

头季机收后叶面氮肥施用时间对再生季稻米产量及品质的影响

陈子方¹ 周泽源¹ 钱嘉潞¹ 马孝卫¹ 李锦涛¹ 曹玉贤^{2,*} 侯俊^{1,*}

[¹ 长江大学 农学院/农业农村部长江中游作物绿色高效生产重点实验室(部省共建)/湿地生态与农业利用教育部工程研究中心/涝渍灾害与湿地农业湖北省重点实验室, 湖北 荆州 434025; ² 长江大学 生命科学学院, 湖北 荆州 434025; *通信作者, email: caoyx2018@yangtzeu.edu.cn; houjungoodluck1@163.com]

Effect of Foliar Nitrogen Fertilizer Application Timing on Yield and Quality of Ratoon Rice Under Mechanical Harvesting of the Main Crop

CHEN Zifang¹, ZHOU Zeyuan¹, QIAN Jialu¹, MA Xiaowei¹, LI Jintao¹, CAO Yuxian^{2,*}, HOU Jun^{1,*}

[¹ College of Agronomy, Yangtze University / MARA Key Laboratory of Sustainable Crop Production in the Middle Reaches of the Yangtze River (Co-Construction by Ministry and Province) / Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education/Hubei Key Laboratory of Waterlogging Disaster and Agricultural Use of Wetland, Jingzhou 434025, China; ² College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; *Corresponding author, email: caoyx2018@yangtzeu.edu.cn; houjungoodluck1@163.com]

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the effects of foliar nitrogen fertilizer (FNF) application at different times within the same period after mechanical harvesting of the main crop on the physiological characteristics, yield, and quality of ratoon rice, providing a scientific basis for increasing yield and improving quality of ratoon rice.

【Method】 After the mechanical harvesting of the main crop, a field split-plot two-factor experiment was conducted in high-fertility (HF) and low-fertility (LF) fields. The main plots were assigned to rolling and non-rolling conditions, while the subplots were assigned to different FNF application times: spraying clean water on the day of harvesting (CK), and spraying FNF at 1 day (D1), 3 days (D3), and 7 days (D7) after harvesting. The physiological characteristics, yield, and quality of ratoon rice were measured to elucidate the effects of foliar nitrogen application timing on yield and quality. **【Result】** The results showed that FNF significantly increased the SPAD value, dry matter weight, leaf area index, and effective panicle number of ratoon rice. Under both HF and LF conditions, FNF increased yield by 25.6%–82.8% by improving the effective panicle number. In the non-rolling area, no significant differences were observed among different FNF application timings, but all treatments significantly increased effective panicle number by 16.7%–30.6% and yield by 25.6%–36.7% compared to CK. In the rolling area, the yield enhancement effect gradually decreased with delayed FNF application. Under the D1 treatment, the effective panicle number significantly increased by 61.5% and 62.5%, and yield significantly increased by 74.9% and 82.8% under the two fertility conditions, respectively. FNF primarily improved the quality of ratoon rice by increasing the head rice rate and reducing the chalkiness rate. Compared to CK, in the non-rolling area, FNF significantly increased the head rice rate by 9.5%–17.8% and significantly reduced the chalkiness rate by 8.1%–15.3%; in the rolling area, FNF significantly increased the head rice rate by 15.0%–17.9% and significantly reduced the chalkiness rate by 9.2%–15.7%. **【Conclusion】** Foliar nitrogen fertilizer application after mechanical harvesting of the main crop effectively increases the yield and quality of ratoon rice. In rolling areas, the application timing significantly affects outcomes, with the best results achieved when spraying on the day of harvesting. In non-rolling areas, the application timing has no significant effect, and FNF can be applied within 7 days after harvesting.

