

引用格式:

李海润, 王丽, 张丹珂, 李浩晶, 徐国伟, 曹静. 不同播期下长秧龄对水稻根系形态及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(1): 1-10.

LI H R, WANG L, ZHANG D K, LI H J, XU G W, CAO J. Effects of long seedling age on rice root morphology and yield under different sowing dates[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(1): 1-10.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同播期下长秧龄对水稻根系形态及产量的影响

李海润, 王丽, 张丹珂, 李浩晶, 徐国伟, 曹静*

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 播期和秧龄对水稻生长发育及产量形成具有重要的影响。为明确不同长秧龄水稻根系生长差异及其对播期的响应, 以新粳优1号和郑稻C42为供试品种进行试验, 分别设置5月8日、5月18日2个播期(以S1、S2表示), 在每个播期下分别设置30 d和40 d 2个秧龄(以T30、T40表示), 测定水稻产量、根长、根体积、根系活跃吸收面积、总吸收面积、根系氧化力以及根系伤流液中玉米素和玉米素核苷(Z+ZR)、脱落酸(ABA)和有机酸(乙酸、酒石酸、草酸、柠檬酸)含量。结果表明: 随着播期的推迟, 长秧龄水稻各生育时期(分蘖期除外)根长、根体积、根系活跃面积、根系总吸收面积、根系氧化力、Z+ZR含量、乙酸含量、酒石酸含量及产量呈降低趋势, 2个供试品种各指标均在S2T40处达到最低值; 与S1T30相比, 抽穗期新粳优1号在S2T40时根长、根体积、根系活跃面积、根系总吸收面积、根系氧化力、Z+ZR含量、乙酸含量、酒石酸含量及产量分别降低了52.7%、32.0%、30.8%、52.7%、35.0%、9.1%、79.8%、79.2%与47.3%, 郑稻C42在S2T40时分别降低了54.5%、11.3%、2.9%、54.5%、30.3%、16.3%、26.6%、79.4%与21.0%。随秧龄的延长, ABA、草酸、柠檬酸含量均呈增加趋势, 且2个供试品种的ABA、柠檬酸含量均在S2T40处达到最高值。与S1T30相比, 抽穗期新粳优1号在S2T40时ABA、柠檬酸含量分别增加了3.6%、26.3%, 郑稻C42在S2T40时ABA、柠檬酸含量分别增加了11.0%、58.1%。综上可知, 在不同播期下, 长秧龄水稻根长、根体积均减小, 根系生理活性、根系伤流液中Z+ZR合成及乙酸和酒石酸的分泌受到抑制, ABA、草酸、柠檬酸含量均增加, 从而导致穗数、结实率与粒重显著降低, 最终导致减产。

关键词: 水稻; 播期; 秧龄; 根系形态; 根系生理

中图分类号: S511.01

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)01-0001-10

Effects of long seedling age on rice root morphology and yield under different sowing dates

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

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

Abstract: Sowing date and seedling age had important effects on the growth, development and yield formation of rice. To clarify the differences in root growth of rice with long seedling ages and their responses to sowing dates, experiments were conducted using two rice varieties, Xingengyou 1 and Zhengdao C42. Two sowing dates, May 8 and May 18(denoted as S1 and S2), were set, and two seedling ages, 30 d and 40 d(denoted as T30 and T40), were established under each sowing date. Measurements were taken of rice yield, root length, root volume, active root absorption area, total root absorption area, root oxidation activity, as well as the contents of zeatin and zeatin riboside(Z+ZR), abscisic acid(ABA), and organic acids(acetic acid, tartaric acid, oxalic acid, citric acid) in root bleeding sap. The results showed

收稿日期: 2025-06-10

修回日期: 2026-01-23

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); 河南省科技研发计划联合基金项目(24210381031); 河南科技大学博士科研启动基金项目(13480108)

作者简介: 李海润(1998—), 女, 河南偃师人, 硕士研究生, 主要从事水稻栽培生理研究, Lihairun0311@163.com; *通信作者, 曹静, 博士, 讲师, 主要从事水稻栽培生理研究, caojing0111@163.com

that with delayed sowing date, root length, root volume, active root absorption area, total root absorption area, root oxidation activity, Z+ZR content, acetic acid content, tartaric acid content and yield of long-seedling-age rice in all growth stages(except at the tillering stage) exhibited decreasing trends, and all indices of the two tested varieties reached the lowest values under S2T40. Compared with S1T30, at the heading stage, root length, root volume, active root absorption area, total root absorption area, root oxidation activity, Z+ZR content, acetic acid content, tartaric acid content and yield of Xingengyou 1 under S2T40 decreased by 52.7%, 32.0%, 30.8%, 52.7%, 35.0%, 9.1%, 79.8%, 79.2% and 47.3%, respectively; those of Zhengdao C42 under S2T40 decreased by 54.5%, 11.3%, 2.9%, 54.5%, 30.3%, 16.3%, 26.6%, 79.4% and 21.0%, respectively. ABA, oxalic acid and citric acid contents increased with prolonged seedling age, and ABA and citric acid contents of both varieties reached the highest values under S2T40. Compared with S1T30, at the heading stage, ABA and citric acid contents of Xingengyou 1 under S2T40 increased by 3.6% and 26.3%, respectively; those of Zhengdao C42 under S2T40 increased by 11.0% and 58.1%, respectively. In conclusion, under different sowing dates, long seedling age reduced root length and root volume, inhibited root physiological activity, Z+ZR synthesis, and secretion of acetic acid and tartaric acid in root bleeding sap, and increased contents of ABA, oxalic acid and citric acid. These changes consequently resulted in significant reductions in panicle number, seed-setting rate and grain weight, and ultimately led to yield loss.

