

DOI: 10.11686/cyxb2024142

<http://cyxb.magtech.com.cn>

李浩晶, 张丹珂, 李海润, 等. 施氮对不同食味品质水稻根系生长及分泌有机酸的影响. 草业学报, 2025, 34(2): 163—173.

LI Hao-jing, ZHANG Dan-ke, LI Hai-run, *et al.* Effect of nitrogen application rates on root growth and organic acid secretion in two rice varieties with different eating quality. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 163—173.

施氮对不同食味品质水稻根系生长及分泌有机酸的影响

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: 氮肥施用对水稻生长发育及品质形成具有重要影响, 为明确施氮对不同食味品质水稻根系生长及分泌有机酸的影响, 以郑稻 C42(优质食味)和徐稻 3 号(一般食味)为供试品种进行盆栽试验, 设置 4 个氮肥施用量, 分别为 0、120、240、360 kg·hm⁻²(以 N₀、N₁₂₀、N₂₄₀、N₃₆₀ 表示), 测定水稻根长、根表面积、根系氧化力、根系伤流量、根系伤流液中玉米素和玉米素核苷(Z+ZR)含量、脱落酸含量(ABA)、有机酸总量, 为优质食味稻米栽培提供参考。结果表明: 随着施氮量的增加, 水稻根表面积、根系氧化力、Z+ZR 含量、有机酸总量先增加后降低, 两品种在 N₂₄₀ 处各指标达到最高值。与不施氮肥相比, 抽穗期徐稻 3 号在 N₂₄₀ 时上述指标分别增加了 148.0%、48.5%、16.0% 与 86.5%, 郑稻 C42 在 N₂₄₀ 时分别增加了 103.7%、72.5%、17.8% 与 98.0%。ABA 含量随施氮量增加先降低后增加, 在 N₂₄₀ 处达到最低值。不同食味品种间比较发现, 郑稻 C42 的根系氧化力、根系伤流量、根系伤流液中 Z+ZR 含量和有机酸总量高于徐稻 3 号, 平均增加 40.7%、74.7%、9.7% 和 34.1%。郑稻 C42 的根长、根表面积均小于徐稻 3 号。相关分析可知, 根表面积、根系氧化力、根系伤流量、根系伤流液中 Z+ZR 含量和有机酸总量与直链淀粉含量呈显著或极显著负相关, 而与胶稠度呈显著或极显著正相关; 幼穗分化初期根系伤流液中 ABA 含量与直链淀粉含量呈极显著正相关, 而与胶稠度呈极显著负相关。综上, N₂₄₀ 下不同食味品种根系生长及分泌功能较强。优质食味郑稻 C42 的根长、根表面积较小, 而根系生理活性及根系伤流液中 Z+ZR 含量与有机酸总量较高。研究结果可以为不同食味水稻栽培及氮肥管理提供理论依据。

关键词: 水稻; 食味品质; 施氮量; 根系生长; 根系分泌

Effect of nitrogen application rates on root growth and organic acid secretion in two rice varieties with different eating quality

LI Hao-jing, ZHANG Dan-ke, LI Hai-run, CAO Jing*, XU Guo-wei*

Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

Abstract: The application of nitrogen fertilizer affects the growth, yield, and quality of rice (*Oryza sativa*). The aim of this study was to determine the effects of different nitrogen application rates on root growth and organic acid secretion in two rice varieties with different eating quality. A pot experiment was conducted with the rice varieties ‘Zhengdao C42’ (high flavor quality) and ‘Xudao 3’ (medium flavor quality). The experiment was established with a control and three nitrogen fertilization treatments: 0 (N₀), 120 (N₁₂₀), 240 (N₂₄₀), and 360 (N₃₆₀) kg N·ha⁻¹.

收稿日期: 2024-04-23; 改回日期: 2024-06-17

基金项目: 河南省自然科学基金(212300410341), 河南省科技攻关项目(242102110169)和河南科技大学博士科研启动基金项目(13480108)资助。

作者简介: 李浩晶(2000—), 女, 山东济南人, 在读硕士。E-mail: lihaojing22@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: caojing0111@163.com; gwxxu2007@163.com

The rice plants were analyzed to determine root length, root surface area, root oxidation activity, root exudation, the contents of zeatin and zeatin riboside (Z+ZR), and abscisic acid (ABA), and total organic acids in root exudates. The results showed that the root surface area, root oxidation activity, Z+ZR contents, and total organic acids in root exudates showed trends of initially increasing and then decreasing as the rate of nitrogen fertilizer application was increased. In both rice varieties, the maximum values of all measured indexes were in the N_{240} treatment. The root surface area, root oxidation activity, Z+ZR content, and total organic acids in root exudates were increased by 148.0%, 48.5%, 16.0%, and 86.5%, respectively, in Xudao 3 in the N_{240} treatment at the heading stage; and by 103.7%, 72.5%, 17.8%, and 98.0%, respectively, in Zhengdao C42 in the N_{240} treatment at the heading stage, compared with their respective controls at the same stage. The ABA content first decreased and then increased as the nitrogen application rate increased, and was lowest in the N_{240} treatment. Comparisons of the two varieties showed that the root oxidation activity, root exudation, Z+ZR content, and total organic acids in root exudates were 40.7%, 74.7%, 9.7%, and 34.1% higher, respectively, in Zhengdao C42 than in Xudao 3. The root length and root surface area were lower in Zhengdao C42 than in Xudao 3. The root surface area, root oxidation activity, root exudation, Z+ZR content, and total organic acid content in exudates showed significant or extremely significant negative correlations with amylose content, and significant or extremely significant positive correlations with gel consistency. The ABA content in root exudates showed an extremely significant positive correlation with amylose content, but a negative correlation with gel consistency. For both rice cultivars, root growth and organic acid secretion showed the best results in N_{240} treatment. These results provide guidance for nitrogen management during the cultivation of high-quality eating rice.

