

引用格式:

李浩晶, 张丹珂, 李海润, 曹静, 徐国伟. 施氮量对水稻根系分泌特性与解剖结构及品质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 1-7.

LI H J, ZHANG D K, LI H R, CAO J, XU G W. Effects of nitrogen application rate on root exudation characteristic and anatomical structure as well as quality of rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(1): 1-7.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



施氮量对水稻根系分泌特性与解剖结构及品质的影响

李浩晶, 张丹珂, 李海润, 曹静, 徐国伟*

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 以郑稻C42和徐稻3号为供试品种进行盆栽试验, 设置4个施氮量, 分别为0、120、240、360 kg/hm²(以N0、N120、N240、N360表示), 测定水稻的加工品质、外观品质、蒸煮品质、营养品质、根系伤流液中部分有机酸含量(质量分数, 下同)和激素含量以及根系解剖结构差异。结果表明: 随着施氮量的增加, 2个水稻品种的糙米率、精米率、整精米率、胶稠度以及根系伤流液中酒石酸、乙酸(除徐稻3号幼穗分化始期)、玉米素和玉米素核苷含量先增加后降低, 在N240处各指标达到最高值, 而直链淀粉含量、碱消值、草酸含量、柠檬酸含量及中柱直径与不定根直径之比总体上呈现先降低后增加的趋势, 在N240处达到最低值; 徐稻3号的皮层横截面面积、中柱直径、不定根直径在N240处达到最高值; 郑稻C42的活细胞比例在N240处达到最高值, 皮层横截面面积、中柱直径、不定根直径在N360处达到最高值, N240与N360差异不显著; 根系伤流液中玉米素和玉米素核苷、酒石酸、乙酸、琥珀酸含量及活细胞比例与稻米精米率、整精米率、蛋白质含量、胶稠度呈极显著正相关; 通气组织面积、皮层横截面面积、中柱直径、不定根直径与外观品质呈极显著正相关, 而草酸、中柱直径和不定根直径的比值与外观品质呈极显著负相关; 徐稻3号和郑稻C42在施氮量为240 kg/hm²条件下稻米加工品质、蒸煮品质及营养品质均得到了改善, 徐稻3号的糙米率、精米率和整精米率分别增加了7.7%、18.4%、45.9%, 郑稻C42的分别增加了14.6%、14.7%、36.0%, 徐稻3号、郑稻C42的直链淀粉含量分别减少14.2%、20.0%, 碱消值分别减少11.2%、11.6%, 胶稠度分别增加了10.2%、5.7%。

关键词: 水稻; 施氮量; 根系分泌; 根系解剖结构; 根系有机酸

中图分类号: S511.062

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)01-0001-07

Effects of nitrogen application rate on root exudation characteristic and anatomical structure as well as quality of rice

LI Haojing, ZHANG Danke, LI Hairun, CAO Jing, XU Guowei*

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: Using Zhengdao C42 and Xudao 3 as test varieties, four nitrogen(N) application rates were set: 0 kg/hm²(N0), 120 kg/hm²(N120), 240 kg/hm²(N240), and 360 kg/hm²(N360). The differences of milling quality, appearance quality, cooking and nutritional quality, contents of certain organic acids and hormones in root exudates, and root anatomical structure were measured. Results showed that brown rice rate, milled rice rate, head rice rate, gel consistency, and the contents of tartaric acid, acetic acid(except during the initial stage of panicle differentiation in Xudao 3), zeatin and zeatin riboside(Z+ZR) in the root exudates of the two varieties of rice initially increased and then decreased with higher N rates,

收稿日期: 2024-05-05

修回日期: 2025-02-03

基金项目: 河南省自然科学基金项目(212300410341); 河南省科技攻关项目(242102110169); 河南科技大学博士科研启动基金项目(13480108); 河南省科技研发计划联合基金项目(242103810031)