Keywords: rice; sowing date; seedling age; root morphology; root physiology

播种时期决定着水稻各生育时期的光合生产能力和温光资源配置的差异,对水稻产量的形成有重要影响。水稻高产优质栽培需把握适宜的播种时期,确保灌浆结实阶段与最佳温光条件同步^[1]。播期变化会使外界环境改变,进而影响水稻产量^[2-3]。孙琪等^[4]研究发现,适宜的播期能够推动水稻各器官间的物质转运量上升,增加转运率,进而增加有效穗数,提高结实率,最终实现水稻增产。水稻的生长周期和产量受到多种因素的制约,除了播期之外,秧龄也尤为关键。秧龄不仅决定了秧苗素质,还对作物的发育时期和最终产量产生显著影响^[5]。葛梦婕等^[6]研究表明,适当延长秧龄,可培育长秧龄壮秧,从而促进增产。马均等^[7]和贾现文等^[8]认为,秧龄延长会降低水稻群体有效穗数、每穗粒数及结实率,导致产量显著下降。而在实际田间生产中,受劳动力短缺、季节气候矛盾、农时作业紧张等因素影响,水稻常出现播期推迟和秧龄延长等现象,因此,研究不同播期下长秧龄对水稻产量的影响,可为水稻生产安全和高产提供保障。

水稻产量与根系形态及其生理特征密切相关。良好的根系形态、生理性状,能够增加水稻根系生物量,提高根系吸收养分的能力,有利于水稻叶片进行光合作用,进而提高水稻产量^[9-10]。叶旭波等^[11]研究发现,孕穗期和灌浆期水稻根长和根体积与产量呈显著或极显著正相关。徐冉等^[12]研究发现,齐穗期与灌浆中期较大的根系吸收表面积与根系活跃吸收表面积以及灌浆期较高的根系氧化力,是水

稻获得高产的关键生理基础。水稻内源激素对水稻产量也有重要调控作用。赵黎明等^[13]研究发现,水稻每穗粒数、每穗粒重、结实率与籽粒中玉米素含量呈正相关,与脱落酸(ABA)含量呈负相关。植物体内常见的有机酸包括乙酸、苹果酸、柠檬酸、草酸、琥珀酸等。其中,乙酸和苹果酸是三羧酸循环(TCA循环)的关键中间产物,对水稻产量及品质形成有较大影响^[14]。当前,国内外学者针对播期与秧龄对水稻产量形成、根系形态结构等的影响开展了大量研究^[15-17],但对不同播期和秧龄互作下水稻根系生长差异,特别是水稻根系生理、根系分泌物中的激素及有机酸含量的差异缺少深入研究。本研究通过观察不同播期下长秧龄水稻根系形态及生理性状的变化,探究其对产量形成的影响,明确根系特性对长秧龄水稻产量形成的影响机制,以期为丰产水稻的调优栽培提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料和试验概况

于2024年在河南科技大学试验农场开展盆栽试验,供试品种为新粳优1号和郑稻C42。试验地年平均降水量为780.5 mm,年日照时间为2 065.6 h,年平均气温为16.4 ℃。试验盆高度为30 cm,直径为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 g·kg⁻¹、碱解氮75.2 mg·kg⁻¹、有效磷4.9 mg·kg⁻¹、有效钾121.2 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验设5月8日、5月18日2个播期(依次标记为S1、S2),每个播期下设30 d、40 d 2个秧龄(依次标记为T30、T40),共计8个处理。每个处理种植25盆。双本移栽,每盆3穴。各处理肥料用量为:氮肥(N), $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,按照移栽前40%、移栽后7 d 10%、幼穗分化期50%施用;磷肥(P_2O_5), $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;钾肥(K_2O), $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;磷肥、钾肥均一次性基施。水分管理方式为:返青前保持2~3 cm浅水层,之后采用轻度干湿交替灌溉模式,即灌溉2~3 cm水层,待土壤水势降到-15 kPa时再复灌,于分蘖末期进行轻度晒田,收获前1周停止灌水。采用防雨棚挡雨,生育期内对水分及病虫害严格监管,其余管理与大田生产管理保持一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 根系形态

分别于分蘖期、幼穗分化期、抽穗期与成熟期取样,各处理均取样3盆,先以流水缓慢冲洗根部土壤后,再用蒸馏水洗净根部附着土壤,将样品分散摆放于盛有薄层水的样品盘中,用根系扫描器(Epson Expression 1680 Scanner,日本)进行扫描。用WinRHIZO根系分析系统进行分析。

1.3.2 根系活跃面积和根系总吸收面积的测定

取样时间和处理方法同1.3.1节,采用甲烯蓝蘸根法^[18]分别测定根系活跃面积和根系总吸收面积。

1.3.3 根系氧化力的测定

取样时间和处理方法同1.3.1节,采用 α -萘胺法^[19]测定根系氧化力。

1.3.4 根系伤流液中激素及有机酸含量的测定

参考HOU等^[20]的方法,分别于分蘖期、幼穗分化期、抽穗期取样,每个处理取样3盆,收集根系伤流液,用Agilent 1260高效液相色谱仪测定根系伤流液中Z+ZR、ABA及有机酸(乙酸、酒石酸、草酸、柠檬酸)含量^[19]。

1.3.5 产量构成因子的测定及产量计算

各处理于成熟期取样4盆,分别测定每盆穗数、每穗粒数、结实率及千粒质量,并据此计算产量。

1.4 数据处理与分析

采用Excel处理试验数据,用SPSS 22.0软件进行多重比较,用Origin 2022软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同播期下长秧龄对水稻产量及产量构成因子的影响

由表1可见,不同处理对水稻产量及产量构成因子有显著影响。在同一播期下,延长秧龄后,2个水稻品种的产量均降低。其中,S2T40处理的产量最低,与S1T30及S2T30相比产量分别降低47.3%、41.4%(新粳优1号)与42.4%、26.1%(郑稻C42);在同一播期下,随着秧龄的延长,新粳优1号每穗粒数与结实率的平均降幅分别为17.3%和9.2%;郑稻C42每盆穗数、结实率与千粒质量的平均降幅分别为23.7%、10.4%和2.0%。由以上分析可知,不同播期下水稻产量对秧龄的响应不同。

表1 不同播期下长秧龄对水稻产量与产量构成因子的影响

Table 1 Effects of long seedling age on rice yield and yield components under different sowing dates

| 品种 | 处理 | 每盆穗数 | 每穗粒数 | 结实率/% | 千粒质量/g | 产量/(g·盆 ⁻¹) |
|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| 新粳优1号 | S1T30 | 19.67 ^d | 325.16 ^a | 78.44 ^a | 25.37 ^b | 126.25 ^a |
| | S1T40 | 20.67 ^d | 273.00 ^b | 72.41 ^{ab} | 26.62 ^a | 108.47 ^{ab} |
| | S2T30 | 22.67 ^d | 268.97 ^b | 73.14 ^{ab} | 25.47 ^b | 113.50 ^{ab} |
| | S2T40 | 18.33 ^d | 219.10 ^c | 65.33 ^b | 25.40 ^b | 66.56 ^d |
| | 平均值 | 20.34 | 271.56 | 72.33 | 25.72 | 103.70 |
| 郑稻C42 | S1T30 | 65.67 ^a | 76.31 ^d | 82.91 ^a | 24.27 ^c | 101.01 ^{bc} |
| | S1T40 | 47.33 ^{bc} | 88.44 ^d | 74.85 ^{ab} | 23.72 ^d | 73.63 ^d |
| | S2T30 | 51.33 ^b | 75.75 ^d | 81.91 ^a | 24.35 ^c | 78.75 ^{cd} |
| | S2T40 | 41.33 ^c | 80.30 ^d | 72.91 ^{ab} | 23.91 ^d | 58.20 ^d |
| | 平均值 | 51.42 | 80.20 | 78.15 | 24.06 | 77.90 |