Key words: rice; eating quality; nitrogen application amount; root growth; root secretion

水稻(*Oryza sativa*)作为保障我国粮食安全的重要作物,随着近年来优质食味水稻推广面积不断扩大,人们对水稻的关注逐渐由产量向品质转变。水稻产量和稻米品质除了受水稻基因型、气候条件和栽培措施的影响外,受氮肥影响较大,但过多的氮素养分通过挥发、淋洗和地表径流等方式损失,既造成了浪费又增加了环境的压力^[1-2]。Chen等^[3]研究表明,随着氮肥施用量的增加,水稻外观品质有所改善,但碾米、蒸煮品质和食用品质却有所下降。也有研究发现,优质稻米的短中链分布比例随施氮量的增加呈先上升后下降的趋势,适量增施氮肥会提高优质稻米的食味值^[4]。稻米的蒸煮食味品质与淀粉理化特性密切相关,关键指标主要有直链淀粉含量、胶稠度、蛋白质含量以及消减值等,直链淀粉含量被认为是影响稻米品质的重要因子,对稻米糊化特性有显著作用进而影响米饭食味。优良食味稻米通常表现为直链淀粉含量低、胶稠度长、蛋白质含量较低、消减值低等特性^[5]。多数研究表明增施氮肥会降低稻米直链淀粉含量,增加蛋白质含量,劣化其蒸煮食味品质^[6-7]。

水稻根系为地上部生长发育提供基本营养物质和能量,是吸收水分和营养、合成激素和有机酸的重要器官。根系形态生理特征与地上部的产量形成密切相关关系,良好的根系特征能使水稻充分吸收养分以满足籽粒灌浆所需,因此良好的根系功能也能有效改善稻米品质^[8]。有研究发现,稻米的食味品质在分蘖期随根尖数的增加而提升,灌浆期食味品质随根系体积的增加而提升,结实期的根系氧化力与稻米的垩白粒率和垩白度呈极显著负相关^[9]。根系伤流强度是根系的一个重要生理指标,可以反映根系对养分的吸收、合成、运输和同化能力。伤流液中的玉米素和玉米素核苷(zeatin and zeatin riboside, Z+ZR)属于促进型植物激素,主要是能够推进细胞分裂以及减缓植株的衰老速率,其通过调控胚乳细胞的发育、分裂和生长对稻米的外观品质、蒸煮和食用品质有一定的影响^[10]。脱落酸(abscisic acid, ABA)在植株衰老和器官脱落的过程中起着不可或缺的作用,其对水稻籽粒的发育充实起着调控作用,进而影响稻米品质^[11]。有研究表明,根系伤流液中Z+ZR含量与稻米直链淀粉含量、峰值黏度、热浆黏度及最终黏度呈显著或极显著负相关^[12]。稻米的蒸煮食味品质受根系ABA浓度的影响很大,灌浆中期随着根系中ABA浓度提高,籽粒中的直链淀粉含量呈升高趋势^[13]。前人提出,有机酸对水稻品质存在积极

作用^[14],如根系分泌物中酒石酸、柠檬酸和氨基酸含量与稻米外观品质呈显著或极显著负相关,苹果酸和草酸含量与稻米外观品质呈显著或极显著正相关。根系分泌物中有机酸总量与淀粉相对结晶度呈显著或极显著正相关^[8]。水稻根系化学信号和分泌物与水稻品质显著相关,优良的水稻根系形态增加营养吸收和物质合成,提高籽粒中关键酶活性,有利于品质的形成^[12]。国内外学者就施氮量对水稻品质形成、根系形态结构、根系生理功能等方面的影响进行了大量深入研究^[9-14],但对不同食味品质水稻品种根系生长代谢差异,特别是根系分泌物中激素与有机酸的差异及其与食味品质间的关系缺少深入研究。本试验观察不同施氮量下不同食味品质水稻根系生长与分泌特性差异,阐明优质食味水稻品种根系形态功能特点及其对氮素的响应,可为水稻的调优栽培提供必要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料和试验概况

本试验于2023年在河南科技大学试验农场进行,供试品种为郑稻C42(优质食味,直链淀粉含量14.7%,胶稠度72 mm)^[15]和徐稻3号(一般食味,直链淀粉含量18.4%,胶稠度60 mm)^[16]。试验地年平均气温15.1℃,年日照时数2192.7 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。过筛土含有机质14.3 mg·kg⁻¹、碱解氮75.2 mg·kg⁻¹、有效磷4.9 mg·kg⁻¹、速效钾121.2 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验设计4个氮肥(N)用量:0、120、240、360 kg·hm⁻²,依次标记为N₀、N₁₂₀、N₂₄₀与N₃₆₀,共计8个处理。磷肥、钾肥一次性基施。各处理磷肥(P₂O₅)用量一致(300 kg·hm⁻²),钾肥(K₂O)用量为195 kg·hm⁻²。氮肥按照移栽前、移栽后7 d、幼穗分化始期5:1:4施用。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,待土壤水势降到-15 kPa再复灌),分蘖末期进行轻度晒田,收获前一周停止灌水。5月14日播种,6月16日移栽,每盆3穴,每穴2苗,每个处理重复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 测定指标及方法

1.3.1 根长及根表面积测定 于分蘖盛期、幼穗分化始期、抽穗期与成熟期,各处理分别取样3盆,流水缓慢冲洗根部土壤后,用蒸馏水冲洗掉根部附着土壤,将样根摆放在盛有薄水层的扫根样品盘中,使根尽量保持分散状态,用根系扫描器(Espon Expression 1680 Scanner, Seiko Espon Corp, 日本)进行扫描,用WinRHIZO根系分析系统(Regent Instruments Inc, 加拿大)进行分析^[17]。

1.3.2 根系氧化力测定 取样时间和处理方法同1.3.1,采用 α -萘胺法^[18]测定根系氧化力。

1.3.3 根系伤流量收集 分别于分蘖盛期、幼穗分化始期、抽穗期和花后20 d,各处理分别取样3盆取伤流液,参考Hou等^[18]的方法收集伤流液,根系伤流量以mg·pot⁻¹·h⁻¹表示。

1.3.4 根系伤流液中有机酸含量测定 用Agilent 1260高效液相色谱仪(Agilent Technologies 1260, 美国),参考徐国伟等^[19]的方法测定伤流液中有机酸总量。

