

种植模式对水稻根系分布与氮素吸收的影响

何椿禹, 刘月月, 邵玺文, 郭丽颖, 滕宇, 杜娟, 耿艳秋*

(吉林农业大学, 长春 130118)

摘要: 【目的】探究种植模式对水稻的根系特性、氮素吸收和产量的影响。【方法】以水稻为供试材料, 设置移栽淹灌(TFR)、早直播淹灌(DDSF)和早直播干湿交替灌溉(DDSA)3种植植模式, 研究不同种植模式下水稻0~20 cm 土层根系形态、根系生理、氮素吸收量和产量及其相互关系。【结果】①在主要生育期, 直播模式较移栽模式增加了根干物质量、根直径和0~10 cm 土层根分布, 减少了10~20 cm 土层根系分布; DDSA处理增加了早直播稻的根干物质量、根直径、0~10 cm 土层根分布, 减少了10~20 cm 土层根分布; ②在幼穗分化后期, 直播模式降低了根系活力等指标; DDSA处理增加早直播稻的根系活力等指标。③各处理抽穗期和成熟期的总氮素积累量、花后氮素吸收量和产量表现为: TFR处理>DDSA处理>DDSF处理。移栽模式较直播模式有更深的根系分布和相对较高的根系活力, 是其氮素积累量多和产量高的主要原因; 早直播干湿交替灌溉模式增加早直播稻的深层土壤根系分布, 提升了根系活力, 进而促进了氮素吸收, 提高了产量。【结论】综上所述, 早直播干湿交替灌溉有望提高早直播水稻氮素利用效率及产量。

关键词: 水稻; 种植模式; 根系分布; 氮素积累; 伤流液组分; 产量

中图分类号: S511

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023080

OSID:



何椿禹, 刘月月, 邵玺文, 等. 种植模式对水稻根系分布与氮素吸收的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 58-66, 82.

HE Chunyu, LIU Yueyue, SHAO Xiwen, et al. Effects of Planting Method on Root Growth and Nitrogen Uptake of Rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 58-66, 82.

0 引言

【研究意义】我国目前正面临着劳动力减少和水资源匮乏的双重难题, 粮食安全问题愈演愈烈, 减少劳动力用量、减轻劳动强度和高效利用水资源的直播等轻简化水稻种植模式逐渐受到重视, 发展潜力巨大^[1-2]。根系是作物吸收水分和养分的重要器官, 对作物有支持、固定和保护的作用。根系形态及生理特性, 对其发育有极大的影响^[3-4]。研究高产高效种植模式下水稻的根系生理活性和形态特性变化与氮素及产量的关系, 将为水稻种植模式的科学选用以及高产高效栽培提供理论依据^[5-6]。【研究进展】根系质量及分布、根系吸收面积、根系伤流液及伤流中物质含量等被认为是衡量根系强弱的重要根系形态和生理指标^[7]。根系形态及生理特性与水分、养分吸收利用关系密切, 受土壤水分、养分、通气性等因素的影响。高产高效水稻根系特征研究的热点^[8-13]。陶冶^[14]研究表明, 移栽稻较直播稻根系分布深、直径大、群体根数少, 早直播淹水灌

溉的0~15 cm土层根长减少了25%左右, 15~30 cm土层根长减少了45%左右。Uddin等^[15]研究表明, 直播稻的根长密度和生物量可以达到甚至超过移栽稻。徐国伟等^[16-17]、付景等^[18]研究发现, 在全生育期进行轻度干湿交替灌溉(土壤水势不低于-20 kPa), 水稻根系生理形态特性得到了显著提升, 而重度干湿交替灌溉(土壤水势不低于-40 kPa)则显著下降; 霍中洋等^[19]认为, 移栽稻抽穗期和成熟期植株氮积累量高于直播稻; 曹小闯等^[20]研究表明, 干湿交替灌溉较常规淹灌水稻氮素吸收、利用效率提高; 高冬梅^[21]研究表明, 轻干湿交替灌溉下水稻产量与常规灌溉模式差异不显著, 中干湿交替灌溉、重干湿交替灌溉、旱作管理的水稻产量显著低于常规灌溉模式; 许更文^[22]研究表明, 与常规灌溉模式相比, 轻干湿交替灌溉能够增加水稻籽粒产量, 水稻结实率和千粒质量均增加, 水稻增产幅度达6.7%~18.6%。【切入点】前人^[23-26]研究多集中在水稻生长特性上, 而对高产高效种植模式对水稻根系分布、生理活性和形态特性的影响尚不清晰, 这些变化与氮素积累及产量的关系有待深入研究。【拟解决的关键问题】为此, 通过研究3种植植模式水稻根系和氮素吸收特性, 阐明根系形态、生理特性与氮素吸收的关系及其对种植模式的响应, 以期水稻种植模式的科学选用以及高产高效栽培提供理论依据。

收稿日期: 2023-03-06 修回日期: 2023-06-28 网络出版日期: 2023-11-13

基金项目: 吉林省重点研发项目(20220202018NC)

作者简介: 何椿禹(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事作物优质高产高效理论与技术研究。E-mail: h17843096610@163.com

通信作者: 耿艳秋, 教授, 硕士生导师, 主要从事作物优质高产高效理论与技术研究。E-mail: ccgyq@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方 法

1.1 试验材料与地点

试验于 2021—2022 年在吉林省长春市吉林农业大学生物防治所盆栽场 (E 125°21', N 43°52') 进行。试验地属于温带大陆性半湿润季风气候, 日照时间 2 685 h, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温为 2 840~3 040 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期达 145~150 d。盆规格: 直径 35 cm, 高 30 cm, 每盆装土 15 kg。土壤为自然黑土, 土壤有机质量为 24.05 mg/kg, 有效磷量为 31.14 mg/kg, 速效钾量为 96.37 mg/kg, 碱解氮量为 45.77 mg/kg。供试水稻品种为吉玉粳 (中熟品种, 生育期 135 d, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温需 2 750 $^{\circ}\text{C}$ 。株高 95~100 cm, 穗较大, 平均每穗粒数 100 粒, 谷粒椭圆形, 颖及颖尖均为黄色、无芒, 稻谷千粒质量 25 g 左右)。

1.2 试验设计

试验为随机区组设计, 设置 3 种植模式: 移栽淹灌 (TFR)、旱直播淹灌 (DDSF) 和旱直播干湿交替灌溉 (DDSA), 每个处理 50 盆, 共 150 盆。

移栽淹灌模式 (TFR): 移栽前盆中灌水搅拌均匀成泥浆状态, 5 月中旬 (3 叶 1 心) 移栽, 每盆 3 穴, 每穴 3 株。移栽后至收获前 1 周保持 3 cm 水层。

旱直播淹灌模式 (DDSF): 播种前疏松盆中土壤, 将包衣种子、浸种, 5 月初进行, 每盆 3 点, 每点 10 粒, 播种后立即覆盖松散土壤并进行灌溉, 在 3 叶期前保持土壤湿润, 从 3 叶期至最终收获前 1 周保持 3 cm 的水层。