作者简介: 李浩晶(2000—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事水稻栽培生理研究, lihaojing22@163.com; *通信作者, 徐国伟, 博士, 教授, 主要从事作物栽培生理研究, gwxu2007@163.com

peaking at N240. In contrast, contents of amylose, oxalic acid, citric acid, alkali spreading value, and the ratio of stele diameter to root diameter initially decreased and then increased, reaching their lowest values at N240. For Xudao 3, cortical cross-sectional area, stele diameter, and root diameter peaked at N240. For Zhengdao C42, the proportion of living cells peaked at N240, while cortical cross-sectional area, stele diameter, and root diameter peaked at N360, with no significant difference between N360 and N240. Contents of Z+ZR, tartaric acid, acetic acid, succinic acid in root exudates, and living cell proportion were significantly positively correlated with milled rice rate, head rice rate, protein content, and gel consistency of rice. Aerenchyma area, cortical cross-section, stele diameter, and root diameter were significantly positively correlated with appearance quality, while oxalic acid content and the stele-to-root diameter ratio were significantly negatively correlated. At 240 kg/hm² N, processing, cooking, and nutritional quality improved: Xudao 3 showed increases of 7.7%, 18.4%, and 45.9% in brown rice, milled rice, and head rice rates, respectively, and Zhengdao C42 increased by 14.6%, 14.7%, and 36.0%, while amylose contents decreased by 14.2% and 20.0%, alkali spreading value decreased by 11.2% and 11.6%, and gel consistency increased by 10.2% and 5.7% for Xudao 3 and Zhengdao C42, respectively.

Keywords: rice; nitrogen application rate; root exudation; root anatomical structure; root organic acid

稻米品质的提高不仅得益于优良的基因和环境,还得益于良好的根系形态和生理特征。水稻籽粒灌浆是与稻米品质的形成关系最为密切的生理过程,根系活力、根系分泌物等生理特性也是影响籽粒灌浆结实的重要因素^[1]。根系分泌物中的有机酸、氨基酸及各种离子与稻米的外观品质、蒸煮食味品质、淀粉谱特性及蛋白质组分都呈显著或极显著相关^[2]。植物激素对水稻品质具有重要调控作用,如稻米的蒸煮食味品质受根系脱落酸(ABA)浓度的影响较大,灌浆中期根系中 ABA 浓度提高,籽粒中的直链淀粉含量则大幅增加^[3]。常二华等^[4]研究表明,根系分泌的有机酸及其组分与根系合成的激素有一定关系,并与籽粒淀粉代谢关键酶活性及花后地上部叶片衰老密切相关,对水稻产量和品质形成有较大的影响。根系解剖结构反映了植物对环境的适应性,更体现了根系与功能、环境的一致性,如通气组织的形成可能降低水稻根中离子的转运能力,影响离子的吸收^[5]。国内外学者就施氮量对水稻产量、品质形成、根系形态结构、根系生理功能等方面的影响进行了大量研究^[6-9],但有关施氮对水稻根系分泌特性及根系解剖结构的影响以及与品质之间的研究尚少。本试验通过探索施氮量对不同生育时期水稻根系分泌特性与解剖结构的影响,阐明不同施氮水平下水稻根系分泌特性及解剖结构的差异,以期对水稻的调优栽培提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料和试验地概况

试验于2023年在河南科技大学试验农场进行。供试品种为郑稻 C42 和徐稻 3 号。试验地年平均气温 15.1 °C,年日照时数 2 192.7 h,年平均降水量 579.7 mm。采用盆栽试验,盆高 30 cm,直径 30 cm,每盆装 13 kg 过筛土,盆栽土质为洛阳地区黏壤土。过筛土分别含有机质、碱解氮、有效磷、有效钾 14.3、75.2、4.9、121.2 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设计 4 个氮肥(N)用量,即 0、120、240、360 kg/hm²,依次标记为 N0、N120、N240、N360,2 个供试品种,共计 8 个处理,以 N0 为对照。磷肥、钾肥作基肥一次性施用。各处理磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)用量一致,分别为 300、195 kg/hm²。移栽前、移栽后 7 d 以及幼穗分化始期氮肥施用比例为 5 : 1 : 4。水分管理方式为:返青前保持 2~3 cm 浅水层,之后采用轻干湿交替灌溉(灌溉 2~3 cm 水层,待土壤水势降至-15 kPa 再复灌),分蘖末期进行轻度晒田,收获前 1 周停止灌水。5 月 14 日播种,6 月 16 日移栽,每盆 3 穴,每穴 2 苗,每个处理 25 盆。采用防雨棚挡雨,生育期内严格监管水分及病虫害,其余管理与大田生产一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 稻米品质的测定