1.3.5 根系伤流液中激素含量测定 参考景文疆等^[12]的方法测定根系伤流液中玉米素和玉米素核苷、脱落酸含量。

1.4 数据处理与分析

采用Excel处理试验数据,用SPSS 22.0软件进行方差分析,采用Spearman模型进行指标的相关性分析,Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

2.1 施氮对不同食味品质水稻根系形态与生理的影响

2.1.1 施氮下不同食味品质水稻根长差异 随着生育时期的推进,两个水稻品种根系长度总体上呈先增加后

降低的趋势(表1)。根系长度随着施氮量增加先增加后降低,在 N_{240} 时根系最长(郑稻C42抽穗期和成熟期除外),与不施氮肥相比,徐稻3号和郑稻C42根长分别增加了20.2%~139.7%与47.5%~72.9%。从不同食味品种间分析,与徐稻3号相比,郑稻C42分蘖盛期与抽穗期的根长较短,分别平均减少了7.4%和16.5%。从以上分析可知,不同食味品质水稻根长对氮肥施用的响应不同。

表1 施氮对不同食味品质水稻根长的影响

Table 1 Effect of nitrogen rates on root length of rice varieties with different eating qualities ($m \cdot hill^{-1}$)

品种 Cultivar	处理 Treatment	分蘖盛期 Mid-tillering	幼穗分化始期 Panicle initiation	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
徐稻3号 Xudao 3	N_0	105.77e	142.55c	205.13d	230.36d
	N_{120}	201.81bc	282.83b	352.53b	244.71cd
	N_{240}	253.49a	340.70a	465.08a	276.83b
	N_{360}	211.09bc	335.27a	357.15b	235.32d
	平均值 Mean	193.04	275.34	344.98	246.81
郑稻C42 Zhengdao C42	N_0	136.47d	192.77c	213.57d	207.02e
	N_{120}	159.49d	311.42ab	238.29c	264.58bc
	N_{240}	223.46b	333.26a	347.41b	305.37a
	N_{360}	195.79c	330.70a	353.24b	322.97a
	平均值 Mean	178.81	292.04	288.13	274.99
方差分析 Variance analysis (ANOVA)					
品种 Cultivar (C)		6.16**	2.36*	179.04**	35.79**
施氮量 Nitrogen (N)		73.88**	103.31**	396.65**	27.81**
品种×施氮量 C×N		7.75**	1.86*	64.90**	18.27**

注: 同列不同字母表示不同处理在0.05水平差异显著。*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$ 。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$. The same below.

2.1.2 施氮对不同食味品质水稻根表面积的影响 随着生育时期的推进,两个水稻品种根表面积总体上呈先增加后降低的趋势(表2)。随着施氮量增加,徐稻3号与郑稻C42根表面积均先增加后降低,在 N_{240} 时最大。与不施氮肥相比,徐稻3号和郑稻C42根表面积分别增加了87.5%~148.0%与58.8%~186.4%。从不同食味品种间分析,与徐稻3号相比,郑稻C42的根表面积较小,4个生育时期分别减少4.3%(分蘖盛期)、4.3%(幼穗分化始期)、10.9%(抽穗期)及5.7%(成熟期)。不同食味品质水稻根表面积对氮肥施用的响应不同,郑稻C42根表面积整体低于徐稻3号。

2.1.3 施氮对不同食味品质水稻根系氧化力的影响 随着生育期的推进,两个水稻品种根系氧化力总体上呈先增加后降低的趋势(图1)。随着施氮量增加,徐稻3号与郑稻C42根系氧化力先增加后降低,在 N_{240} 时根系氧化力最大,与不施氮肥相比,徐稻3号和郑稻C42根系氧化力分别增加48.5%~184.3%与72.5%~87.9%。从不同食味品种间分析,与徐稻3号相比,郑稻C42的根系氧化力较高,4个生育时期分别增加40.9%(分蘖盛期)、18.3%(幼穗分化始期)、75.7%(抽穗期)及28.0%(成熟期)。不同食味品质水稻根系氧化力对氮肥施用的响应不同,郑稻C42根系氧化力明显高于徐稻3号。

2.1.4 施氮对不同食味品质水稻根系伤流量的影响 由图2可知,徐稻3号根系伤流量随着施氮量增加而增加;郑稻C42根系伤流量随着施氮量增加先增加后降低,在 N_{240} 时达到最高,比不施氮肥增加了223.6%(分蘖盛期)、204.1%(幼穗分化始期)、62.0%(抽穗期)、434.6%(花后20d)。不同食味品种间比较发现,与徐稻3号相比,郑稻C42的根系伤流量较高,4个生育时期分别增加84.8%(分蘖盛期)、73.2%(幼穗分化始期)、105.0%(抽穗期)及35.8%(花后20d)。不同食味品质水稻根系伤流量对氮肥施用的响应不同,郑稻C42根系伤流量高于徐稻3号。

表 2 施氮对不同食味品质水稻根表面积的影响

Table 2 Effect of nitrogen rates on root surface of rice varieties with different eating qualities (m ² ·hill ⁻¹)					
品种 Cultivar	处理 Treatment	分蘖盛期 Mid-tillering	幼穗分化始期 Panicle initiation	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
徐稻 3 号 Xudao 3	N ₀	0.15f	0.27d	0.25e	0.24d
	N ₁₂₀	0.20d	0.46c	0.42c	0.31c
	N ₂₄₀	0.30a	0.58ab	0.62a	0.45a
	N ₃₆₀	0.26b	0.55b	0.55b	0.38b
	平均值 Mean	0.23	0.47	0.46	0.35
郑稻 C42 Zhengdao C42	N ₀	0.17ef	0.22e	0.27e	0.22d
	N ₁₂₀	0.19de	0.42c	0.34d	0.36b
	N ₂₄₀	0.27b	0.63a	0.55b	0.38b
	N ₃₆₀	0.23c	0.54b	0.47c	0.37b
	平均值 Mean	0.22	0.45	0.41	0.33
方差分析 Variance analysis (ANOVA)					
品种 Cultivar (C)		6.57**	1.40	15.13**	11.77**
施氮量 Nitrogen (N)		100.81**	174.18**	116.61**	253.65**
品种×施氮量 C×N		4.57*	3.20*	3.03	26.35**