注:同列不同小写字母表示数据间的差异有统计学意义($P < 0.05$)

2.2 不同播期下长秧龄对水稻根系形态生理特征的影响

2.2.1 不同播期下长秧龄对水稻根长的影响

随着生育时期的推进,相同处理下2个水稻品种根长总体上呈现出先增加后降低的趋势,抽穗期水稻根长最长(表2)。在不同播期下延长秧龄,2个

水稻品种分蘖期根长均增加,与T30相比,T40根长的平均增幅分别为18.9%(新粳优1号)和26.5%(郑稻C42);但在幼穗分化期、抽穗期及成熟期水稻根长均显著降低。例如,在抽穗期,与T30相比,T40根长的平均降幅分别为30.0%(新粳优1号)和32.3%(郑稻C42)。在幼穗分化期后,2个品种的根长均以S2T40处理最低。

表2 不同播期下延长秧龄对水稻根长的影响

| 品种 | 处理 | 分蘖期 | 幼穗分化期 | 抽穗期 | 成熟期 |
|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 新粳优1号 | S1T30 | 116.31 ^b | 326.48 ^a | 564.71 ^a | 432.80 ^a |
| | S1T40 | 125.78 ^b | 218.63 ^c | 374.45 ^c | 368.70 ^c |
| | S2T30 | 99.61 ^c | 221.98 ^c | 362.73 ^c | 379.95 ^{bc} |
| | S2T40 | 129.09 ^b | 105.49 ^c | 267.38 ^d | 277.72 ^d |
| | 平均值 | 117.70 | 218.15 | 392.32 | 364.80 |
| 郑稻C42 | S1T30 | 101.97 ^c | 250.17 ^b | 539.61 ^b | 421.12 ^{ab} |
| | S1T40 | 130.38 ^b | 204.16 ^c | 369.65 ^c | 352.52 ^c |
| | S2T30 | 116.15 ^b | 261.25 ^b | 366.99 ^c | 353.00 ^c |
| | S2T40 | 145.25 ^a | 181.41 ^d | 245.62 ^d | 218.19 ^c |
| | 平均值 | 123.44 | 224.25 | 380.47 | 336.21 |

注:同列不同小写字母表示数据间的差异有统计学意义($P < 0.05$)

2.2.2 不同播期下长秧龄对水稻根体积的影响

随着生育时期的推进,相同处理下2个水稻品种根体积总体上呈现出先增加后降低的趋势,抽穗期水稻根体积最大(表3)。在不同播期下延长秧龄,2个水稻品种分蘖期水稻根体积均增加,与T30相比,T40根体积的平均增幅分别为32.2%(新粳优1号)

和16.1%(郑稻C42);但在幼穗分化期、抽穗期及成熟期水稻根体积均显著减小。例如,在抽穗期,与T30相比,T40根体积的平均降幅分别为19.9%(新粳优1号)和11.5%(郑稻C42)。在幼穗分化期后,2个品种根体积均以S2T40处理最小。

表3 不同播期下长秧龄对水稻根体积的影响

| 品种 | 处理 | 分蘖期 | 幼穗分化期 | 抽穗期 | 成熟期 |
|-------|-------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 新粳优1号 | S1T30 | 26.67 ^{cd} | 74.00 ^b | 127.00 ^a | 102.67 ^a |
| | S1T40 | 38.00 ^a | 65.00 ^d | 102.33 ^c | 88.33 ^b |
| | S2T30 | 27.33 ^c | 79.33 ^a | 108.33 ^b | 87.67 ^b |
| | S2T40 | 33.33 ^b | 60.67 ^c | 86.33 ^d | 79.00 ^c |
| | 平均值 | 31.33 | 69.75 | 106.00 | 89.42 |
| 郑稻C42 | S1T30 | 23.00 ^{dc} | 70.00 ^c | 85.67 ^d | 85.33 ^b |
| | S1T40 | 26.33 ^{cd} | 60.33 ^c | 78.67 ^c | 71.00 ^d |
| | S2T30 | 20.67 ^c | 68.67 ^c | 89.33 ^d | 78.33 ^c |
| | S2T40 | 24.33 ^{cd} | 58.33 ^c | 76.00 ^c | 75.00 ^{cd} |
| | 平均值 | 23.58 | 64.33 | 82.42 | 77.42 |

注:同列不同小写字母表示数据间的差异有统计学意义($P < 0.05$)

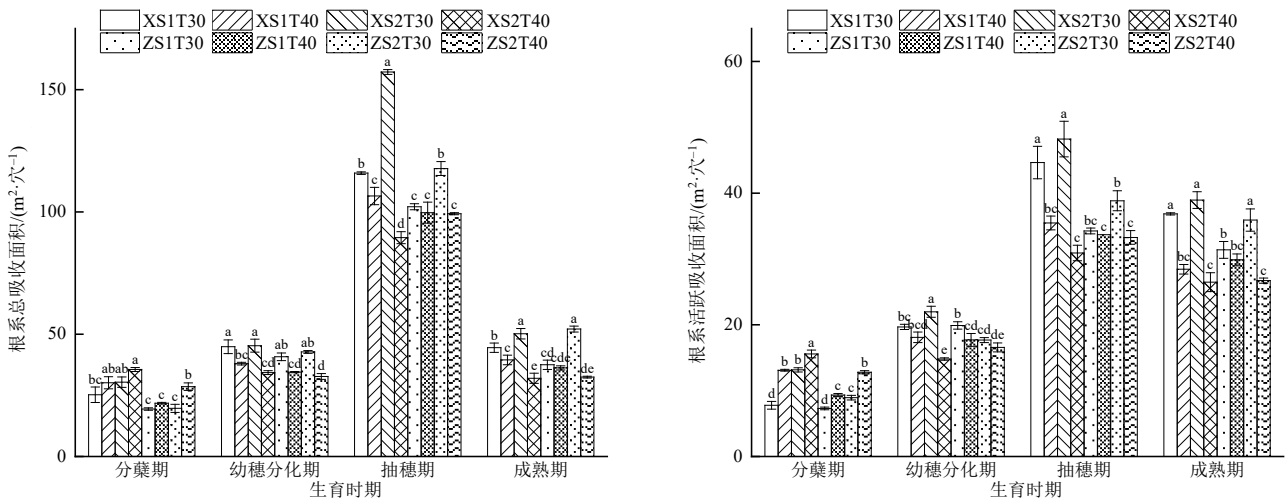
2.2.3 不同播期下长秧龄对水稻根系总吸收面积与活跃吸收面积的影响

随着生育时期的推进,2个水稻品种根系总吸收面积与活跃吸收面积总体上呈现出先增加后降低的趋势,抽穗期水稻根系总吸收面积与活跃吸收面积最大(图1)。在不同播期下延长秧龄,2个水稻品种分

