a	0.76b	0.75a	0.55b	0.49a
D2	0.92a	0.86a	0.79a	0.74a	0.89a	0.79a	0.62a	0.53a
N1	0.68c	0.65c	0.65b	0.61b	0.69b	0.65b	0.48b	0.45a
N2	0.93b	0.80b	0.72b	0.67b	0.87ab	0.80ab	0.61a	0.53a
N3	0.80bc	0.76bc	0.67b	0.63b	0.83ab	0.72ab	0.60a	0.50a
N4	1.23a	1.17a	1.09a	1.06a	0.91a	0.91a	0.67a	0.55a

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.3 稻米品质与叶片氮代谢指标的相关性

由表 7 可见,2020 年晚稻的整精米率与叶片氮含量、硝态氮含量、亚硝酸还原酶活性及硝酸还原酶活性呈极显著正相关。2021 年晚稻的糙米率、整精米率与亚硝酸还原酶活性、硝酸还原酶活性、叶片氮含量、硝态氮含量均呈极显著正相关,精米率与 4 个氮代谢指标相关性不显著。

2 年间,叶片氮代谢相关指标与稻米外观品质

基本呈显著或极显著负相关性;直链淀粉含量和胶稠度与氮代谢相关指标呈显著或极显著正相关。

叶片氮代谢相关指标与稻米营养品质存在正相关性。2020 年,醇溶蛋白、谷蛋白含量与氮代谢相关指标均呈显著或极显著正相关;球蛋白含量与氮代谢相关指标相关性不显著。2021 年,蛋白组分指标与叶片氮代谢相关指标基本上呈极显著正相关。

表 7 灌浆中期水稻叶片氮代谢指标与稻米品质的相关性
Table 7 Correlation between leaf nitrogen metabolism indexes in leaves at mid-filling and processing quality

年份	米质指标	相关系数			
		亚硝酸还原酶活性	硝酸还原酶活性	叶片氮含量	硝态氮含量
2020	糙米率	0.037	0.062	0.010	0.105
	精米率	0.040	0.126	0.083	0.051
	整精米率	0.536**	0.772**	0.561**	0.785**
	垩白粒率	-0.378	-0.749**	-0.422*	-0.721**
	垩白度	-0.681**	-0.627**	-0.741**	-0.640**
	直链淀粉含量	0.347	0.801**	0.584**	0.639**
	胶稠度	0.709**	0.585**	0.592**	0.764**
	清蛋白含量	0.482*	0.331	0.528**	0.457*
	球蛋白含量	0.375	0.121	0.192	0.226
	醇溶蛋白含量	0.446*	0.410*	0.419*	0.671**
	谷蛋白含量	0.820**	0.736**	0.622**	0.679**
2021	糙米率	0.770**	0.715**	0.539**	0.641**
	精米率	0.221	0.377	0.312	-0.272
	整精米率	0.593**	0.592**	0.803**	0.686**
	垩白粒率	-0.935**	-0.919**	-0.791**	-0.788**
	垩白度	-0.644**	-0.739**	-0.603**	-0.493*
	直链淀粉含量	0.604**	0.462*	0.521**	0.498*
	胶稠度	0.669**	0.886**	0.781**	0.520**
	清蛋白含量	0.988**	0.912**	0.793**	0.909**
	球蛋白含量	0.529**	0.667**	0.588**	0.346
	醇溶蛋白含量	0.482*	0.662**	0.394	0.537**
	谷蛋白含量	0.864**	0.799**	0.692**	0.759**

** ** * 分别示相关性显著 ($P<0.05$)和极显著 ($P<0.01$)。

4 结论与讨论

稻米品质主要由品种的遗传特性决定,但也受栽培技术措施的影响。前人^[4,10-11]认为,随施氮量的增加,糙米率、精米率及整精米率呈上升趋势,垩白粒率和垩白度呈下降趋势;严光彬等^[12]认为,增大种植密度能显著提高稻米的加工品质和外观品质。本试验中,种植密度对稻米的加工品质和外观品质影响不显著,但氮肥处理对其影响较大,高氮+生物炭处理(N4)的糙米率、精米率及整精米率

最高,垩白粒率和垩白度最低。其原因在于施氮能提高植株的氮素含量,促进光合作用,增大谷粒硬度,增强稻米抗碾磨破坏的能力^[13],减少垩白的形成^[10];而生物炭的施用能降低土壤容重,促进水稻养分吸收,提高植株体内的氮含量^[14],同时生物炭自身也有一定的养分释放。