将稻谷储存 3 个月,各处理的稻谷统一风选后测定其品质。按 GB/T 17891—1999 《优质稻谷》规定的方法测定加工品质(糙米率、精米率、整精米率)和外观品质(垩白粒率、垩白面积、垩白度)^[10]。利用近红外分析仪 DA-7250 测定稻谷的直链淀粉含量、蛋白质含量、胶稠度和碱消值。

1.3.2 根系伤流液的收集

分别于分蘖盛期、穗分化始期、抽穗期和花后 20 d,各处理取样 3 盆,于 18:00 时在茎基部离土面 10 cm 处剪去地上部分稻茎,参考张晨晖等^[11]方法收集根系伤流液。用注射器将脱脂棉吸取的伤流液注入 10 mL 离心管中,经 0.45 μm 微孔水相滤膜过滤后作为最终检测液,−30 °C 保存,用于测定伤流液中部分组分的含量。

1.3.3 根系伤流液中有机酸含量的测定

采用 Agilent 1260 高效液相色谱仪,参考徐国伟等^[12]的方法测定伤流液中有机酸(草酸、柠檬酸、酒石酸、乙酸、琥珀酸)的含量。采用 Diamonsil C18(2)(250 mm×4.6 mm)色谱柱,以甲醇与 0.01 mol/L 磷酸二氢钾(体积比 3 : 97)为流动相,在 0.8 mL/min 流速、25 °C 柱温、20 μL 进样量、210 nm 波长的条件下,检测水稻根系伤流液有机酸的峰面积。根据有机酸标样(Sigma 公司)绘制有机酸标准曲线,计算水稻根系伤流液中各有机酸的含量。

1.3.4 根系伤流液中激素含量的测定

分别于分蘖盛期、幼穗分化期、抽穗期、花后 20 d,按 1.3.2 中的方法获取根系伤流液,选用 Agilent 1260 高效液相色谱仪,参考徐国伟等^[12]的方法测定玉米素和玉米素核苷的含量。使用 Hypersil ODS C18(150 mm×4.6 mm)色谱柱,在 1 mL/min 流速、35 °C 柱温、10 μL 进样量、254 nm 波长下梯度洗脱,流动相 A 为甲醇,流动相 B 为 0.6% 乙酸水溶液,检测水稻根系伤流液激素的峰面积。根据激素标样(Sigma 公司)绘制标准曲线,计算水稻根系伤流液中的激素含量。

1.3.5 根系解剖结构

于幼穗分化期,参考张晨晖等^[11]的方法,以水稻

新长出的 8~10 cm 的不定根作为样品,在距根尖 0.5 cm 处切片,并于 JSM-IT200(LA)电子显微镜下摄片,然后采用 ImageJ 1.8.0 软件分析图像并测定通气组织面积、皮层横截面面积、中柱直径、不定根直径,计算生活细胞面积占皮层横截面面积的比例和中柱直径占不定根直径的比例。每个生物学试验重复 6 次。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2021 进行数据处理;采用 SPSS 22.0 进行方差分析;采用 Origin 2022 绘图;采用 ImageJ 1.8.0 软件进行扫描电镜图像分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量对水稻品质的影响

2.1.1 对水稻加工品质的影响

从表 1 可以看出,不同施氮量对水稻加工品质的影响不同。随着施氮量的增加,稻米糙米率、精米率和整精米率均呈现先增加后降低的趋势,徐稻 3 号和郑稻 C42 的 3 个指标均在 N240 处最高。与 N0 处理相比,N240 处理下徐稻 3 号的糙米率、精米率和整精米率分别增加了 7.7%、18.4%、45.9%,郑稻 C42 的分别增加了 14.6%、14.7%、36.0%。

表 1 不同施氮量处理下 2 个水稻品种的加工品质
Table 1 The milling quality of two rice varieties with different nitrogen application rates

品种	处理	%		
		糙米率	精米率	整精米率
徐稻 3 号	N0	72.44c	59.68c	38.83c
	N120	75.24b	65.91b	47.91b
	N240	78.04a	70.66a	56.67a
	N360	77.03ab	70.61a	56.62a
郑稻 C42	N0	67.83d	63.65d	50.32d
	N120	72.98c	68.72c	63.24c
	N240	77.75a	73.02a	68.43a
	N360	75.64b	71.71b	65.73b