Keywords: ratoon rice; mechanical harvesting; foliar fertilizer; spray timing; yield; quality

摘 要: 【目的】 研究头季机收后同一时期内不同时间施用叶面氮肥(FNF)对再生季水稻生理特性、产量和品质的影响, 为再生稻增产提质提供科学依据。**【方法】** 头季稻机收后, 在高肥力(HF)和低肥力(LF)田块采用大田裂

收稿日期: 2024-11-18; 修改稿收到日期: 2024-12-22。

基金项目: 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金资助项目(KFG202403); 湖北省重点研发计划资助项目(2023BBB082)。

区双因素试验设计。其中, 碾压状况为主区, 包括碾压和非碾压两个处理; FNF 施用时间为副区, 包括机收后当日喷施清水(CK), 以及机收后 1 d(D1)、3 d(D3)、7 d(D7)喷施 FNF, 测定再生季生理特性指标、产量和品质, 阐明叶面施氮时间对再生季稻米产量及品质的影响。【结果】FNF 能显著提高再生季叶片 SPAD、干物质量、叶面积指数和有效穗数。在 HF 和 LF 两种条件下, FNF 均能通过提高有效穗数进而提高产量 25.6%~82.8%, 非碾压区不同 FNF 喷施时间处理间无显著差异, 但是有效穗数都较 CK 显著增加 16.7%~30.6%, 产量显著增加 25.6%~36.7%。碾压区随着喷施时间的推迟增产效果逐渐降低, D1 处理后在两种肥力条件下有效穗数分别显著提高 61.5%和 62.5%、产量分别显著提高 74.9%和 82.8%。FNF 主要通过提高整精米率和降低垩白率提高再生季稻米品质, 与 CK 相比, 非碾压区施 FNF 处理整精米率显著提高 9.5%~17.8%, 垩白率显著降低 8.1%~15.3%; 碾压区施 FNF 处理整精米率显著提高 15.0%~17.9%, 垩白率显著降低 9.2%~15.7%。【结论】头季机收后施叶面氮肥能有效提高再生季产量和品质, 碾压区受喷施时间影响明显, 以机收后当日喷施效果最好; 非碾压区受喷施时间影响不明显, 机收后 7 日内均可喷施。

关键词: 再生稻; 机收; 叶面施氮; 喷施时间; 产量; 品质

再生稻是一次种植、二次收获的中稻种植模式^[1]。当前, 随着农村劳动力紧缺和人工成本上涨, 不同种稻模式下单位面积稻田利润均有所下滑, 而再生稻因经济效益较好, 轻简化耕作需求突出。然而, 机械化生产下, 头季机收碾压会导致再生芽减少, 并伴随稻米品质较差和碎米率较高等问题, 最高可致再生季减产 82%, 成为制约再生稻农业机械化进程的关键问题^[2]。另一方面, 再生稻通过腋芽萌发以实现再次收获, 休眠芽的萌发和生长受氮素养分供应调控, 而碾压区和非碾压区腋芽生长对氮的响应不同, 碾压区氮需求高于非碾压区^[3]。当前再生稻高产栽培技术主要包括控制头季机收留桩高度、适量适时施用促苗肥和促芽肥^[4-5]。然而, 头季机收后, 虽采用一次性根区施控释尿素能有效增产^[6], 但仍难以满足水稻腋芽的养分需求, 再生季产量和精米率依然很低^[7]。叶面施氮(FNF)能依靠根外追肥快速补充氮肥, 有效减缓叶片衰老, 提高作物叶绿素含量, 进而提高作物光合能力, 增加作物干物质量, 从而实现增产^[8]。目前, 针对再生稻利用 FNF 来补充氮肥促进腋芽萌发和增产提质的研究较少, 能否通过施用 FNF 来对碾压区和非碾压区精准施肥, 有待进一步深入研究。

FNF 效果受到多个因素的影响, 其中, 喷施时间、叶片类型、叶龄、生长环境以及土壤氮素供应水平等均会影响 FNF 的吸收^[9-11]。研究发现, 不同作物及不同生长条件下 FNF 施用效果受到喷施时间的影响, 小麦^[12]和水稻^[13]均有其特殊的最适喷施时间; 大豆在干旱逆境下根系养分吸收受阻, FNF 能快速补充氮肥增产 46%^[14]。同样地, 头季不同施肥水平会造成再生季土壤养分供氮差异, 导致再生季产量不同^[15], 而对 FNF 施用效果是否存在影响, 需进一步研究。另一方面, 再生稻腋芽分化时间很