旱直播干湿交替灌溉模式 (DDSA): 播种和 3 叶期前管理与旱直播水层灌溉相同, 3 叶期后进行干湿交替灌溉, 在土壤水势 $\leq -15\text{ kPa}$ 时进行灌溉 (每次灌水时水淹没土面 2~3 cm)。

各种种植模式的肥料使用量相同, 大田用量为尿素 150 kg/hm²、过磷酸钙 75 kg/hm² 和氯化钾 75 kg/hm², 具体盆栽用量为尿素 2.935 g/盆, 过磷酸钙 5.625 g/盆, 氧化钾 1.35 g/盆。在所有处理中, 氮肥作为基肥 (40%)、分蘖肥 (30%) 和穗肥 (30%) 施用; 磷肥只作为基肥施用; 钾肥作为基肥 (50%) 和穗肥 (50%) 施用。

1.3 测定项目与方法

分别于分蘖中期、幼穗分化期、抽穗期和成熟期, 选择代表性植株, 根据各处理平均茎蘖数选取, 每个处理 3 次重复, 测定以下指标。

1.3.1 根系形态指标的测定

将土块取出, 将 0~10、10~15、15~20 cm 土层土块分别装于孔径 0.212 mm 的筛网带中, 用流水缓慢冲洗, 最后用水枪冲洗干净。用扫描仪 (Epson

Expression 1680 Scanner, Seiko Epson Corp., Tokyo, Japan) 扫描根系形态, 采用 Win RHIZO 根系分析系统 (Regent Instruments Inc., Quebec, Canada) 进行分析^[10], 获得根长、根表面积和根直径等参数。然后将鲜根及地上部置于烘箱内 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量, 称量根系干质量和地上部干质量, 计算根冠比。

1.3.2 根系伤流液的收集与测定

18:00 在茎基部离土表约 12 cm 处剪去水稻地上部分, 将预先称质量的脱脂棉放置在每个被剪断的茎顶部, 并用聚乙烯薄片覆盖。于次日 06:00 采集脱脂棉, 根据脱脂棉质量的增加估算根伤流量。并将脱脂棉吸取的伤流液挤出于 10 mL 离心管中, -30 $^{\circ}\text{C}$ 保存用于伤流液组分的测定^[27]。伤流液中蛋白质质量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[28], 氨基酸测定采用水合茚三酮显色法^[29]。

1.3.3 水稻根系吸收面积的测定

采用甲烯蓝法测定水稻根系总吸收面积和活跃吸收面积。

1.3.4 地上部氮素积累量测定

将各时期烘干后的样品用粉碎机粉碎, H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 用蛋白质分析仪 (Elementar Trading Co, Ltd, Germany) 测定各部分氮素质量浓度, 并根据相应干质量计算地上部氮素积累量^[30]。

1.3.5 水稻产量及其构成因素的测定

水稻成熟后每个处理取 3 盆考种测产。测定项目主要为每穴有效穗数、穗粒数、千粒质量等。

1.4 数据处理与分析

所有数据用 Microsoft Excel 2020 和 SPSS 软件进行处理与统计分析, 图中同一生育期标注不同字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; 表格中同一列同一年份内不同字母表示该指标在 $P < 0.05$ 水平差异显著; 相关性分析表中*和**分别代表在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。数据用平均值 \pm 标准误表示。

2 结果与分析

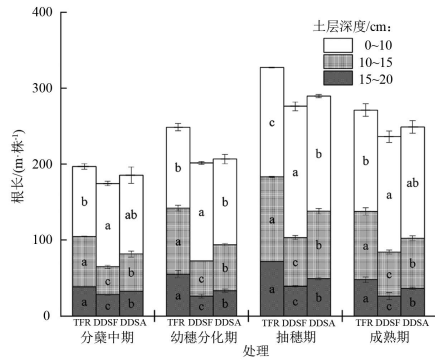
2.1 种植模式对水稻根系特征的影响

2.1.1 种植模式对水稻根系空间分布的影响

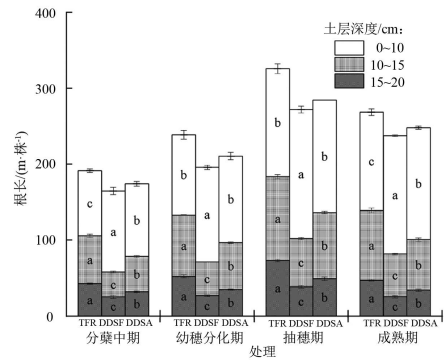
由图 1 可知, 随着生育进程的推进, 水稻总根长呈先上升再下降的趋势, 抽穗期达到最大值, 不同种植模式间表现为 TFR 处理 > DDSA 处理 > DDSF 处理。0~10 cm 土层中, 与 TFR 处理相比, 直播模式 (DDSF、DDSA 处理) 根长增加, 如在幼穗分化期, 直播模式根长增加 6.3%~21.3%; 在直播模式中, 与 DDSF 处理相比, DDSA 处理的根长降

低，如在幼穗分化期，DDSA 处理根长降低 9.4%~14.1%。不同种植模式 10~20 cm 土层根长在主

要生育期均表现为 TFR 处理>DDSA 处理>DDSF 处理，且 3 个处理间差异显著。



(a) 2021 年



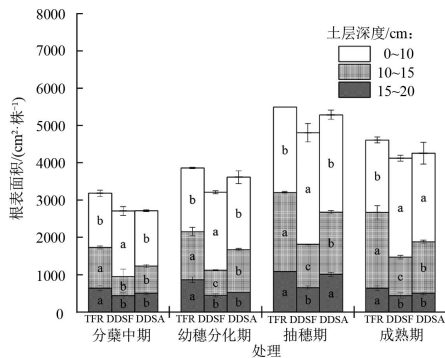
(b) 2022 年

图 1 各处理水稻不同生育期的根长

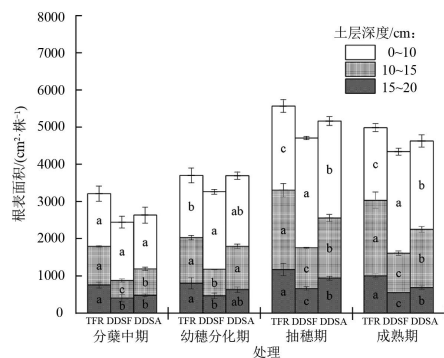
Fig.1 Root length of rice at different fertility periods under different treatments

由图 2 可知，不同种植模式下根表面积与根长变化趋势一致。与 TFR 处理相比，直播模式（DDSF、DDSA 处理）0~10 cm 土层根表面积降低，这在抽穗后表现得较为明显；在抽穗期和成熟期，直播模式根表面积分别增加 13.7%~30.6% 和 21.8%~39.7%；在直播模式中，与 DDSF 处理相比，