2.2 施氮对不同食味品质水稻根系伤流液中激素、有机酸含量的影响

2.2.1 施氮对不同食味品质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先增加后降低的趋势(图 3)。两个品种根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量均在 N₂₄₀ 时最高,与不施氮肥相比,徐稻 3 号和郑稻 C42 的玉米素和玉米素核苷含量分别增加 9.8%~28.9% 与 10.4%~34.8%。从不同食味品种间分析,与徐稻 3 号相比,郑稻 C42 的玉米素和玉米素核苷含量较高,抽穗后表现尤为明显,除分蘖期减少 1.4%,剩余 3 个时期分别增加 14.7%(幼穗分化始期)、9.6%(抽穗期)及 16.1%(花后 20 d)。不同食味品质水稻根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量对氮肥施用的响应不同,郑稻 C42 玉米素和玉米素核苷含量整体高于徐稻 3 号。

不同生育时期的水稻根系脱落酸含量均随着施氮量的增加呈先降低后增加的趋势(图 4),抽穗前尤为明显。两个品种根系伤流液中脱落酸含量在 N₂₄₀ 时最低,与不施氮肥相比,徐稻 3 号和郑稻 C42 的脱落酸含量分别降低 5.0%~17.0% 与 6.9%~20.1%。不同食味品质水稻根系伤流液中脱落酸含量差异较小。

2.2.2 施氮对不同食味品质水稻根系伤流液中有机酸总量的影响 随着生育期进程的推进,水稻根系伤流液中有机酸总量呈先增加后降低的趋势(图 5)。两个品种根系伤流液中有机酸总量在 N₂₄₀ 时最高(花后 20 d 的郑稻 C42 除外),抽穗期表现尤为明显。与不施氮肥相比,徐稻 3 号有机酸总量平均增加 86.5%,郑稻 C42 有机酸总量平均增加 98.0%。从不同食味品种间分析,与徐稻 3 号相比,郑稻 C42 的有机酸总量较高,4 个生育时期分别增加

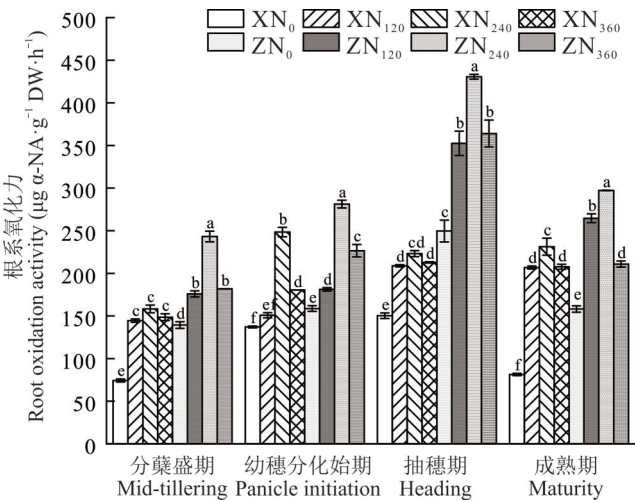


图 1 施氮对不同食味品质水稻根系氧化力的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen rates on root oxidation activity of rice varieties with different eating qualities

X: 徐稻 3 号; Z: 郑稻 C42。同一生育时期不同字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。X: Xudao 3; Z: Zhengdao C42. Different letters in the same stage indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same below.

25.5% (分蘖盛期)、21.1% (幼穗分化始期)、27.9% (抽穗期) 及 61.9% (花后 20 d)。不同食味品质水稻根系伤流液中有机酸总量对氮肥施用的响应不同, 郑稻 C42 有机酸总量整体高于徐稻 3 号。

2.3 不同食味品质水稻根系特性与蒸煮食味品质关系

水稻 4 个时期的根长 (抽穗期除外)、根表面积、根系氧化力、根系伤流量、根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量、有机酸总量与直链淀粉含量呈显著或极显著负相关, 根系伤流液中脱落酸含量 (抽穗期除外) 与直链淀粉含量呈显著或极显著正相关; 根表面积、根系氧化力、根系伤流量、根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量、有机酸总量与胶稠度呈显著或极显著正相关, 幼穗分化始期与花后 20 d 根系伤流液中脱落酸含量与胶稠度呈极显著负相关 (图 6)。

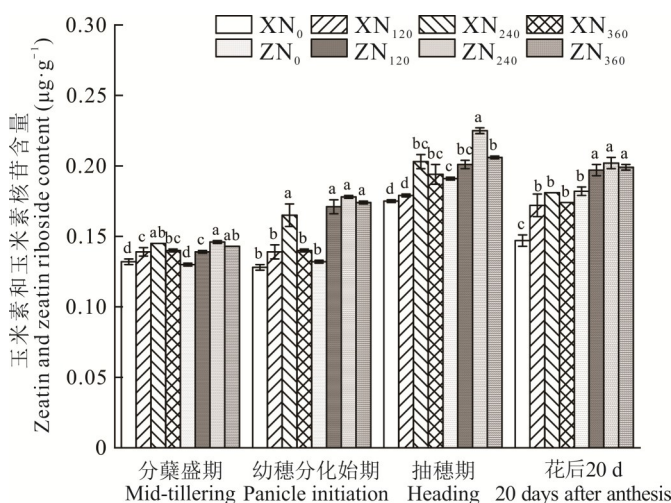


图 3 施氮对不同食味品质水稻根系伤流液中玉米素和玉米素核苷 (Z+ZR) 含量的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen rates on Z+ZR content in rice bleeding sap under different eating qualities