短, 大约一周内最为关键, 尤其倒桩碾压后的腋芽则需更多的氮^[3]。FNF 能否在此期间迅速供氮对解决再生稻产量低、碎米率高的问题至关重要。因此, 探究头季不同施肥水平下机收碾压后 1 周内的最适 FNF 喷施时间对再生稻的增产提质具有重要意义。

本研究以尿素为氮源, 选取头季不同施肥水平的 2 个试验点, 设置不同碾压条件(碾压和非碾压), 并在机收 1 周内设置不同时间点喷施 FNF, 通过测定叶片 SPAD、干物质量以及产量构成等指标, 明确不同碾压情况下 FNF 喷施时间对再生季水稻生长和产量的影响, 以期对再生稻叶面氮肥高效施用和机收碾压条件下的高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年 8 月 16 日至 10 月 20 日在湖北省荆州市荆州区进行, 分别设在八岭山(30°40'4.4"N, 112°6'17.1"E, 高施肥试验地)和梅槐镇(30°23'25.70"N, 112°01'25.61"E, 低施肥试验地)。两地均属于北亚热带农业气候带, 土壤为偏黏性潴育型水稻土。高施肥(HF)试验地土壤 pH 为 6.5, 有机质含量 26.6 g/kg, 全氮 1.46 g/kg, 全磷 0.42 g/kg, 全钾 15.7 g/kg, 速效磷 7.0 mg/kg, 速效钾 108 mg/kg; 其肥料运筹为头季每公顷施复合肥(N-P₂O₅-K₂O 含量为 15%-15%-15%) 640 kg, 分蘖期追施尿素(N 46%) 96 kg、氯化钾(K₂O 60%) 120 kg, 共计施 N 140.2 kg/hm²、P₂O₅ 96 kg/hm²、K₂O 168 kg/hm²。HF 头季产量 9.6 t/hm², 再生季于机收前 10 d 施催芽肥, 机收后 5 d 施促苗肥, 每公顷施催芽肥和促苗肥尿素(N 46%) 80 kg。而低施肥(LF)试验地土壤 pH 为 6.3, 有机质含量 25.5 g/kg, 全氮

1.42 g/kg, 全磷 0.36 g/kg, 全钾 16.6 g/kg, 速效磷 4.5 mg/kg, 速效钾 105 mg/kg; 其肥料运筹为每公顷施复合肥(N-P₂O₅-K₂O 含量为 15%-15%-15%) 480 kg, 分蘖期追施尿素(N 46%) 48 kg, 共计施 N 94.08 kg/hm², P₂O₅ 72.0 kg/hm²、K₂O 72.0 kg/hm²。LF 头季产量 8.2 t/hm²。HF 和 LF 试验点头季收割后的土壤铵态氮含量分别为 33.5 mg/kg 和 32.9 mg/kg, 差异不显著; 这两个试验点再生季肥料运筹相同, 且本研究针对这两个试验点的再生季叶面施氮处理也完全一致。

1.2 试验设计

本研究采用裂区设计, 以碾压状况(碾压区和非碾压)为主区, 以叶面氮肥(FNF)施用时间为副区。头季使用小型收割机收割, 履带碾压宽度为 40 cm, 机收留桩高度为 50 cm。机收后当日设置试验, FNF 施用时间包括 4 个处理, 机收当日喷施清水作为对照(CK), 以及机收当日(D1)、3 日(D3)、7 日(D7)喷施 FNF。FNF 以尿素为氮源, 折合纯 N 3 kg/hm², 以植物油(迈思)为助剂, 荆门法麦克斯有限责任公司提供, 助剂用量为 10~15 ml/L。选择傍晚无风时模拟无人机航喷, 喷液量为 20 L/hm²。每个处理重复 3 次, 小区面积为 4 m², 各小区在重复内随机排列。供试品种为天两优 616。

1.3 项目测定及方法

1.3.1 叶片 SPAD 值的测定

分别于再生季苗期和孕穗期, 用 SPAD-502 叶绿素仪测定其 SPAD 值, 测定时避开叶脉。每小区选取 10 片新完全展开叶进行测定, 每片叶为 1 个重复, 每片叶测定 3 个点, 取平均值。