抽穗期和成熟期 DDSA 处理 0~10 cm 土层根表面积分别降低 13.4%~14.9%和 11.7%~14.7%。不同种植模式 10~20 cm 土层根表面积在主要生育期均表现为 TFR 处理>DDSA 处理>DDSF 处理，且移栽模式与直播模式差异显著。



(a) 2021 年



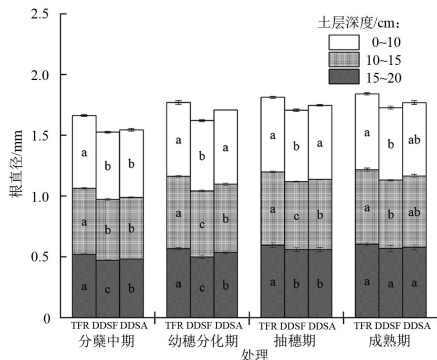
(b) 2022 年

图 2 各处理水稻不同生育期根表面积

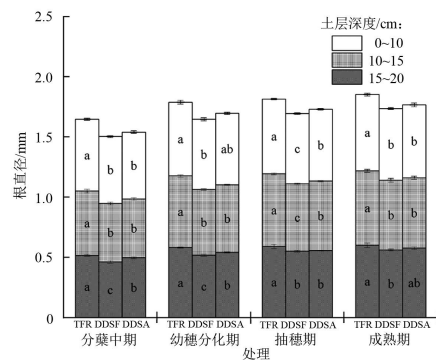
Fig.2 Root surface of rice at different fertility periods under different treatments

由图 3 可知，随着生育期推进，水稻根直径呈上升趋势，且随着土层深度增加根直径逐渐减小。同一土层深度下，种植模式对根直径影响显著，表现为 TFR 处理>DDSA 处理>DDSF 处理。分蘖中

期，TFR 处理 0~10 cm 土层根直径较直播模式显著增加 7.2%~8.6%；幼穗分化期后，与 DDSF 处理相比，DDSA 处理 0~20 cm 土层根直径增加。



(a) 2021 年



(b) 2022 年

图 3 各处理水稻不同生育期的根直径

Fig.3 Root surface of rice at different fertility periods under different treatments

2.1.2 种植模式对水稻根系干质量和根冠比的影响

由图 4 可知，同一种植模式下水稻总根干质量随生育进程的推进呈先上升再下降的趋势，在抽穗期达到最大值。不同种植模式水稻 0~10 cm 土层根干质量表现为 DDSF 处理>DDSA 处理>TFR 处理，

在幼穗分化期后移栽模式和直播模式（DDSF、DDSA 处理）水稻根干质量差异显著。不同种植模式水稻 10~20 cm 土层根干质量表现为 TFR 处理>DDSA 处理>DDSF 处理，在幼穗分化期和抽穗期 3 个处理之间差异显著。

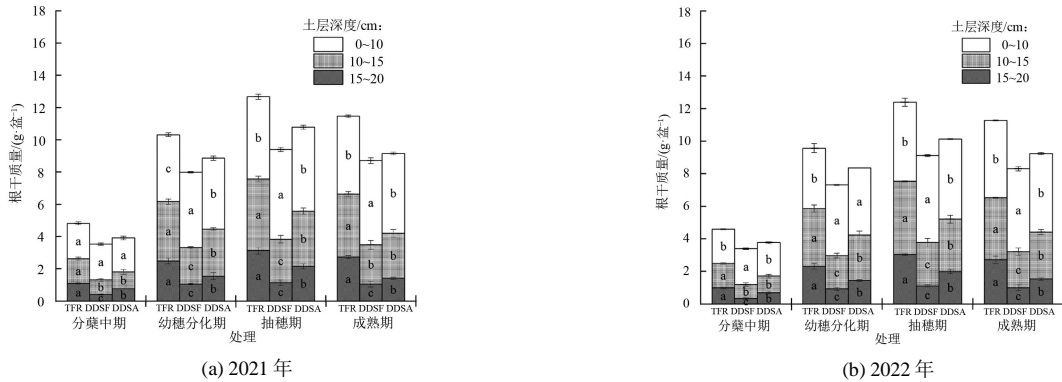


图 4 各处理水稻不同生育期根干质量

Fig.4 Root dry weight of rice at different fertility periods under different treatments

随着生育进程推进，水稻根冠比逐渐降低（图 5）。在主要生育期内移栽模式（TFR 处理）水稻的根冠比高于直播模式（DDSF、DDSA 处理）。与

DDSF 处理相比，DDSA 处理水稻根冠比增加，这在幼穗分化后表现得较为明显。

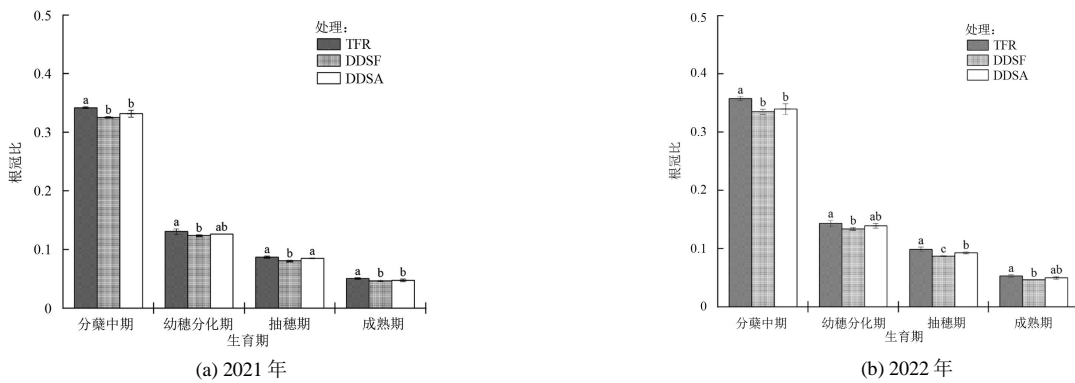


图 5 各处理水稻不同生育期根冠比

Fig.5 Root-shoot ratio of rice at different fertility periods under different treatments

2.1.3 种植模式对水稻根系生理特性的影响

随着生育进程推进，水稻根系伤流量先增加后降低，在抽穗期达到峰值（图 6）。由图 6 可知，在分蘖中期 3 种植模式的伤流量无显著差异，抽穗期和成熟期 TFR 处理和 DDSA 处理水稻根系伤流量显著高于 DDSF 处理。2022 年，幼穗分化期 TFR 处

理和 DDSA 处理下根系伤流量显著高于 DDSF 处理。由此可见，移栽模式在分蘖中期之后根系伤流量要高于直播模式（DDSF、DDSA 处理），且与 DDSF 处理相比，抽穗期和成熟期 DDSA 处理的根系伤流量显著增加。