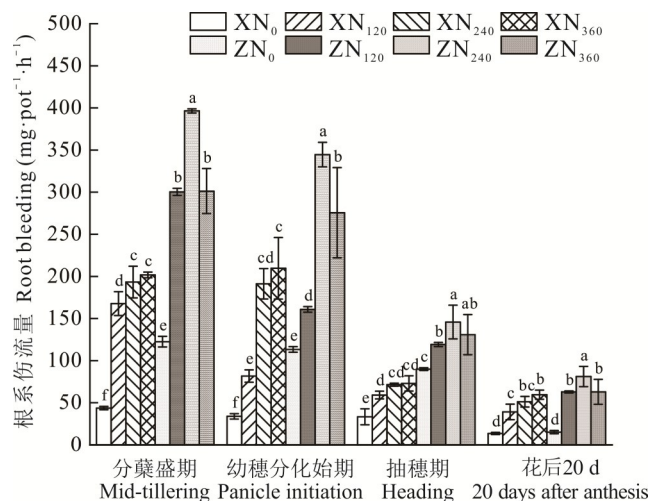


图 2 施氮对不同食味品质水稻根系伤流量的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen rates on root bleeding of rice varieties with different eating qualities

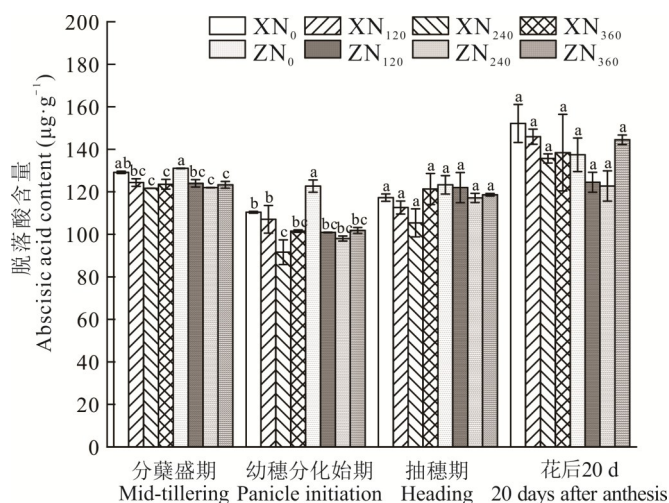


图 4 施氮对不同食味品质水稻根系伤流液中脱落酸 (ABA) 含量的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen rates on ABA content in rice bleeding sap under different eating qualities

3 讨论

3.1 施氮对不同食味品质水稻根系形态与生理特征的影响

根系对植物的生长发育至关重要, 水稻的根系指标如根长、根表面积以及体积等可以表现其根系生长发育状况, 根系氧化力、根系伤流量及根系伤流液中激素含量能够反映根系生理活性^[20]。Hou 等^[18]研究表明, 提高氮肥施用量可改善 2 个水稻品种的根系形态与生理指标 (根干重、根系氧化力、根系伤流量、根系伤流液中 Z+ZR 含量) 和地上生理指标。有研究表明氮素管理能够影响根系分布, 低氮均可促进深根生长、提高根系生理功能, 高氮则限制深层根系的生长和生理活性^[21]。本研究表明, 随着施氮量的增加, 根长、根表面积、根系氧化力、Z+ZR 含量呈先升高后降低的趋势。较大的根系会过多消耗地上部合成的光合产物, 进而对籽粒灌浆和产量品质形成造成不利影响^[22]。适宜施氮能够提高籽粒中腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶 (ADP-glucose pyrophosphorylase,

AGP)和颗粒结合淀粉合成酶活性,促进淀粉合成酶和淀粉分支酶活性增加,同时保持合理水平的内源激素含量,从而改善了稻米的蒸煮与食味品质^[23]。可见,通过氮肥施用可以改变水稻的根系形态和生理功能来调控水稻生长^[24]。

优质食味品质水稻在保持较高灌浆前期光合势的同时,能进一步提高结实期茎鞘非结构性碳水化合物转运率,促进灌浆启动,增加灌浆前期干物质积累,提升水稻结实率^[25]。不同食味品质水稻根系形态与生理有何差异? 本研究表明,郑稻 C42 分蘖盛期与抽穗期根长较短,根系表面积整体低于徐稻 3 号,而根系氧化力、根系伤流量及伤流液中 Z+ZR 含量明显高于徐稻 3 号。这可能与小根系品种生育后期根系活力高、生理功能强有关^[26]。Yang

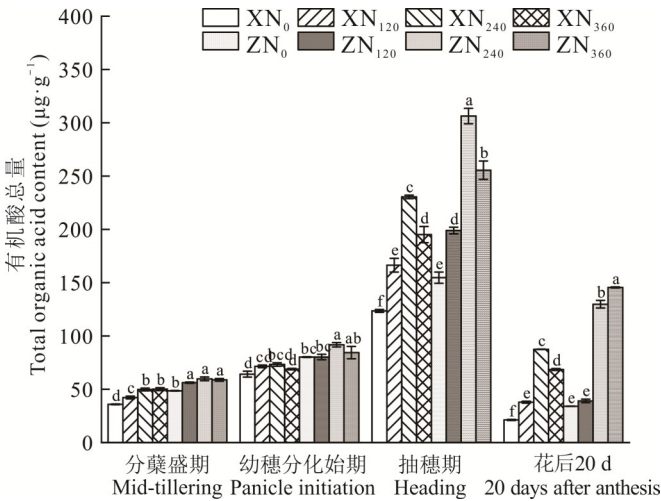


图 5 施氮对不同食味品质水稻根系伤流液中有有机酸总量的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen rates on total organic acid content in rice bleeding sap under different eating qualities