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

2.1.2 对水稻外观品质的影响

不同施氮量对水稻外观品质的影响不同。从表 2 可以看出,2 个品种的垩白粒率、垩白面积与垩白度均随着施氮量的增加而增加,在 N360 处达到最大值,与 N0 相比,N360 处理下徐稻 3 号的分别增加 83.4%、137.8%、334.7%,郑稻 C42 的分别增加 75.7%、130.8%、307.7%。

表2 不同施氮量处理下2个水稻品种的外观品质

品种	处理	垩白粒率	垩白面积	垩白度
徐稻3号	N0	20.00d	6.03c	1.21c
	N120	28.33c	9.77b	2.77b
	N240	32.33b	13.90a	4.48a
	N360	36.67a	14.34a	5.26a
郑稻C42	N0	11.00d	2.37b	0.26b
	N120	17.33c	3.99ab	0.69a
	N240	18.33b	5.37a	0.99a
	N360	19.33a	5.47a	1.06a

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

2.1.3 对水稻蒸煮品质与营养品质的影响

由表3可知,徐稻3号、郑稻C42的直链淀粉含量和碱消值随着施氮量的增加呈先降低再升高的趋势,在N240处达到最低值,与N0相比,徐稻3号、郑稻C42的直链淀粉含量分别减少14.2%、20.0%,碱消值分别减少11.2%、11.6%。2个品种的胶稠度随着施氮量的增加呈先增后减趋势,在N240处达到最高值,同N0相比,徐稻3号、郑稻C42的分别增加10.2%、5.7%。2个品种的蛋白质含量随着施氮量的增加而增加,在N360处达到最高值,与N0相比,徐稻3号、郑稻C42的分别增加28.0%、37.0%。

表3 不同施氮量处理下2个水稻品种的蒸煮品质与营养品质

品种	处理	直链淀粉含量/%	胶稠度/mm	蛋白质含量/%	碱消值
徐稻3号	N0	21.41a	73.27c	7.74c	8.56a
	N120	20.25b	76.08b	7.78c	8.02b
	N240	18.38c	80.74a	8.45b	7.60d
	N360	19.00c	79.87a	9.91a	7.76c
郑稻C42	N0	18.86a	78.88bc	7.76d	9.60a
	N120	16.43b	80.37b	8.20c	9.23b
	N240	15.08c	83.36a	9.53b	8.49d
	N360	16.15b	77.42c	10.63a	8.79c

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

2.2 施氮量对水稻根系分泌特性的影响

2.2.1 对水稻根系伤流液中激素含量的影响

不同生育时期的水稻根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量均随着施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势(表4),在N240时最高。与N0相比,

N240处理下分蘖盛期、幼穗分化始期、抽穗期及花后20d徐稻3号的玉米素和玉米素核苷含量分别增加9.8%、28.9%、16.0%、23.1%,郑稻C42的分别增加12.3%、34.8%、17.8%、11.0%。与N240相比,N360处理下2个品种的根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量降低,抽穗期郑稻C42的显著降低,说明氮肥施用量过高并不利于根系玉米素和玉米素核苷的分泌。

表4 不同施氮量处理下2个水稻品种的玉米素及玉米素核苷含量

品种	处理	玉米素及玉米素核苷含量			
		分蘖盛期	幼穗分化始期	抽穗期	花后20d
徐稻3号	N0	0.132b	0.128b	0.175c	0.147b
	N120	0.139a	0.139b	0.179bc	0.172a
	N240	0.145a	0.165a	0.203a	0.181a
	N360	0.140a	0.140a	0.194a	0.174a
郑稻C42	N0	0.130c	0.132b	0.191c	0.182b
	N120	0.138b	0.171a	0.201b	0.197a
	N240	0.146a	0.178a	0.225a	0.202a
	N360	0.143a	0.174a	0.206b	0.199a