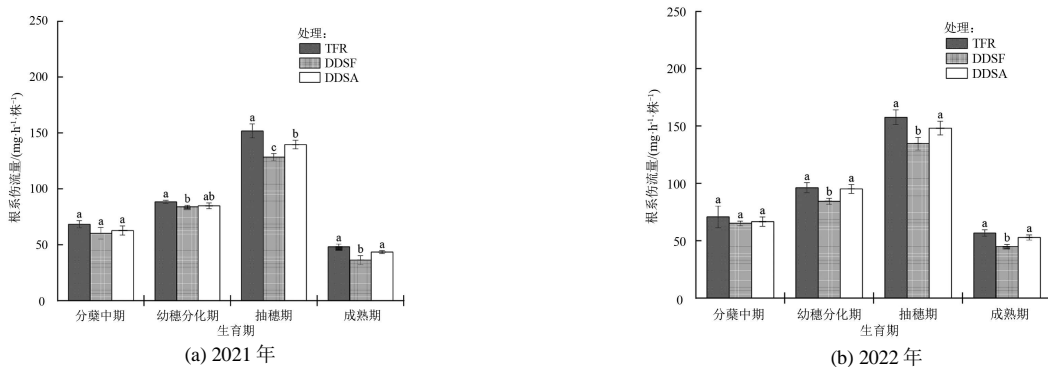
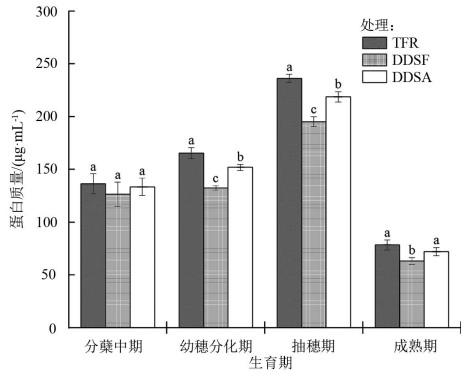


图 6 各处理水稻不同生育期根系伤流量

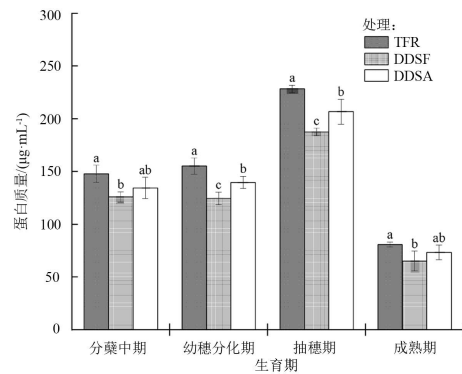
Fig.6 Bleeding intensity of rice root system at different fertility periods under different treatments

由图 7 可知, 不同种植模式下水稻伤流液中蛋白质和氨基酸量与伤流液量变化趋势一致。以 2022 年数据为例, 与 TRF 处理相比, DDSF 处理的蛋白质量在幼穗分化期、抽穗期、成熟期分别下降了 24.9%、20.9%、24%; 与 DDSA 处理相比, DDSF 处理的蛋白质量在幼穗分化期、抽穗期、成熟期分别下降了 14.7%、12.1%、14.1%。与 TRF 处理相比, DDSF 处理的氨基酸量在幼穗分化期、抽穗期、成

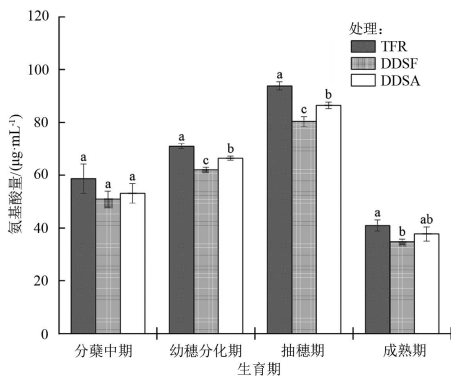
熟期分别下降了 14.5%、16.8%、17.6%; 与 DDSA 处理相比, DDSF 处理的氨基酸量在幼穗分化期、抽穗期、成熟期分别下降了 7.1%、7.6%、8.3%。由此可见, 移栽模式 (TFR 处理) 在分蘖中期后的根系活力与氮吸收能力都要高于直播模式 (DDSF、DDSA 处理), 且与 DDSF 处理相比, DDSA 处理显著增加了花后的根系活力与氮吸收能力, 并且在成熟期延缓了水稻根系的衰老。



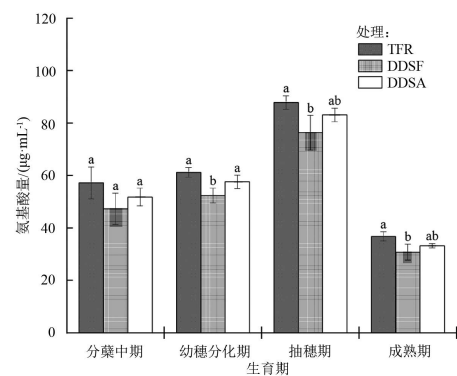
(a) 2021 年水稻根系伤流液中蛋白质量



(b) 2022 年水稻根系伤流液中蛋白质量



(c) 2021 年水稻根系伤流液中氨基酸量



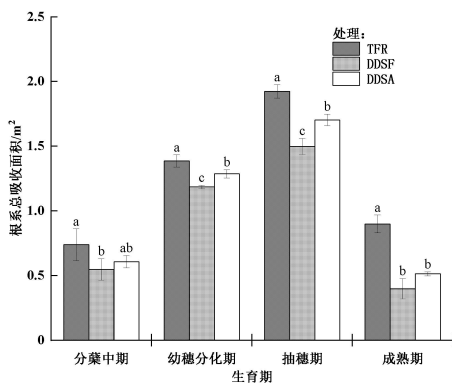
(d) 2022 年水稻根系伤流液中氨基酸量

图 7 各处理水稻不同生育期根系伤流组分

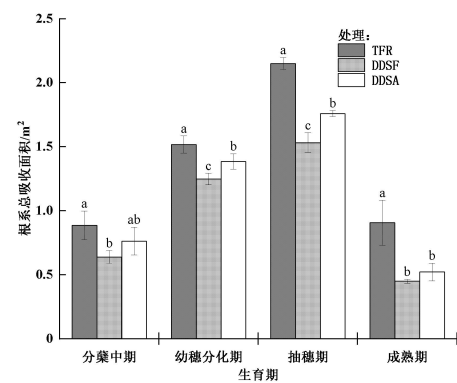
Fig.7 Injury flow fraction content of rice root system at different fertility periods under different treatments

由图 8 可知, 同一种植模式下水稻根系总吸收面积与活跃吸收面积变化趋势一致, 均随生育进程推进呈先上升再下降的趋势, 在抽穗期达到最大值 (图 8)。在幼穗分化期、抽穗期、成熟期移栽模式 (TFR 处理) 的根系总吸收面积和活跃吸收面积显著高于直播模式 (DDSF、DDSA 处理)。以 2022

年数据为例, 与 DDSF 处理相比, DDSA 处理在幼穗分化期和抽穗期的根系总吸收面积分别提高 10.9% 和 13.2%, 活跃吸收面积分别提高 14.9% 和 21.8%, 在成熟期 2 个处理间的根系总吸收面积和活跃吸收面积无显著差异。