1.3.2 不同节位腋芽萌发数及生物学特性

喷施一周后, 各处理选取长势一致的 3 穴, 分节位统计腋芽的萌发数。于再生季成熟时, 各处理选取长势一致的 3 穴, 测定各节位有效穗数, 并按茎鞘(含叶鞘)、叶和穗分为三部分, 置于 105℃烘箱内杀青 30 min, 80℃下烘干至恒量, 称量干物质量。

1.3.3 不同节位叶特征及叶面积指数

于再生季成熟期, 各处理选取长势一致的 3 穴, 摘下所有叶片, 按不同节位分类, 同节位选择 5 片叶子测量叶长和叶宽(剑叶则单独统计), 并从中选取 10 片代表性叶, 采用长宽系数法计算其单叶叶面积[长×宽×校正系数(0.7)], 折算叶面积指数。

1.3.4 产量构成、产量及品质测定

于再生季成熟期, 每个处理按照平均有效穗数选取 9 穴, 调查有效穗数、穗粒数和千粒重等产量构成指标。收获时, 各小区在非考种取样区域选取 2

m² 测定产量。样品自然晒干至含水量低于 14%, 采用 NP-4350 型风选机进行风选, 按照国标《GB/T17891-2017 优质稻谷》测定稻米的糙米率、精米率、整精米率、垩白率等品质指标。

1.4 数据分析

所有数据采用 Excel 2021 进行整理, 采用 SPSS 26.0 进行数据统计分析, 主处理采用配对 *t* 检验, 副处理采用 LSD 检验。不同处理交互作用采用多因素方差分析。利用 Origin 2024 进行相关性分析。使用 DataGraph 5.3 作图。

2 结果与分析

2.1 再生季稻米产量及其构成因子

由表 1 可知, 在高施肥(HF)试验地, 碾压区叶面氮肥(FNF)处理显著提高了再生季的有效穗数和产量。与对照组(CK)相比, FNF 处理下有效穗数和产量的增幅分别为 42.3%~61.5% 和 48.6%~74.9%。其中, D1 处理表现最佳, 有效穗数和产量分别显著提高了 61.5% 和 74.9%。此外, FNF 显著提高了再生季稻米的结实率, 增幅为 1.4%~4.8%, 但不同 FNF 处理之间的差异未达到显著水平。每穗粒数和千粒重在各处理间无显著差异。在非碾压区, 与 CK 相比, FNF 处理显著提高了有效穗数(27.8%~30.6%)、结实率(3.4%~4.6%)和产量(30.1%~36.7%), 但各处理间差异仍未达到显著水平。在低施肥(LF)试验地, 碾压区和非碾压区的表现一致, FNF 显著提高了再生季的有效穗数、结实率和产量, 然而随着施氮时间的推迟, 增幅呈下降趋势。在碾压区, 各 FNF 处理的有效穗数、结实率和产量与 CK 相比显著提高, 增幅分别为 41.7%~62.5%、5.3%~7.2% 和 54.5%~82.8%。在非碾压区, 与 CK 相比, FNF 处理的有效穗数、结实率和产量分别显著提高了 16.7%~23.3%、4.5%~4.8% 和 25.6%~32.3%。

通过交互作用分析, 碾压处理(千粒重除外)、试验地(每穗粒数和千粒重除外)和喷施处理(每穗粒数和千粒重除外)对再生季产量及产量构成因素的影响达显著或极显著水平。碾压处理与试验地的交互作用, 以及碾压处理与喷施处理的交互作用, 对有效穗数和产量的影响达显著或极显著水平; 试验地与喷施处理的交互作用则对结实率的影响达显著水平。