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

2.2.2 对水稻根系伤流液中有机酸含量的影响

从表5、表6可以看出,随着施氮量的增加,水稻根系伤流液中草酸、柠檬酸含量总体上呈现先降低后增加的趋势,2个品种根系伤流液中的草酸、柠檬酸含量基本上在N240处最低(幼穗分化始期郑稻C42的草酸含量除外),与N0相比,分蘖盛期、幼穗分化始期、抽穗期徐稻3号的草酸含量分别减

表5 不同施氮量处理下2个水稻品种的草酸含量

品种	处理	草酸含量		
		分蘖盛期	幼穗分化始期	抽穗期
徐稻3号	N0	5.08a	21.06a	30.66a
	N120	4.26b	19.04ab	24.91b
	N240	2.74c	15.55c	15.64c
	N360	4.24b	16.05bc	18.34c
郑稻C42	N0	5.13a	25.48a	31.00a
	N120	4.36b	21.25b	25.49b
	N240	3.14c	19.10c	23.23c
	N360	4.72ab	17.65d	26.70b

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

少 46.1%、26.2%、49.0%，柠檬酸含量分别减少 33.7%、29.0%、80.3%；郑稻 C42 草酸含量分别减少 38.8%、25.0%、25.1%，柠檬酸含量分别减少 41.3%、40.3%、49.8%。

表 6 不同施氮量处理下 2 个水稻品种的柠檬酸含量

品种	处理	柠檬酸含量		
		分蘖盛期	幼穗分化始期	抽穗期
徐稻 3 号	N0	11.20a	14.14a	50.12a
	N120	11.54a	12.34ab	28.25b
	N240	7.43b	10.04c	9.87d
	N360	7.45b	10.61bc	13.36c
郑稻 C42	N0	10.72a	12.10a	13.82a
	N120	10.41a	11.24a	8.44bc
	N240	6.29b	7.22b	6.94c
	N360	6.33b	7.56b	11.31ab

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

由表 7、表 8 和表 9 可知，除郑稻 C42 分蘖盛期和抽穗期的琥珀酸含量以及徐稻 3 号幼穗分化始期的乙酸和琥珀酸含量外，2 个品种 3 个时期的根系伤流液中酒石酸、乙酸、琥珀酸含量均随着施氮量的增加呈先增后降的趋势，且在 N240 处达到最高值。与 N0 相比，N240 处理下抽穗期徐稻 3 号的酒石酸、乙酸和琥珀酸含量分别增加 60.9%、134.6%、219.1%，郑稻 C42 的酒石酸、乙酸含量分别增加 56.1%、144.6%。与 N240 相比，N360 处理下，徐稻 3 号和郑稻 C42 的酒石酸在幼穗分化期及抽穗期均有所降低，说明氮肥施用量过高不利于根系酒石酸的分泌。

表 7 不同施氮量处理下 2 个水稻品种的酒石酸含量

品种	处理	酒石酸含量		
		分蘖盛期	幼穗分化始期	抽穗期
徐稻 3 号	N0	11.61b	18.85c	41.91c
	N120	13.97b	26.24b	57.73b
	N240	20.29a	30.69a	67.43a
	N360	19.64a	25.30b	54.59b
郑稻 C42	N0	24.49b	28.14b	58.34b
	N120	26.62ab	31.68ab	71.95b
	N240	30.28a	41.31a	91.07a
	N360	27.65ab	37.09ab	62.61b

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

表 8 不同施氮量处理下 2 个水稻品种的乙酸含量

品种	处理	乙酸含量		
		分蘖盛期	幼穗分化始期	抽穗期
徐稻 3 号	N0	9.42	10.15b	18.11b
	N120	9.46	10.48ab	27.34b
	N240	10.56	10.60ab	42.49a
	N360	10.05	10.99a	23.44b
郑稻 C42	N0	8.37b	10.95	19.80b
	N120	9.38a	11.17	44.03a
	N240	10.00a	12.70	48.44a
	N360	9.56a	12.39	17.91b

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

表 9 不同施氮量处理下 2 个水稻品种的琥珀酸含量

品种	处理	琥珀酸含量		
		分蘖盛期	幼穗分化始期	抽穗期
徐稻 3 号	N0	9.72c	14.13	32.88c
	N120	14.54b	15.73	56.45b
	N240	16.21a	16.43	104.92a
	N360	16.18a	16.57	98.75a
郑稻 C42	N0	10.59b	15.66	45.56b
	N120	15.83a	16.14	57.45b
	N240	16.37a	18.62	143.63a
	N360	16.90a	17.24	148.30a