蘖期根系总吸收面积与活跃吸收面积均增加,与T30相比,T40根系总吸收面积、根系活跃吸收面积的平均增幅分别为18.9%、43.3%(新粳优1号)与26.5%、35.6%(郑稻C42);但在幼穗分化期、抽穗期及成熟期,水稻根系总吸收面积与活跃吸收面积均显著降低。例如,在抽穗期,与T30相比,T40根系总吸收

面积、活跃吸收面积的平均降幅分别为30.0%、28.2%(新粳优1号)与32.3%、8.0%(郑稻C42)。自幼穗

分化期起, 2个品种根系总吸收面积与活跃吸收面积均以S2T40处理最低。



X和Z分别表示新粳优1号和郑稻C42; 同一生育时期不同小写字母表示不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图1 不同播期下长秧龄对水稻根系总吸收面积及活跃吸收面积的影响

Fig. 1 Effects of long seedling age on the total absorption area and active absorption area of rice roots under different sowing dates

2.2.4 不同播期下长秧龄对水稻根系氧化力的影响

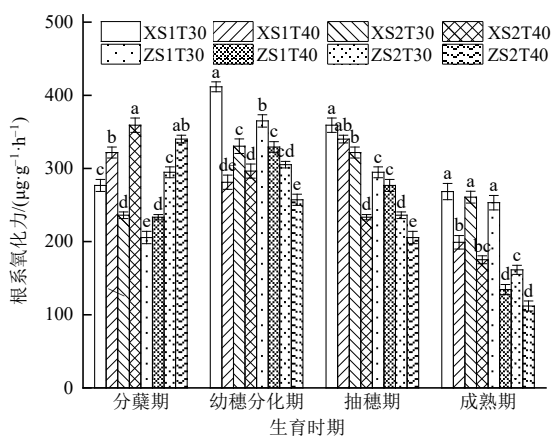
随着生育时期的推进, 2个水稻品种根系氧化力总体上呈现出先增加后降低的趋势, 幼穗分化期水稻整体根系氧化力最强(图2)。在分蘖期时水稻根系氧化力随秧龄的延长而增加, 与T30相比, T40根系氧化力的平均增幅分别为34.2%(新粳优1号)和14.4%(郑稻C42); 但在幼穗分化期、抽穗期及成熟期, 水稻根系氧化力均随秧龄的延长而显著降低。例如, 在抽穗期, 与T30相比, T40根系氧化力的平

均降幅分别为16.4%(新粳优1号)和9.5%(郑稻C42)。自抽穗期起, 2个品种根系氧化力均以S2T40处理最低。

2.3 不同播期下长秧龄对水稻根系伤流液中激素、有机酸含量的影响

2.3.1 不同播期下长秧龄对水稻根系伤流液激素含量的影响

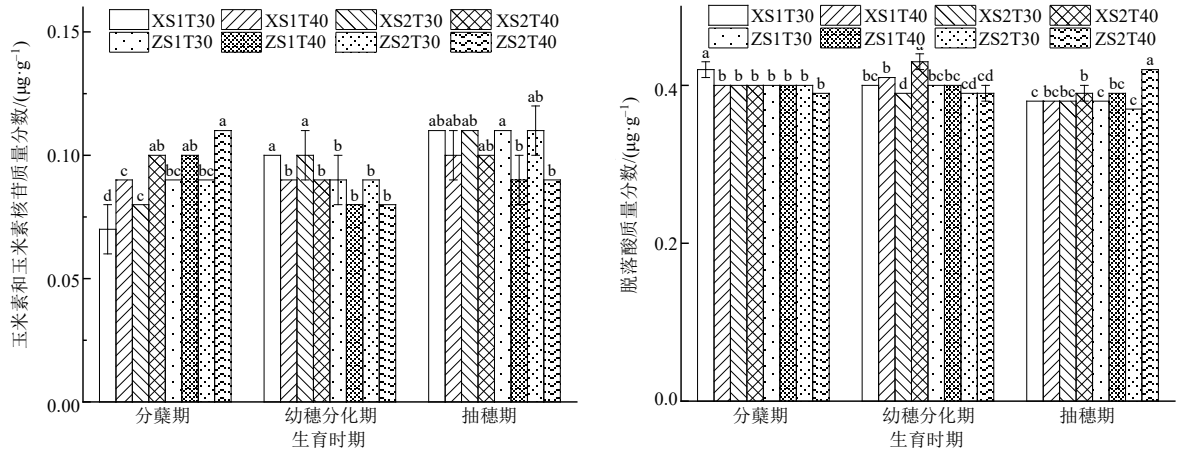
随着秧龄的延长, 分蘖期2个水稻品种根系伤流液中玉米素和玉米素核苷(Z+ZR)含量(质量分数, 下同)总体上呈现出增加的趋势, 在幼穗分化期和抽穗期则均呈现出下降的趋势(图3)。与T30相比, 分蘖期T40处理的Z+ZR含量的平均增幅分别为20.8%(新粳优1号)和15.4%(郑稻C42); 但在幼穗分化期和抽穗期, 长秧龄水稻Z+ZR含量均显著低于短秧龄的。例如, 在抽穗期, 与T30相比, T40处理的Z+ZR含量的平均降幅分别为7.3%(新粳优1号)和15.1%(郑稻C42)。根系伤流液中脱落酸(ABA)含量在分蘖期随播期和秧龄的变化相对较小, 但是2个水稻品种在S2T40下的根系伤流液中ABA含量都低于S1T30的; 而在幼穗分化期和抽穗期, 随着秧龄的延长, 脱落酸含量总体呈现出增加的趋势(图3)。例如, 在抽穗期, 与T30相比, T40处理的根系伤流液中脱落酸含量的平均增幅分别为1.9%(新粳优1号)和7.4%(郑稻C42)。