2.2 再生季稻米加工及外观品质

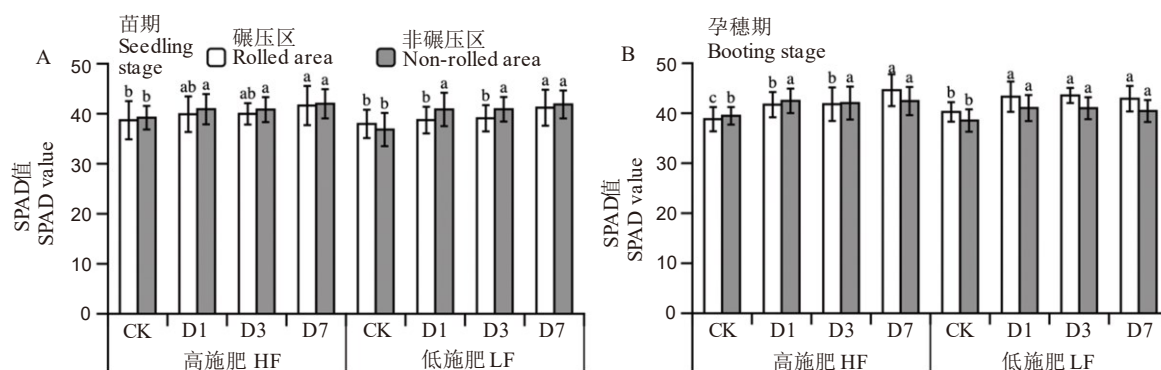
由表 2 可知, FNF 处理显著提高了再生季稻米的精米率、糙米率和整精米率, 并显著降低了垩白

Table 1. Effects of foliar fertilizer application timing on ratoon rice yield and its components

CK, Control, spraying clean water on the harvest day. D1, D3, D7 mean FNF application 1 d, 3 d, 7 d after harvesting. HF represents the high-fertility experimental field, and LF represents the low-fertility experimental field. Within a column, different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level (LSD). * indicates a significant difference between rolled and non-rolled areas under the same fertilization treatment at the 5% level (*t*-test). ***, **, * represent significant difference at the 0.001, 0.01 and 0.05 probability levels, respectively. ns means no significant at the 0.05 probability level. The same below.

Table 2. Effects of foliar fertilizer application timing on processing and appearance quality of ratoon rice

试验地 Site	碾压处理 Treatment	喷施处理 Spray- treatment	精米率 Head rice rate (%)	糙米率 Brown rice rate (%)	整精米率 Head milled rice rate (%)	垩白率 Chalkiness rate (%)	长宽比 Length-width ratio	
高施肥 HF	碾压区	Rolled area	CK	43.56±1.02 d	72.67±1.20 c	26.89±1.26 d	46.87±1.36 a	2.70±0.10 a
			D1	58.00±1.76 a	78.11±1.39 a	44.44±1.26 a	35.17±0.25 d	2.60±0.10 a
			D3	54.67±1.53 b	72.89±1.17 c	39.22±1.02 b	36.80±0.36 c	2.57±0.06 a
			D7	50.67±1.33 c	75.44±1.50 b*	36.44±0.51 c	38.73±0.47 b	2.63±0.06 a
	非碾压区	Unrolled area	CK	42.22±1.02 c	71.33±1.20 b	26.22±1.26 b	46.67±1.36 a	2.63±0.06 a
			D1	56.33±1.76 a	74.78±0.69 a	43.11±1.26 a	34.97±0.25 c	2.70±0.10 a
			D3	54.56±1.39 ab	72.22±1.26 ab	41.56±1.64 a	36.83±0.35 b	2.63±0.06 a
低施肥 LF	碾压区	Rolled area	D7	51.89±2.04 b	71.22±2.14 b	41.22±1.50 a	37.43±0.68 b	2.63±0.06 a
			CK	50.33±0.88 b*	79.33±1.20 a	33.56±1.26 b	41.87±1.36 a	2.70±0.10 a
			D1	64.00±1.33 a*	80.33±0.67 a*	51.11±1.26 a	27.67±1.20 b	2.60±0.10 ab
			D3	62.11±1.39 a*	80.56±1.17 a*	50.89±1.35 a	27.80±0.46 b*	2.57±0.06 ab
	非碾压区	Unrolled area	D7	62.89±1.17 a*	79.78±0.51 a	51.33±1.67 a	26.83±0.31 b	2.53±0.06 b
			CK	45.22±1.07 b	72.00±1.20 a	33.56±1.26 b	41.87±1.36 a	2.70±0.10 a
			D1	58.11±1.17 a	78.00±0.33 ab	51.11±1.26 a	26.40±0.46 b	2.60±0.10 a
			D3	56.89±0.51 a	76.89±0.51 b	51.44±1.35 a	26.13±0.31 b	2.57±0.06 a
			D7	57.00±0.67 a	75.78±1.58 c	50.44±0.84 a	26.17±0.31 b	2.57±0.06 a
<i>F</i> 值	碾压处理	Rolling treatment(RT)	217.210***	151.270***	614.838***	1339.163***	2.133ns	
<i>F</i> value	试验地	Site(S)	62.710***	94.611***	2.623ns	7.863**	0.533ns	
	喷施处理	Spray treatmet(ST)	262.122***	22.171***	477.380***	721.732***	3.956*	
	碾压处理×试验地	RT×S	44.522***	7.916*	3.406ns	1.060ns	0.133ns	
	碾压处理×喷施处理	RT×ST	7.747***	4.457*	11.602***	36.999***	1.156ns	
	试验地×喷施处理	S×ST	0.703ns	3.061*	0.677ns	0.622ns	0.952ns	
	碾压处理×试验地×喷施处理	RT×S×ST	0.952ns	5.396**	0.005ns	1.336ns	0.756ns	