蒸煮品质决定米饭的适口性,是衡量稻米品质的关键指标。研究^[15]表明,黏度高、胶稠度大、直链淀粉含量低的稻米蒸煮食味品质更好。本研究

中, N4 处理的胶稠度较高, 而稻米直链淀粉含量略低于 N3 处理的。虽然增施氮肥可导致米饭黏度降低、稻米蒸煮品质下降^[16], 但配施生物炭能促进水稻养分吸收与籽粒灌浆, 从而提高稻米品质^[17]。舒鹏等^[18]、钱春荣等^[19]认为, 随机插密度增加, 水稻品种的直链淀粉含量和胶稠度同步上升。本试验中, 机插条件下 2 个种植密度处理的直链淀粉含量和胶稠度无显著差异, 密植处理(D2)的略高。

叶片氮含量是限制植物光合能力的关键因子之一, 可影响叶片内参与光合作用的酶的活性^[20]。张洪程等^[21]认为, 适当增施氮肥能提高拔节后水稻的氮素吸收能力, 增加抽穗后氮素积累量。本研究中, 水稻叶片氮含量随氮肥用量增加而增加, 且氮肥配施生物炭能进一步增加叶片氮含量, 显著高于纯化肥氮处理。可见, 生物炭可促进作物对土壤氮素的吸收^[22-23]。研究^[24-25]表明, 水稻植株铵态氮与硝态氮含量随施氮量增加而增加。本研究中, 水稻叶片硝态氮含量均以高氮处理的较高, 且在配施生物炭条件下可进一步提高; 种植密度方面, 水稻叶片硝态氮含量以密植处理的较高, 因为硝态氮通过植物根的主动运输进入植物体内后需经过还原反应才能被利用^[26], 硝酸还原酶是催化 NO_3^- 转化氨基酸的重要诱导酶, 能促进植株对硝态氮的吸收^[27], 而密植处理能提高硝酸还原酶的活性^[26], 改善氮素代谢, 促进植株对硝态氮的吸收。

马莲菊等^[28]研究表明, 受氮代谢酶活性影响最大的是整精米率, 其次是胶稠度和直链淀粉含量, 糙米率和精米率受影响较小。关于叶片氮含量与稻米品质的关系, 研究^[29-30]表明, 叶片较高的氮素浓度可增强光合速率, 延长灌浆期, 促进养分向籽粒运转, 有利于提高粒重和籽粒充实度, 减少稻米垩白^[14]。本研究中, 叶片酶活性和氮含量与稻米加工品质有相关性, 主要表现在整精米率与其呈显著正相关, 叶片氮代谢指标与垩白度呈显著负相关。可见, 提高叶片氮代谢酶活性与氮含量, 可使籽粒灌浆饱满充分, 从而减少稻米垩白的形成, 提高稻米整精米率。蒸煮和营养品质中, 叶片氮代谢酶活性及氮含量主要与胶稠度及蛋白组分含量呈显著正相关。可见, 增强叶片氮代谢酶活性、提高叶片氮含量能显著增加稻米胶稠度和蛋白组分含量。

研究^[31]认为, 生物炭可以提高水稻的群体干物质积累、有效穗数和产量^[32], 改善稻米品质^[33], 提

高粳稻氮肥利用率; 也有研究^[34]认为, 施用生物炭对杂交中籼稻的产量、单位面积穗数和每穗粒数没有明显影响, 但在一定程度上提高了结实率、千粒质量、地上部干物质质量, 降低了收获指数。本研究中, 在施氮 180 kg/hm^2 的基础上增施生物炭的处理对稻米品质有较大影响, 主要表现在改善了加工品质(显著提高整精米率)和外观品质(显著降低了垩白度和垩白粒率), 并在一定程度上提高了稻米谷蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和清蛋白含量, 但增施生物炭对稻米直链淀粉含量和胶稠度没有明显影响。有关增施生物炭或生物炭替代部分化学氮肥对水稻产量与品质的影响还有待深入研究。

综上所述, 本研究中, 较大种植密度($14 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$)与较高施氮量(180 kg/hm^2)可通过提高叶片氮含量及氮代谢相关酶活性改善优质稻稻米品质, 增施生物炭可进一步提高整精米率, 降低垩白度和垩白粒率。本试验条件下, N4D2 处理对优质稻稻米品质的调控效应最好。

参考文献:

- [1] YU Q G, YE J, YANG S N, et al. Effects of nitrogen application level on rice nutrient uptake and ammonia volatilization[J]. *Rice Science*, 2013, 20(2): 139-147.
- [2] 傅友强, 刘彦卓, 梁开明, 等. 超声波处理对华南双季晚稻产量和稻米品质的影响[J]. *农学学报*, 2020, 10(6): 1-4.
- [3] 田祖庆, 周精华, 刘慈明, 等. 影响稻米品质的因素分析及高档优质一季晚稻生产关键技术[J]. *杂交水稻*, 2020, 35(3): 53-55.
- [4] 唐健, 唐闯, 郭保卫, 等. 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.
- [5] 龙文飞, 傅志强, 钟娟. 节水灌溉条件下施肥与密度对双季晚稻‘丰源优 299’产量和稻米品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(9): 1-5.
- [6] 徐富贤, 周兴兵, 张林, 等. 稻田养鱼与氮密互作对土壤肥力、水稻产量及其养分累积的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(15): 1-7.
- [7] 刘立军, 王志琴, 桑大志, 等. 氮肥运筹对水稻产量及稻米品质的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2002(3): 46-50.
- [8] 金树权, 陈若霞, 汪峰, 等. 不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 242-248.
- [9] 唐国荣. 机插秧水稻的生长发育特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [10] LI G H, CHEN Y L, DING Y F, et al. Charactering

- protein fraction concentrations as influenced by nitrogen application in low-glutelin rice cultivars[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(3): 537–544.
- [11] 蒋李健. 施氮量对优质粳稻产量和品质的影响[J]. *安徽农学通报*, 2020, 26(19): 37–39.
- [12] 严光彬, 李彦利, 王万成, 等. 栽培因素对北方粳稻米质的影响Ⅲ. 移栽密度对米质的影响[J]. *垦殖与稻作*, 2004, 34(1): 15–17.
- [13] 蒋振华, 徐国沾, 施金裕, 等. 不同群体质量对稻米品质的影响[J]. *上海农业科技*, 2004(4): 24–26.
- [14] 赵海成, 杜春影, 魏媛媛, 等. 施肥方式和氮肥运筹对寒地水稻产量与品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(3): 76–86.
- [15] 李怡安, 胡华英, 周垂帆. 生物炭对土壤微生物影响研究进展[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2019, 42(4): 101–104.
- [16] 张桂莲, 赵瑞, 刘逸童, 等. 施氮量对优质稻产量和稻米品质及氮素利用效率的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(3): 231–236.
- [17] 郭琴波, 王小利, 段建军, 等. 施用生物炭对黄壤稻田水稻品质及氮肥利用效率的影响[J]. *作物研究*, 2021, 35(4): 287–292.
- [18] 舒鹏, 郭保卫, 霍中洋, 等. 钵苗机插密度对双季晚稻产量及群体质量的影响[J]. *中国稻米*, 2017, 23(6): 23–31.
- [19] 钱春荣, 杨春梅, 金正勋, 等. 不同收获时期对稻米味度值和 RVA 谱特性的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2007(6): 79–81.
- [20] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(5): 835–839.
- [21] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机制[J]. *作物学报*, 2011, 37(10): 1837–1851.
- [22] MOHARANA S, DUTTA S. Spatial variability of chlorophyll and nitrogen content of rice from hyperspectral imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 122: 17–29.
- [23] 王雪玉, 刘金泉, 胡云, 等. 生物炭对黄瓜根际土壤细菌丰度、速效养分含量及酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(2): 370–376.
- [24] LI X Z, OAKS A. The effect of light on the nitrate and nitrite reductases in *Zea mays*[J]. *Plant Science*, 1995, 109(2): 115–118.
- [25] 袁喆. 绿肥与氮肥配施对土壤性质及水稻养分吸收和产量的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [26] 陶爽, 华晓雨, 王英男, 等. 不同氮素形态对植物生长与生理影响的研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2017, 45(12): 64–68.
- [27] 杜君, 孙克刚, 张运红, 等. 控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(2): 134–141.
- [28] 马莲菊, 崔鑫福, 吕文彦. 淀粉合成相关酶活性变化及其与籽粒灌浆和稻米品质的关系[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(3): 354–358.
- [29] 袁帅, 苏雨婷, 陈平平, 等. 施氮对稻米品质的影响研究进展与展望[J]. *作物研究*, 2021, 35(4): 394–400.
- [30] 路凯, 赵庆勇, 周丽慧, 等. 稻米蛋白质含量与食味品质的关系及其影响因素研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(5): 1305–1311.
- [31] 崔月峰, 王健, 王桂艳, 等. 生物炭对不同穗型粳稻氮肥利用率的影响[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(19): 11–14.
- [32] 梁传斌, 李建国, 沈枫, 等. 移栽密度和施用生物炭对水稻产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 240–247.
- [33] 刘猷红, 孟英, 唐傲, 等. 化肥配施有机物料对盐碱地水稻产量和品质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2022(8): 19–24.
- [34] 赵春容, 范龙, 陈佳娜, 等. 不同氮肥水平下生物炭施用对杂交中籼稻产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2022, 37(4): 115–120.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正