X和Z分别表示新粳优1号和郑稻C42; 同一生育时期不同小写字母表示不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图2 不同播期下长秧龄对水稻根系氧化力的影响

Fig. 2 Effects of long seedling age on the oxidizing ability of rice roots under different sowing dates



X和Z分别表示新稈优1号和郑稻C42; 同一生育时期不同小写字母表示不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

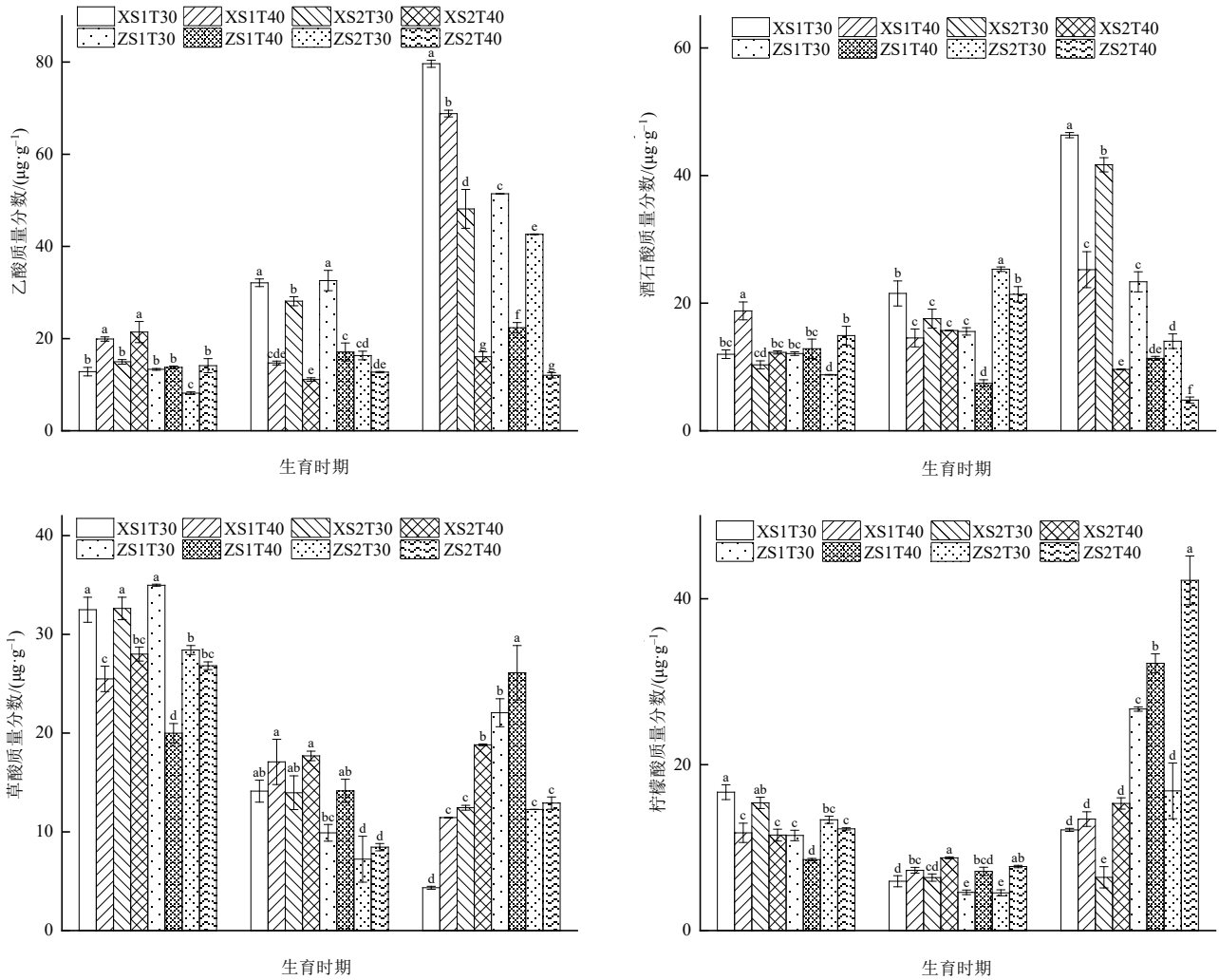
图3 不同播期下长秧龄对水稻根系伤流液中激素含量的影响

Fig. 3 Effects of long seedling age on the hormone content in the bleeding sap of rice roots under different sowing dates

2.3.2 不同播期下长秧龄对水稻根系伤流液中有机酸含量的影响

随着生育时期的推进, 2个水稻品种根系伤流

液中乙酸与酒石酸含量总体上呈现出增加的趋势(图4)。在不同播期下延长秧龄, 分蘖期水稻根系伤流液中乙酸与酒石酸含量均增加; 与T30相比, T40



X和Z分别表示新稈优1号和郑稻C42; 同一生育时期不同小写字母表示不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图4 不同播期下长秧龄对水稻根系伤流液中有机酸含量的影响

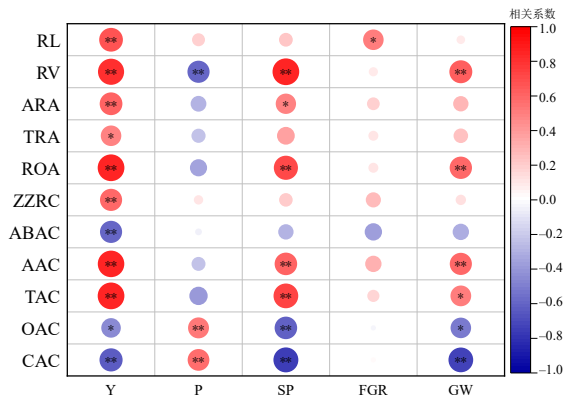
Fig. 4 Effects of long seedling age on the contents of organic acids in the bleeding sap of rice roots under different sowing dates

根系伤流液中乙酸、酒石酸含量的平均增幅分别为49.1%、37.8%(新粳优1号)与38.2%、38.2%(郑稻C42);但在幼穗分化期、抽穗期,水稻根系伤流液中乙酸与酒石酸含量均显著降低。例如,在抽穗期,与T30相比,T40根系伤流液中乙酸、酒石酸含量的平均降幅分别为40.1%、61.2%(新粳优1号)与64.1%、58.6%(郑稻C42)。抽穗期2个品种根系伤流液中乙酸、酒石酸含量均以S2T40处理最低。