同一碾压处理, 不同小写字母表示喷施处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。

HF represents the high-fertility experimental field, and LF represents the low-fertility experimental field. Under the same rolling treatment, different lowercase letters indicate significant difference among the spraying treatment ($P < 0.05$).

图1 叶面肥施用时间对再生季叶片 SPAD 值的影响

Fig. 1. Effects of foliar fertilizer application timing on SPAD value of ratoon rice leaves

率, 而稻米的长宽比未受叶面施氮处理的影响。随着喷施时间的推迟, 各 FNF 处理的效果呈下降趋势, 但稻米长宽比在各处理间始终无显著差异。

在高施肥试验地, 碾压区各 FNF 处理的精米率和整精米率较 CK 显著提高, 增幅分别为 4.1%~14.4%和 9.5%~17.6%, 垩白率显著降低 8.1%~11.7%。在非碾压区, FNF 处理的精米率和整精米率较 CK 分别提高 1.0%~7.5%和 17.3%~17.8%, 垩白率显著降低 14.1%~15.3%; 其中, D1 处理下的糙米率显著提高 3.45%。

在低施肥试验地, 碾压区各 FNF 处理的精米率和整精米率较 CK 显著提高, 增幅分别为 9.7%~14.1%和 15.0%~16.9%, 垩白率显著降低 9.2%~11.7%, 糙米率在各处理间差异不显著。在非碾压区, FNF 处理的精米率和整精米率较 CK 显著提高 11.7%~12.9%和 16.9%~17.9%, 垩白率显著降低 15.5%~15.7%。

通过交互作用分析, 碾压处理、试验地、喷施处理, 以及碾压处理与喷施处理的交互作用, 对再生季稻米的外观品质(长宽比除外)影响达显著或极显著水平。试验地对整精米率的交互作用未达显著水平。碾压处理与试验地的交互作用对精米率和整精米率的影响达显著或极显著水平。试验地与喷施处理的交互作用, 以及碾压处理、试验地与喷施处理三者的交互作用, 对糙米率的影响达显著或极显著水平。

2.3 再生季苗期和孕穗期叶片 SPAD 值

叶面施氮(FNF)提高了水稻再生季苗期和孕穗期叶片的 SPAD 值, 且随喷施时间推迟, SPAD 值逐渐升高。

如图 1-A 所示, 苗期叶片 SPAD 值在 HF 试验地的碾压区中, D1 和 D3 处理与 CK 无显著差异, 而 D7 处理显著提升 7.6%; 在非碾压区, 各 FNF 处理较 CK 显著提升 4.1%~7.1%。在 LF 试验地, 碾压区和非碾压区表现一致, 各 FNF 处理较 CK 分别显著提升 2.0%~8.5%和 10.9%~13.6%。

如图 1-B 所示, 在 HF 试验地的碾压区中, 孕穗期叶片 SPAD 值显著提升, 其中 D7 处理增幅最大(14.8%); 在非碾压区, 各 FNF 处理较 CK 显著提高 6.5%~7.6%。在 LF 试验地, 碾压区与非碾压区表现一致, 各 FNF 处理间无显著差异, 但较 CK 分别显著提高 6.6%~8.2%和 5.0%~6.5%。