(a) 2021 年水稻根系总吸收面积



(b) 2022 年水稻根系总吸收面积

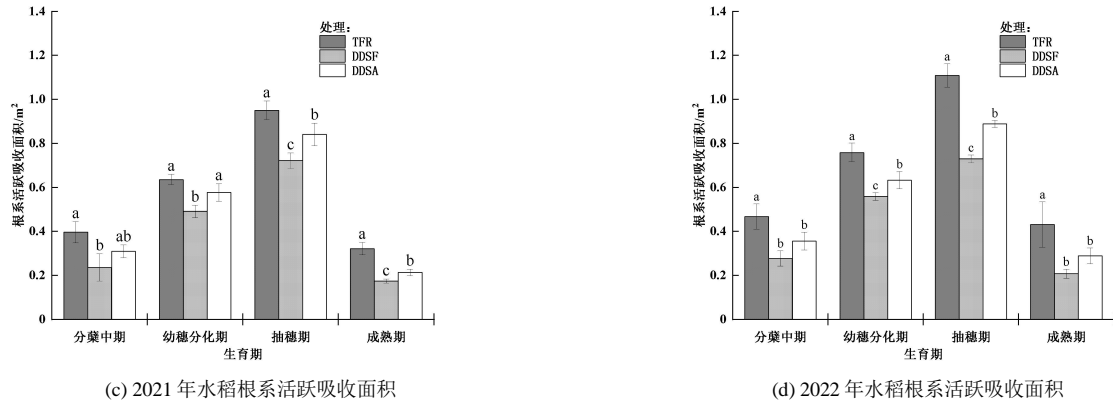


图 8 各处理不同生育期水稻根系总吸收面积与根系活跃吸收面积

Fig.8 Root total absorption area and active absorption area of rice root system at different fertility periods under different treatments

2.2 不同种植模式下水稻氮素积累及其与根系特性的关系

抽穗期和成熟期，不同种植模式水稻地上部总氮素积累量表现为 TFR 处理>DDSA 处理>DDSF 处理（表 1），且 3 个处理之间差异显著。与移栽模式相比，抽穗期直播模式吸氮量平均减少 16.15%~24.09%，成熟期平均减少 16.84%~28.92%。抽穗期和成熟期 DDSA 处理总吸氮量都显著大于 DDSF 处理。不同种植模式下花后氮素吸收量表现为 TFR 处理>DDSA 处理>DDSF 处理，3 个处理之间差异显著，2021、2022 年 TFR、DDSF、DDSA 处理花后氮素吸收量均值为 0.33、0.21、0.27 g/盆。

表 1 各处理水稻群体主要生育期地上部总氮素积累量

Table 1 N accumulation of rice populations at major fertility periods under different treatments

年份	种植模式	地上部总氮素积累量/(g 盆 ⁻¹)		花后氮素吸收量/(g 盆 ⁻¹)
		抽穗期	成熟期	
2021	TFR	1.36±0.01a	1.67±0.03a	0.31±0.01a
	DDSF	1.11±0.02c	1.32±0.03c	0.21±0.03c
	DDSA	1.20±0.02b	1.46±0.02b	0.26±0.01b
2022	TFR	1.30±0.18a	1.63±0.06a	0.34±0.03a
	DDSF	1.03±0.05c	1.24±0.02c	0.21±0.03c
	DDSA	1.10±0.01b	1.37±0.04b	0.27±0.01b

表 2 为不同种植模式下成熟期地上部总氮吸收量与根系指标的相关分析结果。形态指标中，总氮吸收量与全生育期内根冠比、0~20 cm 土层的根直径、10~20 cm 土层的根长、根表面积、根干物质质量显著正相关，与 0~10 cm 土层的根长、根表面积、根干物质质量负相关。生理指标中总氮吸收量与主要生育期根系总吸收面积、活跃吸收面积、伤流强度及伤

流液中蛋白质质量和氨基酸量显著正相关。

表 2 各处理成熟期地上部总氮吸收量与主要生育期根系指标的相关性

Table 2 Correlation between total N uptake at maturity and physiological indexes related to roots for different rice varieties under different treatments

指标	总氮吸收量				
	分蘖期	幼穗分化期	抽穗期	成熟期	
根长	0~10 cm	-0.717**	-0.817**	-0.808**	-0.836**
	10~15 cm	0.959**	0.961**	0.938**	0.931**
	15~20 cm	0.936**	0.935**	0.942**	0.938**
根表面积	0~10 cm	-0.387	-0.769**	-0.876**	-0.877**
	10~15 cm	0.936**	0.806**	0.943**	0.889**
	15~20 cm	0.843**	0.883**	0.864**	0.935**
根直径	0~10 cm	0.820**	0.740**	0.839**	0.795**
	10~15 cm	0.892**	0.930**	0.900**	0.749**
	15~20 cm	0.875**	0.844**	0.744**	0.700**
根干物质质量	0~10 cm	-0.171	-0.585*	-0.525*	-0.641**
	10~15 cm	0.915**	0.951**	0.951**	0.934**
	15~20 cm	0.952**	0.956**	0.958**	0.938**
根冠比	0.724**	0.785**	0.601**	0.747**	
根系总吸收面积	0.714**	0.862**	0.925**	0.880**	
根系活跃吸收面积	0.856**	0.867**	0.904**	0.832**	
根系伤流强度	0.616**	0.661**	0.884**	0.815**	
蛋白质质量	0.664**	0.881**	0.902**	0.729**	
氨基酸量	0.639**	0.709**	0.848**	0.757**	

2.3 种植模式对水稻产量构成及产量的影响

从产量构成要素来看，2 a 试验数据表现一致，TFR 处理和 DDSA 处理的穗粒数和结实率都显著高于 DDSF 处理（表 3）。不同种植模式下穗数均表现为移栽模式显著高于直播模式。不同种植模式下千粒质量表现为 DDSF 处理>DDSA 处理>TFR 处理。不同种植模式下水稻产量表现为 TFR 处理>DDSA 处理>DDSF 处理。2021、2022 年 TFR、DDSF、DDSA 处理的产量均值为 90.96、77.36、80.42 g/盆。

表 3 各处理产量及产量构成因素

Table 3 Grain yield and yield components of rice under different planting patterns

年份	种植模式	穗数	穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	产量/(g 盆 ⁻¹)
2021	TFR	16.67±0.58a	78.85±2.35a	91.88±0.44a	25.16±0.33b	91.09±1.22a
	DDSF	15±0b	70.53±1.21b	90.96±0.26b	26.72±0.17a	77.15±0.95c
	DDSA	14.67±0.58b	78.34±1.57a	91.84±0.18a	25.31±0.42b	80.05±0.21b
2022	TFR	16.67±0.58a	78.61±2.42a	92.06±0.69a	24.9±0.37b	90.83±2.04a
	DDSF	15.67±0.58b	70.84±3.05b	90.53±0.62b	25.76±0.3a	77.57±1.16c
	DDSA	15±0b	77.76±0.43a	92.2±0.19a	25.04±0.03b	80.79±0.28b