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

2.3 施氮量对水稻根系解剖结构的影响

由表 10 可知，随着施氮量的增加 2 个品种的通气组织面积呈先降后增的趋势，徐稻 3 号在 N120 处达到最低值，郑稻 C42 在 N240 处达到最低值，与 N0 相比，N120 条件下徐稻 3 号的通气组织面积减少了 24.9%，N240 条件下郑稻 C42 的通气组织面积减少了 56.3%；不同氮肥处理下，2 个水稻品种的中柱直径与不定根直径之比均在 N240 处达到最小值，与 N0 相比，徐稻 3 号的显著降低 26.3%，郑稻 C42 的降低 13.0%。

徐稻 3 号的皮层横截面面积、中柱直径、不定根直径均在 N240 处达到最高值，与 N0 相比，分别增加 122.5%、13.4%、49.5%；郑稻 C42 的皮层横截面面积、中柱直径、不定根直径均在 N360 处达到最高值，与 N0 相比分别增加 89.8%、18.2%、37.7%，活细胞比例在 N240 处达到最大值，与 N0 相比增加 18.1%。

表 10 不同施氮量处理下 2 个水稻品种幼穗分化期距根尖 0.5 cm 处的根系解剖结构

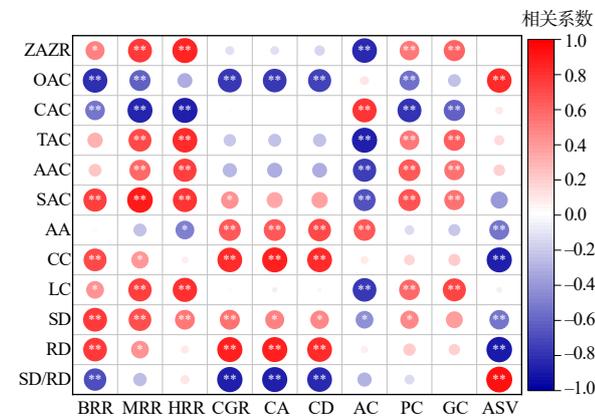
Table 10 The root anatomy 0.5 cm from the root tip at the young panicle initiation stage of two rice varieties with different nitrogen application rates

品种	处理	通气组织面积/ $\times 10^3 \mu\text{m}^2$	皮层横截面面积/ $\times 10^4 \mu\text{m}^2$	活细胞比例/%	中柱直径/ μm	不定根直径/ μm	中柱直径与 不定根直径之比
徐稻 3 号	N0	60.21ba	48.35c	74.76b	150.19c	782.68c	0.19a
	N120	45.20c	64.30b	81.82ab	160.77b	903.42b	0.18ab
	N240	72.07ab	107.59a	81.17ab	170.25a	1 170.39a	0.14c
	N360	81.55a	75.48b	85.73a	165.38ab	980.05b	0.17b
郑稻 C42	N0	50.23a	28.01c	78.74c	139.55b	597.30c	0.23a
	N120	33.67b	46.76b	86.95b	166.97a	771.56b	0.22ab
	N240	21.96c	52.30a	92.99a	164.37a	816.08a	0.20b
	N360	32.25b	53.16a	85.60b	164.89a	822.52a	0.20b

同列数据不同字母表示同一品种处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.4 水稻根系特性与稻米品质间的关系

水稻根系伤流液中玉米素和玉米素核苷、酒石酸、乙酸、琥珀酸含量及活细胞比例与稻米精米率、整精米率、蛋白质含量、胶稠度呈极显著正相关(图 1); 柠檬酸含量与稻米糙米率、精米率、整精米率、蛋白质含量、胶稠度呈极显著负相关,与直链淀粉含量呈极显著正相关;草酸、中柱直径和不定根直径的比值与外观品质呈极显著负相关,而通气组织面积、皮层横截面面积、中柱直径、不定根直径与外观品质呈显著或极显著正相关。