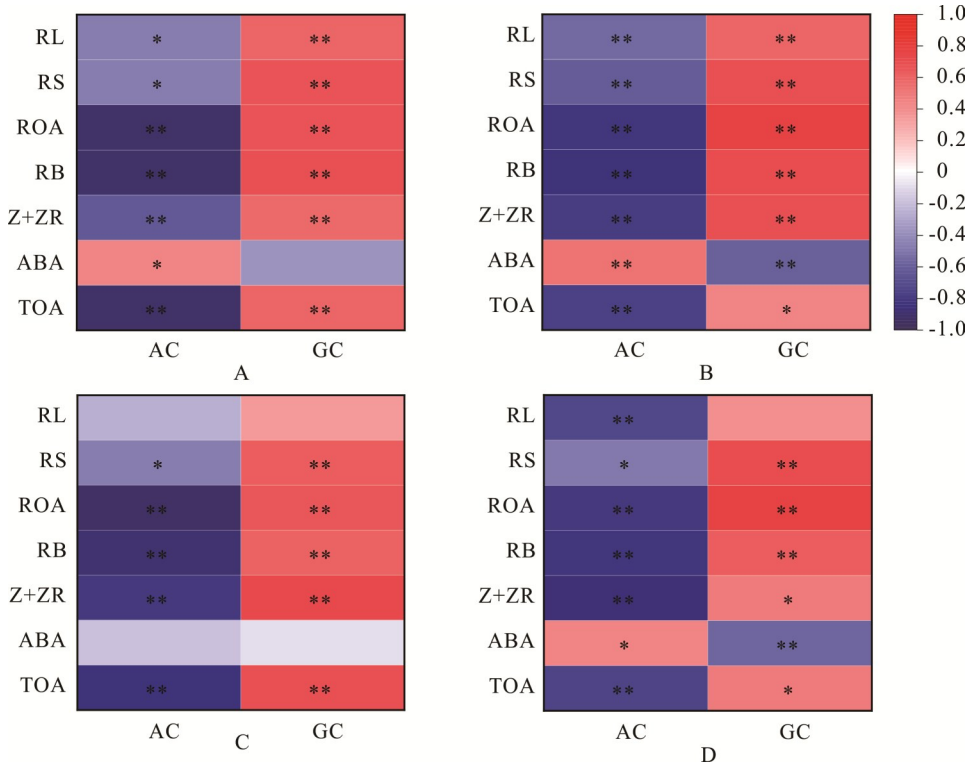


图 6 不同食味品质水稻根系特性与蒸煮食味品质间的关系

Fig. 6 The relationship between root index and eating qualities of rice

RL: 根长 Root length; RS: 根表面积 Root surface area; ROA: 根系氧化力 Root oxidation activity; RB: 根系伤流量 Root bleeding sap; Z+ZR: 根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量 Contents of zeatin and zeatin riboside in root bleeding sap; ABA: 根系伤流液中脱落酸含量 Contents of abscisic acid in root bleeding sap; TOA: 根系伤流液中有有机酸总量 Total organic acid in root bleeding sap; AC: 直链淀粉含量 Amylose content; GC: 胶稠度 Gel consistency. A: 分蘖盛期 Mid-tillering; B: 幼穗分化初期 Panicle initiation; C: 抽穗期 Heading stage; D: 成熟期或花后 20 d Maturity or 20 days after anthesis. *: $P \leq 0.05$; **: $P \leq 0.01$.

等^[13]研究得出,籽粒灌浆中后期根系合成的 Z+ZR 浓度与稻米碱化值及胶稠度呈显著或极显著正相关。较高的根系 Z+ZR 通过调节结实期水稻淀粉合成相关酶活性来影响稻米的食味品质。吴昊等^[8]的研究也表明适当较小的根冠比使根系吸收的养分大部分转运至地上部用于籽粒淀粉合成,良好的根系特征有利于地上部生理活性的

提高,促进籽粒灌浆、有利于稻米品质形成。可见优质食味品质水稻具有适宜的根系形态,较高的根系氧化力、根系伤流量及激素含量。因此,在生产实践中,应注重水稻根系生理活性的提升与维持,促进淀粉合成相关酶活性、优化籽粒灌浆特性,保持合理水平的内源激素含量,进而提升稻米的蒸煮与食味品质。

3.2 施氮下不同食味品质水稻根系伤流量和根系伤流液中有机酸总量差异

水稻体内所需的氮素主要由根系从土壤中吸收,根系承担着吸收水肥的重要功能,水稻各部位的生长发育及其一系列生理活动都离不开根系的支持,根系伤流液是反映根系功能的重要指标,根系伤流液中激素和有机酸可以通过维管组织传输至地上部各器官中并产生作用^[12]。有研究表明,与不施氮肥对照相比,施肥处理提高了有机酸分泌的总量^[27]。也有研究表明,中氮条件下根系分泌的有机酸含量整体较高,但在高氮处理下,各有机酸含量并未显著增加^[28]。本研究发现,随着施氮量的增加,水稻根系伤流量及分泌物中有机酸总量呈先上升后下降趋势,表明适宜的施氮量可促进有机酸的分泌,施氮量过高时会抑制有机酸的生成,可能是中氮下根系活性增强,有利于根系有机酸、氨基酸的合成,而高氮对水稻根冠具有一定的破坏作用,根系活性降低,不利于根系功能的发挥^[28]。

不同基因型水稻有机酸的分泌量和组分存在显著性差异,因而会影响根际微生物的活性和数量^[29-30]。唐杰等^[31]提出,不同镉处理下3个品种水稻根系分泌的有机酸和氨基酸含量差异不显著。本试验表明,优质食味品质品种郑稻C42的有机酸总量高于一般食味品质品种徐稻3号。水稻分泌的有机酸组分及其浓度影响稻米的蒸煮和食味品质,食味品质较优的水稻品种根系分泌物中有机酸如苹果酸或琥珀酸浓度较高^[32],原因可能是有机酸含量较高的品种可以在改善根际土壤环境、提高土壤中潜在有效养分利用率方面等优于有机酸含量较低的品种,以此促进水稻根系吸收养分,推动营养元素的物质循环与能量流动,有利于地上部籽粒灌浆,促进稻米优质食味的形成^[33]。