随着生育时期的推进,2个水稻品种根系伤流液中草酸与柠檬酸含量总体上均呈现出先降低后增加的趋势(图4)。在不同播期下延长秧龄,分蘖期水稻根系伤流液中草酸与柠檬酸含量均降低,与T30相比,T40根系伤流液中草酸与柠檬酸含量的平均降幅分别为17.9%、27.3%(新粳优1号)与24.2%、16.9%(郑稻C42);但在幼穗分化期和抽穗期,水稻根系伤流液中草酸与柠檬酸含量均显著增加。例如,在抽穗期,与T30相比,T40根系伤流液中草酸与柠檬酸含量的平均增幅分别为107.5%、74.8%(新粳优1号)与11.8%、85.7%(郑稻C42)。

2.4 不同播期下长秧龄水稻抽穗期根系特性与产量之间的关系

由图5可知,水稻抽穗期根长、根体积、根系活跃吸收面积、根系总吸收面积、根系氧化力以及



RL表示根长;RV表示根体积;ARA表示根系活跃吸收面积;TRA表示根系总吸收面积;ROA表示根系氧化力;ZZRC表示根系伤流液中玉米素和玉米素核苷含量;ABAC表示根系伤流液中脱落酸含量;AAC表示根系伤流液中乙酸含量;TAC表示根系伤流液中酒石酸含量;OAC表示根系伤流液中草酸含量;CAC表示根系伤流液中柠檬酸含量;Y表示产量;P表示每盆穗数;SP表示每穗粒数;FGR表示结实率;GW表示千粒质量;负值表示2个变量呈负相关。*和**分别表示2个变量之间呈显著或极显著相关($P \leq 0.05$ 、 $P \leq 0.01$)。

图5 不同播期下长秧龄水稻抽穗期根系特性与产量之间的关系

Fig. 5 Relationships between root characteristics at heading stage and yield of rice with long seedling age under different sowing dates

根系伤流液中Z+ZR含量、乙酸含量和酒石酸含量均与产量呈显著或极显著正相关关系,根系伤流液中ABA含量、草酸含量以及柠檬酸含量均与产量呈显著或极显著负相关关系;每盆穗数与根体积呈极显著负相关关系,与根系伤流液中的草酸、柠檬酸含量呈极显著正相关关系;每穗粒数及千粒质量与根体积、根系活跃吸收面积(千粒质量除外)、根系伤流液中的乙酸和酒石酸含量均呈显著或极显著正相关关系,与草酸和柠檬酸含量均呈极显著负相关关系;结实率与根长呈极显著正相关关系。

3 讨论

3.1 不同播期下长秧龄对水稻产量及其产量构成因素的影响

调整水稻的播种时期,能够有效改变其在生长发育过程中所面临的气候环境条件,对于充分挖掘和利用自然资源、精准调控水稻生育进程、显著提升水稻产量与品质等都有着至关重要的意义^[21]。将播种时间推迟,水稻的生长周期会逐步缩短,其生长量也会随之降低,最终导致水稻的每穗粒数减少^[22]。本研究中,在相同秧龄下,播期推迟,2个品种水稻每穗粒数及结实率均呈下降趋势,这与文献^[22]结果相符。王柯凝等^[23]认为,随着水稻播种日期向后推移,结实率及千粒质量呈现出较为明显的降低趋势。分析其原因,一是生育期推迟后水稻生长发育期间温光资源匹配不足,易导致灌浆受阻,表现为结实率降低,进而制约产量提升^[21];二是推迟播种使水稻各器官间物质转运受阻,转运量、转运率显著下降,每穗粒数减少,最终导致水稻产量降低^[4]。而钱门万^[24]研究表明,随着播期推迟,水稻产量呈现出先增长后下降的趋势,同时千粒质量和有效穗数也呈现出了不同程度的变化,这可能是区域气候特征、供试水稻品种及田间管理措施差异等多种因素综合作用的结果。因此,推迟播期不利于产量构成因子的形成,进而影响水稻产量。

秧龄显著影响水稻秧苗素质,进而影响大田初始群体的建立以及生育时期的变化,最终影响水稻产量和品质^[25]。黎银忠等^[26]研究认为,伴随着水稻秧龄的不断延长,其产量会呈现出降低的趋势。沈建辉等^[27]认为,随着秧龄的逐步延长,水稻群体的总茎蘖数量会减少,进而使得群体的总穗数、每穗

的总粒数以及结实率均下降。本研究结果表明,在播期相同、秧龄延长的条件下,新粳优1号的每穗粒数和结实率呈显著降低趋势,进而导致产量的降低;郑稻C42的每盆穗数、结实率、千粒质量与产量均呈显著降低趋势。而贾旋等^[28]认为,随着秧龄的延长,有利于培育长秧龄大苗壮秧,提高秧苗素质,使产量呈上升趋势。但是当秧龄过大时,秧苗素质会明显下降,移栽过程中,秧苗植伤情况会比较严重,使得插秧后的成活概率降低,分蘖能力也被削弱。这会对成穗率、有效穗数以及每穗粒数产生负面影响,最终导致产量减少^[25]。

3.2 不同播期下长秧龄对水稻根系形态生理特征的影响

水稻的高产优质是地下部与地上部协同作用的结果,地上部生长及产量形成均受根系形态和生理特性的影响^[29]。杨波等^[30]认为,播期对水稻根系干物质质量、根系活力有显著影响,相较于迟播,早播有利于干物质的合理分配,可增强根系抗衰能力,促进水稻地上部分生长,提升水稻的物质生产能力与产量。曾红丽^[17]则认为,随着播期的推迟,水稻的总根长、总根体积及总根表面积均呈现出增加的趋势。本研究结果显示,在相同秧龄下,播期推迟,新粳优1号各生育期的根长均呈下降趋势,抽穗期根体积、根系氧化力、根系总吸收面积亦呈下降趋势;郑稻C42抽穗期根长、根系总吸收面积、根系氧化力均呈下降趋势。这是因为水稻播期的推迟通常意味着水稻生长季节的温度条件发生变化,播期推迟可能导致水稻生育后期遭遇较低的温度。低温会抑制根系的细胞分裂和伸长,进而影响根长、根体积和根表面积^[31]。由此可见,在相同秧龄下,播期推迟会导致水稻生育后期根系发育受到限制,从而使产量降低。