ZAZR、OAC、CAC、TAC、AAC、SAC、AA、CC、LC、SD、RD、SD/RD、BRR、MRR、HRR、CGR、CA、CD、AC、PC、GC、ASV 分别表示玉米素和玉米素核苷、草酸、柠檬酸、酒石酸、乙酸、琥珀酸、通气组织面积、皮层横截面面积、活细胞比例、中柱直径、不定根直径、中柱直径与不定根直径之比、糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白面积、垩白度、直链淀粉含量、蛋白质含量、胶稠度、碱消值。*示 $P \leq 0.05$; **示 $P \leq 0.01$ 。

图 1 幼穗分化期根系特性与稻米品质间的相关性

Fig. 1 The relationship between root index and rice quality at panicle initiation stage

3 结论与讨论

相较于正常状况,处于低营养胁迫环境时,植

物根系分泌物在类别和数量层面会出现变动,这一现象有助于植物适应环境变化,摄取养分,进而减轻胁迫对其的影响^[13]。水稻根系分泌物受供氮水平影响,适宜的氮肥施用能增加根系有机酸与氨基酸的分泌^[14]。廖李容^[15]研究发现,氮添加增加了草酸、酒石酸、吡咯-2-羧酸含量,降低了 2-酮基异戊酸含量。常二华等^[16]研究发现,水稻结实前中期氮胁迫抑制根系乙酸、马来酸、酒石酸及琥珀酸的分泌,显著降低根系有机酸总量及各组分的含量。本研究发现,随着施氮量的增加,水稻根系分泌物酒石酸和乙酸含量基本呈先上升后下降的趋势,N240 处理的含量较高;而根系分泌的草酸和柠檬酸含量基本上呈现先下降后增加的趋势,在 N240 处理下达到最低值。可见,本研究条件下 N240 处理能促进根系酒石酸和乙酸的分泌,抑制草酸和柠檬酸的分泌,这表明适宜的氮肥施用量对根系分泌物的调控具有重要作用,有助于植物适应环境变化并维持正常的生理功能^[17]。

根伤流强度及根系分泌物中有机酸含量的增加,能够提升稻米的加工品质、营养品质和淀粉黏滞特性,有利于稻米外观品质的改善^[18]。本研究结果表明,水稻根系伤流液中玉米素和玉米素核苷、酒石酸、乙酸含量与稻米精米率、整精米率、蛋白质含量、胶稠度呈极显著正相关。玉米素和玉米素核苷能够促进水稻植株的新陈代谢,含量较高时能够增强水稻对营养物质的吸收和转运能力,使得更多的营养物质能够积累到稻米中^[19],从而提高稻米的精米率、整精米率以及蛋白质含量,使得稻米的胶稠度更加适宜,米饭口感更好。本研究还发现柠檬酸含量与稻米糙米率、精米率、整精米率、蛋白质含量、胶稠度呈极显著负相关,与直链淀粉含量呈极显著正相关。由此可见,根系有机酸含量直接影响稻米品质。本研究中 N240 处理玉米素和玉米

素核苷、酒石酸、乙酸含量较高而柠檬酸含量较低，有利于稻米品质的优化。

根系解剖结构差异影响作物根系对养分和水分的吸收，从而影响地上部生长和稻米品质。研究^[20]表明，活细胞比例较高，有利于养分与水分的高效吸收；中柱直径越大，物质运输功能越强大，更有利于提升稻米的精米率、整精米率以及蛋白质含量，使米饭胶稠度适宜，口感更佳。根系通气组织形成可能会阻碍养分和水分在根系皮层细胞的径向运输过程，影响水稻地上部的生长发育，不利于地上部籽粒灌浆与稻米品质的形成^[21]；中柱直径大的根系具有较强的吸收与运输能力，有利于水稻产量与品质的提升^[11]。本研究结果表明，活细胞比例与稻米精米率、整精米率、蛋白质含量呈显著或极显著正相关；中柱直径和不定根直径的比值与外观品质呈极显著负相关，而通气组织面积、皮层横截面面积、不定根直径与外观品质呈极显著正相关。本研究中，2 个供试水稻品种中柱直径和不定根直径的比值均在 N240 处较小；徐稻 3 号在 N240 处处理下皮层横截面面积、中柱直径、不定根直径均达到最高值，郑稻 C42 这 3 个指标在 N360 处达到最高值，但 N240 与其相比差异不显著；郑稻 C42 活细胞比例在 N240 处达到最高值，徐稻 3 号在 N360 处达到最高值，但 N240 与其相比差异不显著。综上，N240 处理下根系解剖结构比较理想，不仅有利于稻米品质提升，还能够实现肥料的减量，降低生产成本，减轻环境污染。