表 4 为成熟期各指标与产量的相关分析结果, 形态指标中, 产量与根冠比、10~20 cm 土层的根直径、根长、根表面、根干物质质量正相关, 与 0~10 cm 土层的根长、根表面积、根干物质质量负相关; 生理指标中, 产量与根系总吸收面积、活跃吸收面积、伤流液中蛋白质质量和氨基酸量正相关。

表 4 不同种植模式下成熟期各指标与产量的相关性

Table 4 Correlation between yield and various indexes of mature stage under different planting patterns

指标	产量	
根长	0~10 cm	-0.856**
	10~15 cm	0.980**
	15~20 cm	0.951**
根表面积	0~10 cm	-0.879**
	10~15 cm	0.938**
	15~20 cm	0.958**
根直径	0~10 cm	0.804**
	10~15 cm	0.813**
	15~20 cm	0.669**
根干物质质量	0~10 cm	-0.665**
	10~15 cm	0.960**
	15~20 cm	0.958**
根冠比	0.778**	
根系总吸收面积	0.937**	
根系活跃吸收面积	0.791**	
蛋白质质量	0.761**	
氨基酸量	0.644**	
氮素积累量	0.941**	

3 讨论

3.1 种植模式对水稻根系形态及生理特性的影响

本研究表明, 不同种植模式间根系各形态指标不同, 在主要生育期移栽模式的各土层根直径、10~20 cm 土层的根系分布(根长、根表面积、根干物质质量)高于直播模式。这与陶冶^[14]的研究结果一致, 与直播模式相比, 移栽模式下水稻根系分布深、直径大、群体根数少, 早直播淹水灌溉的根长在 0~15 cm 土壤减少了 25%左右, 15~30 cm 土壤减少了 45%左右。

本研究表明, 在主要生育期移栽模式下水稻根系总吸收面积、活跃吸收面积、伤流强度、伤流液中的氨基酸量和可溶性糖量较早直播淹灌模式增加。究其原因可能是早直播淹灌模式的群体茎蘖数过多, 导致其个体空间占有量十分有限, 加剧根系生长对资源的竞争^[31]; 同时, 早直播淹灌模式土壤未经过泡田搅拌等处理就长期处于淹水状态下, 土壤紧实度和土壤渗透阻力较高, 都不利于根系的生长, 长期的厌氧环境抑制水稻根系的正常发育^[32]。可见移栽模式在土壤中的良好根系构型和相对较高的根系活性使其可以通过充足的养分和水分供应地上部生

长。本研究表明, 在直播模式中, 早直播干湿交替灌溉模式较早直播淹灌模式改善了根系生长, 加强了根系生理特性并延缓了根系的衰老。这可能是由于干湿交替灌溉使土壤在湿-干-湿的过程中调节了根系周围的水分和氧气平衡, 土壤氧化还原电位也随之发生相应的变化, 改善了土壤氧化还原性, 有效抑制了土壤中因长期淹水而积累的 Fe^{2+} 和 H_2S 等有毒还原产物, 并且伴随着硝化作用与反硝化作用交替进行增加了土壤中的速效养分量, 增高了土壤中的微生物活性, 提升了土壤体积质量和孔隙度, 降低了旱作农田的渗透阻力, 从而促进了根系向深层土壤生长^[33-35]。可见早直播干湿交替灌溉模式较早直播淹灌模式, 优化了水稻根系构型, 具备更合理的根系分布, 这种现象在后期更为显著。

3.2 种植模式对成熟期总氮素积累量和产量的影响

本研究表明, 不同种植模式下总氮素积累量和产量的差异主要归因于根系形态和生理特性的不同, 说明优化水稻的根系特性, 有助于提高水稻的氮素吸收能力, 进而提高水稻氮肥利用率。与移栽模式相比, 早直播模式不仅根系多集中在 0~10 cm 土层, 而且花后显著降低了根系吸收面积、伤流组分中物质含量和深层根干物质质量, 致使其加速了根系衰老, 不利于后期的氮素积累。在直播模式中, 早直播干湿交替灌溉模式下相对较高的氮素吸收是因为其花后良好的根系构型、高根系吸收面积和伤流组分中物质含量, 延缓了根系衰老, 在花后仍能有着较好的氮素吸收能力。

产量相关分析表明, 产量与氮素积累量正相关。在成熟期, 形态指标中根冠比、10~20 cm 土层的根直径、根长、根表面和根干物质质量正相关, 0~10 cm 土层的根长、根表面积和根干物质质量负相关; 生理指标中根系总吸收面积、活跃吸收面积、伤流液中蛋白质质量和氨基酸量正相关, 这与张耗等^[36]的研究基本一致。表明根系活力提升, 会促进养分从根系转运到地上部分, 使得水稻产量增加^[37]。说明可以通过高产高效种植模式改善根系形态和生理特征, 从而提高水稻产量。但与大田水稻相比, 盆栽水稻的生长及产量还是有所差别。一方面, 二者土壤通透性不同, 盆栽底部处于完全封闭状态, 淹灌模式上部又一直保持水层, 这使得移栽淹灌模式和早直播淹灌模式根系氧化能力受到抑制, 早直播干湿交替的效果也降低。这是因为此环境下土壤还原性强导致根系表面有大量的 Fe^{2+} 不能氧化成 Fe^{3+} , Fe^{2+} 难溶于水易沉积于根表抑制水稻根系发育从而影响到水稻生长及产量^[38-39]。另一方面盆栽水稻根系生长受限, 盆栽取出的根系呈圆柱形, 这严重阻碍了原

本水稻根系的发散生长，使其不能正常的吸收土壤中的养分。所以为使盆栽水稻生长不受土壤通透性及土壤空间的影响，可改成可过滤盆底，并扩大盆口直径，从而改善盆栽水稻的生长条件。综上所述，在生产实践中通过适宜的种植模式协调地上部与地下部的生长，保持较高的根系活性和良好构型，可以提高花后的氮素积累能力。

4 结论

1) 不同种植模式下水稻根系形态特性和生理特性差异显著，其中 10~20 cm 土层的根系分布是影响氮素积累及产量的关键因子，并且氮素积累量与幼穗分化期后根系吸收面积、根系伤流量和伤流液中氨基酸量、蛋白质量显著正相关。

2) 旱直播干湿交替灌溉模式可以减少水稻 0~10 cm 土层的根长、根表面积和根干物质量，增加 10~20 cm 土层的根长、根表面积和根干质量，提高根系吸收面积、根系伤流量和根系伤流液中的氨基酸量、蛋白质量，从而增加水稻总氮素积累量和产量。

3) 从节水省力、增产高效等方面考虑，旱直播干湿交替灌溉有望提高旱直播水稻氮素利用效率，进而提高水稻产量。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献：