李应洪等^[32-33]研究表明,秧龄对移栽期和成熟期的根系干质量以及移栽期的根冠比都产生了极其显著的影响。在拔节到成熟期这一阶段,25 d秧龄的水稻根系干质量均大于40 d秧龄的水稻根系干质量,且随着秧龄延长,根系活力呈下降趋势。本研究结果显示,在相同播期下,秧龄延长,2个水稻品种分蘖期的根长、根体积、根系活跃吸收面积、根系总吸收面积、根系氧化力均呈增加趋势。这可能是因为秧龄延长为根系提供了更多的生长时间,促进了

根系的伸长和分枝,进而提高了分蘖期的根系生长能力^[34]。在幼穗分化期、抽穗期与成熟期,各指标的变化趋势均与分蘖期的趋势相反。这表明随着秧龄延长,不利于水稻植株对氮、磷、钾等关键营养成分的吸收^[35]。根系在养分吸收过程中面临更大的竞争压力,导致根系生长受限^[32]。以上研究表明,秧龄延长不利于水稻后期生理形态发育。

3.3 不同播期下长秧龄对水稻根系伤流液中激素、有机酸的影响

内源激素是调控作物生长发育的关键要素之一,在作物的生长发育过程中发挥着重要调控作用。ZR常被视作生长促进类激素,能够推动作物节间的伸长,助力籽粒的灌浆过程,延缓叶绿素的降解速度^[36]。ABA属于典型的逆境激素,具备协调作物体内代谢活动的的能力。然而,当ABA在作物体内的含量过高时,会使作物器官的衰老进程加快,进而降低籽粒产量^[37]。唐杰等^[38]认为,在镉胁迫下,水稻分泌物中的有机酸含量增加。有研究显示,早播玉米叶片中的有机酸含量高于晚播玉米的^[39]。本研究结果表明,在同一秧龄下,随着播期的推迟,幼穗分化期水稻根系伤流液中乙酸、酒石酸含量均呈下降趋势,抽穗期草酸、柠檬酸含量均呈增加趋势。郑稻C42抽穗期水稻根系伤流液中乙酸、酒石酸含量均呈下降趋势,柠檬酸含量呈增加趋势。在同一播期下,随着秧龄的增加,分蘖期2个水稻品种根系分泌物中Z+ZR、乙酸、酒石酸含量均呈增加趋势,幼穗分化期、抽穗期则均呈下降趋势,ABA、草酸、柠檬酸含量的变化趋势则与之相反。产生上述现象的原因可能如下:一是与水稻根系活力有关,徐国伟等^[40]研究表明根系活力增强,有助于水稻根系有机酸的合成;二是与生育期温度有关,在不同播期和秧龄下,水稻各生育时期的温度不同,当温度处于适宜范围内时,大多数植物根系分泌物的释放量随温度升高而增加,且环境温度升高还会改变分泌物组成^[41]。

3.4 长秧龄下水稻根系特性与产量之间的关系

水稻的根系特性与其产量之间存在紧密联系。叶旭波等^[11]研究表明,灌浆期宁粳43号根干质量、根长、根体积、根表面积与产量呈极显著正相关关系。宋英等^[42]研究表明水稻干物质质量、根系氧化

力与产量呈正相关关系。本研究结果表明,水稻抽穗期根长、根体积、根系活跃吸收面积、根系总吸收面积、根系氧化力与产量呈现显著或极显著正相关关系。根系是作物吸收养分和水分的主要器官,同时也是关键的代谢器官,其活力直接影响地上部分的生长、发育以及最终产量的形成。根系氧化能力下降会削弱水稻吸收养分的能力,导致地上部分养分供应不足,抑制其生长发育,最终影响产量^[42]。

宋英等^[42]研究表明,水稻Z+ZR含量与产量呈极显著正相关关系,ABA含量与产量呈极显著负相关关系。赵黎明等^[13]认为,水稻每穗粒数、每穗粒重、结实率与籽粒中Z+ZR含量呈正相关,与ABA含量呈负相关。本研究结果显示,水稻根系伤流液中Z+ZR含量与产量呈极显著正相关关系,而ABA含量与产量呈极显著负相关关系。这是因为,Z+ZR主要在根系中合成并转运至籽粒,对胚乳发育起重要调控作用,对充实籽粒产生影响^[43]。任维晨^[14]研究表明,在水稻穗分化始期,根系分泌物中的乙酸、酒石酸、柠檬酸含量与产量呈正相关关系。陈璐^[44]研究表明,随着水稻品种的演进,孕穗期和抽穗期根系分泌物中的乙酸浓度显著提高,酒石酸、柠檬酸浓度显著下降。本研究结果表明,水稻根系伤流液中乙酸、酒石酸含量与产量呈极显著正相关关系;草酸、柠檬酸含量与产量呈极显著负相关关系。有机酸是植物碳氮代谢的重要产物之一,其中乙酸作为三羧酸循环的中间产物,其含量较高时可促进根系发育,增强根系活力,并提高养分吸收能力。因此,根系分泌物中较高的乙酸含量是水稻高产的重要生理原因之一^[14]。

4 结论

在不同播期下延长秧龄均导致新粳优1号和郑稻C42这2个品种产量降低,且迟播下的长秧龄产量最低。随着秧龄延长,水稻根长、根体积、根系活跃面积、根系总吸收面积、根系氧化力以及根系伤流液中的玉米素和玉米素核苷、酒石酸与乙酸含量均呈现出降低的趋势,且抽穗期的上述根系指标与产量呈显著或极显著正相关关系。因此,改善水稻根系生长状况是提高长秧龄水稻产量的一个重要途径。

参考文献:

- [1] 许轲,孙圳,霍中洋,等.播期、品种类型对水稻产量、生育期及温光利用的影响[J].中国农业科学,2013,46(20):4222-4233.
- [2] ABOU KHALIFA, A A B. Physiological evaluation of some hybrid rice varieties under different sowing dates[J]. Australian Journal of Crop Science, 2009, 3(3): 178-183.
- [3] CHEN C, HUANG J L, ZHU L Y, et al. Varietal difference in the response of rice chalkiness to temperature during ripening phase across different sowing dates[J]. Field Crops Research, 2013, 151: 85-91.
- [4] 孙琪,耿艳秋,金峰,等.播期对直播水稻产量、花后各器官干物质和氮素积累及转运的影响[J].作物杂志,2020(5):119-126.
- [5] 葛茜,张万春,周子凡,等.不同播期和秧龄对机插秧全生育期及产量形成的影响[J].陕西农业科学,2023,69(4):54-57.
- [6] 葛梦婕,周冬冬,方书亮,等.淮北地区钵苗机插偏迟熟软米粳稻产量形成和品质特征[J].江苏农业科学,2021,49(24):95-99.
- [7] 马均,孙永健,苟永成,等.杂交稻钵形毯状育秧机插不同播种密度与秧龄研究[J].中国稻米,2011,17(3):11-14.
- [8] 贾现文,朱起超,杨志远,等.移栽秧龄对机插杂交稻产量及群体质量的影响[J].农业工程学报,2014,30(12):18-25.
- [9] LI X, YAO T X, HUANG X X, et al. Biochar increases rice yield by improving root morphological and root physiological functions in heavily saline-sodic paddy soil of Northeast China[J]. BioResources, 2022, 17(1): 1241-1256.
- [10] LIU Y Y, HE C Y, GAI D S, et al. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth and grain yield in direct-seeded rice in northeastern China[J]. Crop & Pasture Science, 2022, 73(11): 1229-1244.
- [11] 叶旭波,冶会锋,马童杰,等.不同旱直播方式对水稻根系形态特征及产量的影响[J].东北农业科学,2024,49(3):5-12.
- [12] 徐冉,胡倩,褚光,等.稻田增氧对水稻根系形态生理特征的影响[J].中国稻米,2022,28(3):1-5.
- [13] 赵黎明,段绍彪,项洪涛,等.干湿交替灌溉与植物生长调节剂对水稻光合特性及内源激素的影响[J].作物学报,2025,51(1):174-188.
- [14] 任维晨.控释氮肥运筹对水稻产量和氮肥利用率的影响及其机制[D].扬州:扬州大学,2023.
- [15] 马义虎,何贤彪,朱练峰,等.播期对浙东南地区直播晚粳稻产量、生育期及温光利用的影响[J].核农学

- 报, 2022, 36(12): 2462–2473.
- [16] XIN S R, WANG F X, BIAN W F, et al. Effects of sowing date and sowing rate on yield of rice developed from seedlings dry-raised in aperture disk[J]. *Agricultural Biotechnology*, 2024, 13(6): 9–11.
- [17] 曾红丽. 不同播期和剪根处理对水稻返青期根系形态、产量和品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023.
- [18] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 61–62.
- [19] 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[J]. *草业学报*, 2025, 34(2): 163–173.
- [20] HOU D P, LIU K, LIU S K, et al. Enhancing root physiology for increased yield in water-saving and drought-resistance rice with optimal irrigation and nitrogen[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1370297.
- [21] 李阳, 程建平, 赵锋, 等. 不同播期及秧龄对机械栽插晚稻产量形成的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2016, 35(6): 52–57.
- [22] ZHOU W T, YAN L L, FU Z Q, et al. Increasing planting density and reducing N application improves yield and grain filling at two sowing dates in double-cropping rice systems[J]. *Plants*, 2023, 12(12): 2298.
- [23] 王柯凝. 不同播期与密度对水稻“兴粳6号”生长发育的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [24] 钱门万. 不同播期与移栽密度对皖垦糯2号机插产量及产量构成的影响[J]. *安徽农学通报*, 2024, 30(8): 14–17.
- [25] LAMPAYAN R M, FARONILO J E, TUONG T P, et al. Effects of seedbed management and delayed transplanting of rice seedlings on crop performance, grain yield, and water productivity[J]. *Field Crops Research*, 2015, 183: 303–314.
- [26] 黎银忠, 方友斌, 苗晓杰, 等. 不同秧龄对晚稻产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(10): 2885–2886.
- [27] 沈建辉, 邵文娟, 张祖建, 等. 水稻机插中苗双膜育秧落谷密度对苗质和产量影响的研究[J]. *作物学报*, 2004, 30(9): 906–911.
- [28] 贾旋, 宋建农, 王继承, 等. 秧龄和基土比对机插大钵体毯状苗晚稻群体质量和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 1–11.
- [29] 李帅, 刘昆, 李思宇, 等. 直播方式对水稻根系形态生理和产量影响的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(24): 11–16.
- [30] 杨波, 徐波, 王宝祥, 等. 播期对黄淮直播稻根系抗倒能力的影响[J]. *江西农业学报*, 2019, 31(2): 1–7.
- [31] 王英隆, 曾俊普, 易佳鸿, 等. 温度对不同品种水稻幼苗镉吸收生理响应及转录组分析[J]. *种子*, 2025, 44(1): 56–65, 71.
- [32] 李应洪, 孙永健, 李玥, 等. 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻根系生长及氮素利用特征的影响[J]. *中国水稻科学*, 2017, 31(6): 599–610.
- [33] 李应洪, 王海月, 严奉君, 等. 剪根处理对不同秧龄杂交稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2016, 30(6): 626–636.
- [34] 孙建荣, 王启琛, 章海坡, 等. 播量及秧土对杂交水稻制种父本机插长秧龄秧苗素质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(24): 33–35.
- [35] 彭福燕. 播期和秧龄对晚粳养分和光温资源利用以及产量和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [36] BASUNIA M A, NONHEBEL H M. Hormonal regulation of cereal endosperm development with a focus on rice (*Oryza sativa*)[J]. *Functional Plant Biology*, 2019, 46(6): 493–506.
- [37] ZHANG X F, TONG J H, BAI A N, et al. Phytohormone dynamics in developing endosperm influence rice grain shape and quality[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2020, 62(10): 1625–1637.
- [38] 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[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(2): 118–124.
- [39] LAMARI N, ZHENDRE V, URRUTIA M, et al. Metabotyping of 30 maize hybrids under early-sowing conditions reveals potential marker-metabolites for breeding[J]. *Metabolomics*, 2018, 14(10): 132.
- [40] 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.
- [41] XIONG L, LIU X Y, VINCI G, et al. Molecular changes of soil organic matter induced by root exudates in a rice paddy under CO₂ enrichment and warming of canopy air[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 137: 107544.
- [42] 宋英, 董明辉, 顾俊荣. 稗草对机械穴直播水稻产量的影响及其生理机制[J]. *杂草学报*, 2024, 42(1): 31–37.
- [43] 杨建昌, 仇明, 王志琴, 等. 水稻发育胚乳中细胞增殖与细胞分裂素含量的关系[J]. *作物学报*, 2004, 30(1): 11–17.
- [44] 陈璐. 中粳品种演进对水稻产量、根系形态生理和稻田甲烷排放的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.

责任编辑: 伍锦花

英文编辑: 张承平