参考文献：

- [1] 吴昊, 张瑛, 王琛, 等. 栽培优化对长江下游水稻灌浆期根系特征和稻米淀粉特性的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(2): 478–492.
- [2] 徐国伟, 常二华, 陈明灿, 等. 根系分泌物对水稻及其他作物生长与品质影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(23): 4757–4760.
- [3] 杨建昌, 常二华, 张文杰, 等. 根系化学讯号与稻米品质的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 38–47.
- [4] 常二华, 王朋, 唐成, 等. 水稻根和籽粒细胞分裂素和脱落酸浓度与籽粒灌浆及蒸煮品质的关系[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 540–547.
- [5] SALSINHA Y C F, RINI D S, INDRADEWA D, et al. Anatomical characteristics of the upland local Indonesian rice cultivars as structural protection against drought[J]. Brazilian Journal of Botany, 2023, 46(3): 645–659.
- [6] 覃斌, 孙鑫, 刘福强, 等. 氮肥管理对有序机抛早稻产量及氮素利用的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(1): 1–8.
- [7] LU B, XU C S, LI Z Y, et al. Influence of the temperature during grain filling stage and nitrogen application rate on yield and quality of *indica* hybrid rice[J]. Field Crops Research, 2024, 309: 109333.
- [8] LI W M, ZHANG D H, HE W H, et al. Effect of optimal nitrogen application and mid-season drainage on rice root activity and reductive substances in straw-incorporated paddy[J]. Soil Use and Management, 2024, 40(1): e13024.
- [9] LIU K, CHEN Y, LI S Y, et al. Differing responses of root morphology and physiology to nitrogen application rates and their relationships with grain yield in rice[J]. The Crop Journal, 2023, 11(2): 618–627.
- [10] 阚建鸾, 石吕, 韩笑, 等. 减氮和侧深施缓混肥对‘南粳 5055’产量、品质及氮素吸收利用的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(2): 91–96.
- [11] 张晨晖, 章岩, 李国辉, 等. 侧深施肥下水稻高产形成的根系形态及其生理变化特征[J]. 作物学报, 2023, 49(4): 1039–1051.
- [12] 徐国伟, 李帅, 赵永芳, 等. 秸秆还田与施氮对水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 140–146.
- [13] 莫思琪, 曹旖旎, 谭倩. 根系分泌物在重金属污染土壤生态修复中的作用机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2022, 41(2): 382–392.
- [14] 徐国伟, 陆大克, 王贺正, 等. 施氮和干湿灌溉对水稻抽穗期根系分泌有机酸的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 516–525.
- [15] 廖李容. 氮添加对白羊草土壤有机碳组分及根系分泌物的影响[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2021.
- [16] 常二华, 张耗, 张慎凤, 等. 结实期氮磷营养水平对水稻根系分泌物的影响及其与稻米品质的关系[J]. 作物学报, 2007, 33(12): 1949–1959.
- [17] WANG Q F, MA M C, JIANG X, et al. Long-term N fertilization altered ¹³C-labeled fungal community composition but not diversity in wheat rhizosphere of Chinese black soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 135: 117–126.
- [18] LOPEZ-VALDIVIA I, YANG X Y, LYNCH J P. Large root cortical cells and reduced cortical cell files improve growth under suboptimal nitrogen in silico[J]. Plant Physiology, 2023, 192(3): 2261–2275.
- [19] JING W J, WU H, GU H Z, et al. Response of grain yield and water use efficiency to irrigation regimes during mid-season *indica* rice genotype improvement[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1647.
- [20] 陈杨. 水稻垄作梯式栽培对根系生长与根系解剖结构的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [21] SHIONO K, EJIRI M, SAWAZAKI Y, et al. Low nitrate under waterlogging triggers exodermal suberization to form a barrier to radial oxygen loss in rice roots[J]. Plant Physiology, 2024, 196(1): 551–563.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正