- ZHANG Yajie, XU Jingnan, CHENG Yadan, et al. The effects of water and nitrogen on the roots and yield of upland and paddy rice[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(5): 1 363-1 374.
- 王跃星, 魏祥进, 徐春春, 等. 我国水稻种业发展现状与对策浅析[J]. *中国稻米*, 2022, 28(5): 62-65.
WANG Yuexing, WEI Xiangjin, XU Chunchun, et al. Current situation and countermeasures of rice breeding and seed industry development in China[J]. *China Rice*, 2022, 28(5): 62-65.
- 李兴华, 张盛, 王欢, 等. 不同种植方式对节水耐旱稻产量、外观品质及经济效益的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(3): 78-82.
LI Xinghua, ZHANG Sheng, WANG Huan, et al. Effects of different planting methods on yield, appearance quality and economic benefit of water-saving and drought-resistant rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(3): 78-82.
- 武云霞, 郭长春, 孙永健, 等. 水氮互作下直播稻群体质量与氮素利用特征的关系[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 899-908.
WU Yunxia, GUO Changchun, SUN Yongjian, et al. Relationship of population quality and nitrogen fertilizer utilization characteristics of direct seeding rice under water-nitrogen interaction[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 899-908.
- LIU Hongyan, HUSSAIN S, ZHENG Manman, et al. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(1): 285-294.
- 陈前, 张雨, 杨标, 等. 直播水稻丰产高效群体的物质生产特征及其调控途径研究[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 43(6): 1-12.
CHEN Qian, ZHANG Yu, YANG Biao, et al. Biomass producing characteristics of high yield and high efficiency groups in direct seeding rice and its regulating approaches[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2022, 43(6): 1-12.
- ZHANG Hao, YU Chao, KONG Xiaosheng, et al. Progressive integrative crop managements increase grain yield, nitrogen use efficiency and irrigation water productivity in rice[J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 1-11.
- 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 等. 灌溉方式对寒地水稻产量及籽粒灌浆的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(22): 4 493-4 506.
ZHAO Liming, LI Ming, ZHENG Dianfeng, et al. Effects of irrigation regimes on yield and grain filling of rice (*oryza sativa* L.) in cold region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(22): 4 493-4 506.
- AQUEEL M A, LEATHER S R. Effect of nitrogen fertilizer on the growth and survival of *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Sitobion avenae* (F.) (Homoptera: Aphididae) on different wheat cultivars[J]. *Crop Protection*, 2011, 30(2): 216-221.
- 徐国伟, 赵喜辉, 江孟孟, 等. 轻度干湿交替灌溉协调水稻根冠生长、提高产量及氮肥利用效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1 388-1 396.
XU Guowei, ZHAO Xihui, JIANG Mengmeng, et al. Alternate wetting and moderate drying irrigation harmonize rice root and shoot growth, improves grain yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1 388-1 396.
- 景文疆, 杨颖, 马强, 等. 水稻根系特征与稻米品质的关系研究进展[J]. *中国稻米*, 2022, 28(4): 35-39.
JING Wenjiang, YANG Ying, MA Qiang, et al. Research progress on the relationship between rice root characteristics and grain quality[J]. *China Rice*, 2022, 28(4): 35-39.
- 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 等. 根际氧环境对水稻幼苗根系微形态结构的影响及其生理机制[J]. *中国水稻科学*, 2022, 36(4): 399-409.
XIAO Deshun, XU Chunmei, WANG Danying, et al. Effect of rhizosphere oxygen environment on the root micromorphological structure of rice seedlings and its physiological mechanism[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(4): 399-409.
- 王春雨, 余华清, 何艳, 等. 播栽方式与施氮量对杂交籼稻氮肥利用特征及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1 792-1 801.
WANG Chunyu, YU Huaqing, HE Yan, et al. Characteristics of nitrogen accumulation and utilization in indica hybrid rice under different planting methods and nitrogen rates[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1 792-1 801.
- 陶冶. 不同种植方式下水稻产量、水氮利用效率及稻田温室气体排放比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
TAO Ye. Comparison among different rice establishment methods: grain yield, water and nitrogen utilization efficiencies and greenhouse gas emissions[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- UDDIN M R, WADE L J, PYON J Y, et al. Rooting behavior of rice cultivars under different planting methods[J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2009, 12(1): 17-23.
- 徐国伟, 吕强, 陆大克, 等. 干湿交替灌溉耦合施氮对水稻根系性状及籽粒库活性的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(10): 1 495-1 505.
XU Guowei, LYU Qiang, LU Dake, et al. Effect of wetting and drying alternative irrigation coupling with nitrogen application on root characteristic and grain-sink activity[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(10): 1 495-1 505.
- 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.
XU Guowei, LI Shuai, ZHAO Yongfang, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on root secretion and nitrogen utilization of rice[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 140-146.
- 付景, 刘洁, 曹转勤, 等. 结实期干湿交替灌溉对 2 个超级稻品种结实率和粒重的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(6): 1 056-1 065.
FU Jing, LIU Jie, CAO Zhuanqin, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation during grain filling on the seed-setting rate and grain