3.3 不同食味品质水稻根系特性与蒸煮食味品质关系

直链淀粉含量和胶稠度是影响稻米蒸煮食味品质的重要指标,一般来说,高直链淀粉稻米往往食味品质较差,其米饭表现出干燥、蓬松、分离和坚硬的特性,相反低直链淀粉稻米食味品质较好,其米饭通常柔软而有光泽和粘性^[34]。胶稠度可以体现稻谷口感和食味品质。米胶越长,稠度越大,稻米口感越好,米饭也更柔软。米胶长度体现了稻米活化程度和内在酶活性,是优质稻谷的一个重要指标^[35]。本研究中根表面积、根系氧化力、根系伤流量、根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量、有机酸总量与直链淀粉含量呈显著或极显著负相关,与胶稠度呈显著或极显著正相关,与前人提出的观点:根系氧化力、根系酸性磷酸酶活性与直链淀粉含量、碱消值呈显著或极显著负相关,根长与胶稠度呈极显著正相关有相同之处^[36-37],可见根系形态及生理特征与蒸煮食味品质密切相关。植株生长过程中所需的许多营养物质都由根系提供,根系伤流液中含有许多物质,如矿质元素、糖、激素、有机酸等,细胞分裂素(Z+ZR)和ABA通过调节籽粒中淀粉合成关键酶的活性,实现对稻米蒸煮品质的调控作用^[38]。本研究表明根系伤流液中的Z+ZR含量、有机酸总量与直链淀粉含量呈显著或极显著负相关,与胶稠度呈显著或极显著正相关,幼穗分化期ABA含量与直链淀粉含量呈显著或极显著正相关,与胶稠度呈负相关。朱安等^[38]同样得出,灌浆期根系形态和生理特性与胶稠度呈显著或极显著正相关,稻米直链淀粉含量与根系氧化力、根系中Z+ZR含量、分泌物中有机酸总量呈显著或极显著负相关。可见根系形态、生理及分泌特性可以通过影响水稻养分及水分吸收与调节籽粒灌浆来影响稻米蒸煮食味品质。

4 结论

水稻根表面积、根系氧化力、根系伤流量、玉米素和玉米素核苷含量、有机酸总量随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,2个品种在N₂₄₀处各指标达到最高值。在氮肥调控下,与一般食味品种徐稻3号相比,优质食味品种郑稻C42的根长、根表面积较小,根系生理活性如根系氧化力、根系伤流量及其组分中Z+ZR含量及有机酸总量较高。通过氮肥管理调控根系形态、提升根系代谢功能有利于优质食味稻米的形成。

参考文献 References:

- [1] Sundus Z, Xu J. Recent advances to enhance nutritional quality of rice. *Rice Science*, 2023, 30(6): 523—536.
- [2] Liu J X, Fan X W, Li X Y, *et al.* Responses of different agricultural structures to nitrogen loss and agricultural green development in Northwest China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 367: 108956.
- [3] Chen G Y, Duan Q, Wu C Y, *et al.* Optimizing rice yield, quality and nutrient use efficiency through combined application of nitrogen and potassium. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1335744.
- [4] Febina M, Deepa J, Maya R, *et al.* Physicochemical properties, eating and cooking quality and genetic variability: A comparative analysis in selected rice varieties of South India. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2023, 5(1): 1—12.
- [5] Dou Z, Yang Q, Guo H L, *et al.* A comparative study of grain quality and physicochemical properties of premium japonica rice from three typical production regions. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1270388.
- [6] Xu Y Q, Guan X Y, Han Z Y, *et al.* Combined effect of nitrogen fertilizer application and high temperature on grain quality properties of cooked rice. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 874033.
- [7] Guo X Q, Wang L Q, Zhu G L, *et al.* Impacts of inherent components and nitrogen fertilizer on eating and cooking quality of rice: a review. *Foods*, 2023, 12(13): 2495.
- [8] Wu H, Zhang Y, Wang C, *et al.* Effects of cultivation optimization on root characteristics and starch properties of rice at grain filling stage in the lower reaches of the Yangtze River. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(2): 478—492.
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. *作物学报*, 2024, 50(2): 478—492.
- [9] Shang Z X, Bian J B, Chen S J, *et al.* Relationship between rice root system and rice quality under different fertilization treatments. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2020, 27(4): 1—6.
尚振西, 边嘉宾, 陈帅君, 等. 不同施肥处理下水稻根系与稻米品质的关系研究. *天津农学院学报*, 2020, 27(4): 1—6.
- [10] Yang J C, Zhang J H, Huang Z L, *et al.* Correlation of cytokinin levels in the endosperms and roots with cell number and cell division activity during endosperm development in rice. *Annals of Botany*, 2002, 90(3): 369—377.
- [11] Sun X S, Bian X Y, Wang J D, *et al.* Loss of RSR1 function increases the abscisic acid content and improves rice quality performance at high temperature. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 256(Pt1): 128426.
- [12] Jing W J, Gu H Z, Zhang X X, *et al.* Response of grain quality and root characteristics to irrigation methods during mid-season indica rice varieties improvement. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(5): 505—519.
景文疆, 顾汉柱, 张小祥, 等. 中籼水稻品种改良过程中米质和根系特征对灌溉方式的响应. *中国水稻科学*, 2022, 36(5): 505—519.
- [13] Yang J C, Chang E H, Zhang W J, *et al.* Relationship between root chemical signals and grain quality of rice. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(1): 47—57.
- [14] Zhang Y J, Ma P, Wang Z Q, *et al.* Water-nitrogen coupling influence on rhizosphere environment and root morphology of rice under wheat straw return. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(6): 924—936.
张宇杰, 马鹏, 王志强, 等. 麦秆还田下水氮耦合对水稻根际环境及根系形态的影响. *中国生态农业学报*, 2022, 30(6): 924—936.
- [15] Liu H J. Experimental analysis of high-quality japonica rice varieties in Henan Province in 2021. *Henan Agriculture*, 2022(29): 33—34.
刘海静. 2021年河南省优质粳稻品种展示试验分析. *河南农业*, 2022(29): 33—34.
- [16] Wang J K, Liu C, Guo R L, *et al.* Characteristics of japonica rice cultivar Xudao 3 and its cultivation technique for yield of 700 kg/667 m². *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2006, 34(2): 31—32.
王健康, 刘超, 郭荣良, 等. 中粳稻徐稻3号的特征特性及大面积产量700 kg/667 m²栽培技术. *江苏农业科学*, 2006, 34(2): 31—32.
- [17] Chen Y Y, Fan P S, Mo Z W, *et al.* Deep placement of nitrogen fertilizer affects grain field, nitrogen recovery efficiency, and root characteristics in direct-seeded rice in South China. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, 40(1): 379—387.
- [18] Hou D, Liu K, Liu S, *et al.* Enhancing root physiology for increased yield in water-saving and drought-resistance rice with optimal irrigation and nitrogen. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1370297.
- [19] Xu G W, Li S, Zhao Y F, *et al.* Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on root secretion and nitrogen