- weight of two super rice cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(6): 1 056-1 065.
- [19] 霍中洋, 李杰, 张洪程, 等. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性[J]. *作物学报*, 2012, 38(10): 1 908-1 919.
HUO Zhongyang, LI Jie, ZHANG Hongcheng, et al. Characterization of nitrogen uptake and utilization in rice under different planting methods[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(10): 1 908-1 919.
- [20] 曹小闯, 刘晓霞, 马超, 等. 干湿交替灌溉改善稻田根际氧环境进而促进氮素转化和水稻氮素吸收[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(1): 1-14.
CAO Xiaochuang, LIU Xiaoxia, MA Chao, et al. Alternative dry-wet irrigation improves the rhizospheric oxygen environment and nitrogen transformation, and increases nitrogen absorption by rice plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(1): 1-14.
- [21] 高冬梅. 不同灌溉方式对寒地粳稻氮代谢及蛋白组分的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
GAO Dongmei. Effect of different irrigation methods on nitrogen metabolism and protein components of japonica rice in cold region[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013.
- [22] 许更文. 灌溉方式与施氮量对水稻产量影响的互作效应及其生理基础[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
XU Gengwen. Interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on grain yield of rice and its physiological basis[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [23] 殷晓燕, 徐阳春, 沈其荣, 等. 直播旱作和水作水稻的氮素吸收利用特征研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(6): 983-986.
YIN Xiaoyan, XU Yangchun, SHEN Qirong, et al. Nitrogen uptake and use efficiency by rice crops cultivated in waterlogged field and sowed on dry field without or with different mulchings[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 983-986.
- [24] 轧宗杰, 卢树昌, 侯琨. 水稻旱直播栽培发展现状、问题及应用前景[J]. *作物杂志*, 2020(2): 9-15.
YA Zongjie, LU Shuchang, HOU Kun. Development status, problems and application prospects of dry direct seeding rice[J]. *Crops*, 2020(2): 9-15.
- [25] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 132-141.
XU Guowei, WANG Hezheng, ZHAI Zhihua, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 132-141.
- [26] 孔飞扬, 江立庚, 文娟, 等. 直播水稻产量、产量构成因子和干物质积累的变化特点及其相互关系[J]. *华中农业大学学报*, 2018, 37(5): 11-17.
KONG Feiyang, JIANG Ligeng, WEN Juan, et al. Changes and relationships of yield, yield components and dry matter accumulation of direct-seeded rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018, 37(5): 11-17.
- [27] 陆大克, 段骅, 王维维, 等. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1 362-1 372.
LU Dake, DUAN Hua, WANG Weiwei, et al. Comparison of rice root development and function among different degrees of dry-wet alternative irrigation coupled with nitrogen forms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8): 1 362-1 372.
- [28] 甄博, 周新国, 陆红飞, 等. 高温与涝交互胁迫对水稻孕穗期生理指标的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(3): 1-7.
ZHEN Bo, ZHOU Xinguo, LU Hongfei, et al. The effects of alternate hot wave and waterlogging on physiological traits of rice at booting stage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(3): 1-7.
- [29] 张瑞富, 杨恒山, 张玉芹, 等. 深松对春玉米根系分布及氮素积累与利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(5): 176-181.
ZHANG Ruifu, YANG Hengshan, ZHANG Yuqin, et al. Effects of subsoiling on roots distribution and nitrogen accumulation and utilization of spring maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(5): 176-181.
- [30] 郑浣彤, 邵玺文, 耿艳秋, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对水稻产量及氮素利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(12): 29-36.
ZHENG Huantong, SHAO Xiwen, GENG Yanqiu, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on rice yield and nitrogen utilization[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(12): 29-36.
- [31] 吴振雨. 密度和养分管理对寒地直播稻生长发育及产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
WU Zhenyu. Effects of density and nutrient management on growth and yield of direct-seeded rice in cold area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.
- [32] 陈云, 刘昆, 李婷婷, 等. 结实期干湿交替灌溉对水稻根系、产量和土壤的影响[J]. *中国水稻科学*, 2022, 36(3): 269-277.
CHEN Yun, LIU Kun, LI Tingting, et al. Effects of alternate wetting and moderate soil drying irrigation on root traits, grain yield and soil properties in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(3): 269-277.
- [33] ANJUM S A, ASHRAF U, TANVEER M, et al. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 69.
- [34] 徐国伟, 陆大克, 孙会忠, 等. 干湿交替灌溉与施氮耦合对水稻根际环境的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 186-194.
XU Guowei, LU Dake, SUN Huizhong, et al. Effect of alternative wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on rhizosphere environment of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(4): 186-194.
- [35] 漆栋良, 胡田田, 吴雪, 等. 适宜灌水施氮方式利于玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 144-149.
QI Dongliang, HU Tiantian, WU Xue, et al. Rational irrigation and nitrogen supply methods improving root growth and yield of maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 144-149.
- [36] 张耗, 黄钻华, 王静超, 等. 江苏中籼水稻品种演进过程中根系形态生理性状的变化及其与产量的关系[J]. *作物学报*, 2011, 37(6): 1 020-1 030.
ZHANG Hao, HUANG Zuanhua, WANG Jingchao. Changes in morphological and physiological traits of roots and their relationships with grain yield during the evolution of mid-season Indica Rice cultivars in Jiangsu Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(6): 1 020-1 030.
- [37] 胡志华, 朱练峰, 林育炯, 等. 根部增氧模式对水稻产量与氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1 503-1 512.
HU Zhihua, ZHU Lianfeng, LIN Yujiong, et al. Effect of root aeration methods on rice yield and nitrogen utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1 503-1 512.
- [38] 陈娜, 廖敏, 张楠, 等. Fe^{2+} 对水稻生长及土壤微生物活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 651-660.
CHEN Na, LIAO Min, ZHANG Nan, et al. Effects of exogenous ferrous on rice growth and soil microbial activities[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 651-660.
- [39] 王冰蕊, 才硕, 郭巧玲, 等. 水稻抗氧化性及产量对稻田淹涝退水过程的响应研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(7): 111-118.
WANG Bingrui, CAI Shuo, GUO Qiaoling, et al. Response of oxidation resistance and yield of rice to onset and recession of waterlogging[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(7): 111-118.

2013—2015. We simulated the response of grain yield of the spring wheat to changes in next-day average temperature, average daily radiation, CO₂ mass fraction, nitrogen fertilization, both individually or in combination.

【Result】 ① The simulated growing duration and grain yield agreed well with the ground-true data with $R^2=0.98$ and $NRMSE=5\%$ for the former; and $R^2=0.91$, $NRMSE=12\%$ and $D=0.95$ for the latter. ② For the three precipitation scenarios we simulated, changing meteorological factors and nitrogen fertilization individually or in combination both had a significant impact on grain yield, especially in dry years. ③ When other conditions were the same, grain yield reached its peak and showed greater stability during wet years. **【Conclusion】** Elevated precipitation not only boosted grain yield but also played a pivotal role in influencing the effects of other meteorological factors on crop growth and enhancing the efficiency of nitrogen fertilizer.

Key words: dryland spring wheat; climate change; APSIM

责任编辑: 白芳芳

(上接第 66 页)

Effects of Planting Method on Root Growth and Nitrogen Uptake of Rice

HE Chunyu, LIU Yueyue, SHAO Xiwen, GUO Liying, TENG Yu, DU Juan, GENG Yanqiu*

(Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: **【Objective】** Water and nutrient uptake by plants is modulated by their root architecture. This paper investigates the impact of planting method on root distribution of rice and the associated nitrogen uptake and grain yield. **【Method】** The variety Jiyujing was used as the model plant. The experiment compared three planting methods: transplanting under flooding condition (TFR), direct drill under dry condition followed by flooding cultivation (DDSF), direct drill under dry condition followed by alternate wet and dry cultivation (DDSA). For each treatment, we measured morphological and physiological traits of the roots, nitrogen absorption from the top 0~20 cm soil layer, as well as the ultimate grain yield. **【Result】** ① Compared to TFR, both DDSA and DDSF increased the dried weight of the roots, root diameter and root distribution in the top 0~10 cm soil layer, while reducing roots in the 10~20 cm soil layer, during the primary growth period. ② After the young spike differentiation stage, DDSF reduced root activity and other physiological traits, while DDSA enhanced root vitality and other physiological traits. ③ The significance of the impact of planting method on yield, total nitrogen accumulation, nitrogen absorption after the post-flowering and during the grain-filling and maturity stages was ranked in the order of TFR > DDSA > DDSF. Transplanting increased deep rooting and root activity, resulting in high nitrogen accumulation and grain yield. **【Conclusion】** The alternate dry-wet irrigation combined with direct drill also increased deep rooting, enhanced root vitality, thereby promoting nitrogen absorption and grain yield. It is a potential cultivation practice to enhance nitrogen utilization and yield of the rice.

Key words: rice; planting patterns; root distribution; nitrogen accumulation; composition of root bleeding sap; yield

责任编辑: 白芳芳