- utilization of rice. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 140—146.
- 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. *草业学报*, 2014, 23(2): 140—146.
- [20] Zhao C, Chen M Y, Li X F, *et al.* Effects of soil types and irrigation modes on rice root morphophysiological traits and grain quality. *Agronomy*, 2021, 11(1): 120.
- [21] Xin W, Zhang L N, Gao J P, *et al.* Adaptation mechanism of roots to low and high nitrogen revealed by proteomic analysis. *Rice*, 2021, 14(1): 1—14.
- [22] 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. *The Crop Journal*, 2023, 11(2): 618—627.
- [23] Xu L, You H, Zhang O L, *et al.* Genetic effects of soluble starch synthase IV-2 and it with ADPglucose pyrophorylase large unit and pullulanase on rice qualities. *Rice*, 2020, 13(1): 46.
- [24] Saini R, Manjaiah M K, Chobhe A K, *et al.* Root morphological characteristics of five rice genotypes with different nitrogen use efficiency. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2023, 13(10): 3690—3697.
- [25] Fei L W, Yang S C, Ma A, *et al.* Grain chalkiness is reduced by coordinating the biosynthesis of protein and starch in fragrant rice (*Oryza sativa* L.) grain under nitrogen fertilization. *Field Crops Research*, 2023, 302: 109098.
- [26] Liu L J, Wang K J, Bian J L, *et al.* Differences in yield response to nitrogen fertilizer among rice cultivars and their relationship with root morphology and physiology. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(11): 1999—2007.
- 刘立军, 王康君, 卞金龙, 等. 水稻产量对氮肥响应的品种间差异及其与根系形态生理的关系. *作物学报*, 2014, 40(11): 1999—2007.
- [27] Yu X J, Hu B J, Yuan H, *et al.* Effects of amino acid value-added urea on rice growth and root exudates. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 39(9): 1834—1842.
- 于雪娇, 胡冰洁, 袁宏, 等. 氨基酸增值尿素对水稻生长和根系分泌物的影响. *江苏农业学报*, 2023, 39(9): 1834—1842.
- [28] Xu G W, Lu D K, Wang H Z, *et al.* Coupling effect of alternate wetting and drying irrigation and nitrogen rate on organic acid in rice root secretion at heading stage. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(4): 516—525.
- 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. *中国生态农业学报*, 2018, 26(4): 516—525.
- [29] Aulakh S M, Wassmann R, Bueno C, *et al.* Characterization of root exudates at different growth stages of ten rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Plant Biology*, 2001, 3(2): 139—148.
- [30] Liu F, Yang Z N, Yang R Q, *et al.* Effects of rice root traits and organic acid secretion on thallium absorption capacity. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2019, 46(7): 73—78.
- 刘芳, 杨钊楠, 杨睿祺, 等. 水稻根系性状和有机酸分泌对铊吸收能力的影响. *广东农业科学*, 2019, 46(7): 73—78.
- [31] Tang J, Xu H Y, Wang C Q, *et al.* Effect of cadmium stress on root growth and organic acids and amino acid secretion of three rice varieties. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2016, 42(2): 118—124.
- 唐杰, 徐浩洋, 王昌全, 等. 镉胁迫对3个水稻品种(系)根系生长及有机酸和氨基酸分泌的影响. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(2): 118—124.
- [32] Liu L J, Chang E H, Xiong Y W, *et al.* Relationships of organic acid and polyamines exudated from roots with grain cooking quality and protein components in rice. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2014, 35(3): 48—53.
- 刘立军, 常二华, 熊溢伟, 等. 水稻根系分泌物有机酸、多胺与稻米蒸煮品质及蛋白质组分的关系. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2014, 35(3): 48—53.
- [33] Du S Y, Fang Y T, Lu J W. Progress on effects of root exudates on nutrient uptake and utilization of crops. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(2): 147—157.
- 杜思垚, 方娅婷, 鲁剑巍. 根系分泌物对作物养分吸收利用的影响研究进展. *华中农业大学学报*, 2023, 42(2): 147—157.
- [34] Ma Z H, Gao M H, Cheng H T, *et al.* Differences in rice component distribution across layers and their relationship with taste. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 104(3): 1824—1832.
- [35] Cui R L, Zhou T Y, Shu C C, *et al.* Effects of salt stress on grain quality and starch properties of high-quality rice cultivars. *Agronomy*, 2024, 14(3): 444.

- [36] Li Y Y, Zhao X H, Hao W M, *et al.* Effects of different phosphorus fertilizer rates on grain yield, grain quality and root growth of rice with different phosphorus sensitivity. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(12): 219—226.
李雨阳, 赵喜辉, 郝威名, 等. 施磷量对不同磷敏感型水稻产量、品质及根系生长的影响. *中国土壤与肥料*, 2023 (12): 219—226.
- [37] Wu H, Gu H Z, Wang C, *et al.* Research progress on relationship between roots of rice and efficient absorption and utilization of nitrogen fertilizer. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(20): 9—14.
吴昊, 顾汉柱, 王琛, 等. 水稻根系与氮肥高效吸收利用关系研究进展. *江苏农业科学*, 2023, 51(20): 9—14.
- [38] Zhu A, Gao J, Huang J, *et al.* Advances in morphology and physiology of root and their relationships with grain quality in rice. *Crops*, 2020(2): 1—8.
朱安, 高捷, 黄健, 等. 水稻根系形态生理及其与稻米品质关系的研究进展. *作物杂志*, 2020(2): 1—8.