2.4 再生季叶片性状及叶面积指数

由表 3 可知, FNF 对剑叶长及再生季 LAI 的影响在不同试验地表现不一。在高施肥试验地, 碾压区与非碾压区的剑叶长增幅随施氮时间推迟而下降, 其中 D1 处理效果最佳, 碾压区和非碾压区剑叶长分别较 CK 显著增加 15.1%和 19.9%。在 LF 试验地, 各处理间剑叶长增幅无显著差异, 但均较 CK 显著提高, 增幅分别为 5.7%~14.2%和 5.1%~7.2%。

除高施肥试验地非碾压区各处理间无显著差异外, 随 FNF 时间推迟, LAI 增幅逐渐下降。在高施肥试验地碾压区, D1 处理较 CK 显著提高 11.8%。在 LF 试验地, 碾压区和非碾压区 D1 处理的 LAI 较 CK 分别显著提升 23.6%和 76.4%。

2.5 再生季稻桩的腋芽萌发数

在 HF 和 LF 试验地的碾压区中, 叶面施氮(FNF)显著提高了再生季稻桩的腋芽萌发数, 且随施氮时间推迟, 增幅逐渐下降并趋于稳定(图 2-A、B)。其中, D1 处理效果最佳, 分别较 CK 显著提高

表 3 叶面肥施用时间对再生季叶片性状及叶面积指数

Table 3. Effects of foliar fertilizer application timing on leaf traits and leaf area index of ratoon rice				剑叶长	剑叶宽	平均叶长	平均叶宽	LAI
试验地	碾压处理	喷施处理		Flag leaf length	Flag leaf width	Mean leaf length	Mean leaf width	
Site	Treatment	Spray-treatment		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	
高施肥 HF	碾压区 Rolled area	CK		20.17±0.96 b	0.91±0.05 b	24.43±0.79 b	1.10±0.12 a	1.78±0.14 b
		D1		23.22±0.42 a	1.04±0.05 a	27.11±0.72 a	0.96±0.02 b	1.99±0.09 a
		D3		21.21±0.45 b	0.91±0.05 b	28.10±0.75 a	0.88±0.08 b	1.75±0.09 b
		D7		20.23±0.50 b	0.92±0.08 b	18.69±1.43c	0.92±0.02 b	1.42±0.06 c
	非碾压区 Non-rolled area	CK		18.20±0.37 b	0.97±0.00 a	19.78±1.08 c	0.90±0.09 a	1.98±0.20 a
		D1		20.79±0.88 a	1.02±0.08 a	20.32±0.35 c	0.96±0.08 a	1.87±0.03 a
		D3		20.53±1.42 a	0.96±0.10 a	26.96±0.69 a	0.89±0.10 a	2.00±0.06 a
		D7		19.23±0.58 ab	0.99±0.08 a	23.97±1.79 b	1.02±0.02 a	1.90±0.05 a
低施肥 LF	碾压区 Rolled area	CK		20.62±1.05 b	1.06±0.07 a	25.21±0.87 a	1.12±0.12 a	1.40±0.07 b
		D1		24.72±0.96 a	0.92±0.05 b	25.84±0.62 a	0.94±0.02 b	1.61±0.07 a
		D3		23.76±0.60 a	1.04±0.02 a	26.51±0.73 a	0.97±0.06 b	1.73±0.09 b
		D7		24.49±0.99 a	0.96±0.08 ab	26.06±0.27 a	0.94±0.02 b	1.72±0.08 c
	非碾压区 Non-rolled area	CK		19.46±0.44 b	1.01±0.04 a	21.68±1.15 b	0.91±0.07 a	1.57±0.07 b
		D1		20.86±0.57 a	0.92±0.07 a	23.68±0.36 a	0.99±0.11 a	1.69±0.03 a
		D3		20.46±0.07 a	0.87±0.09 a	23.41±0.47 a	1.01±0.04 a	1.63±0.05 ab
		D7		20.79±0.62 a	0.90±0.09 a	23.69±0.37 a	0.99±0.11 a	1.66±0.03 a

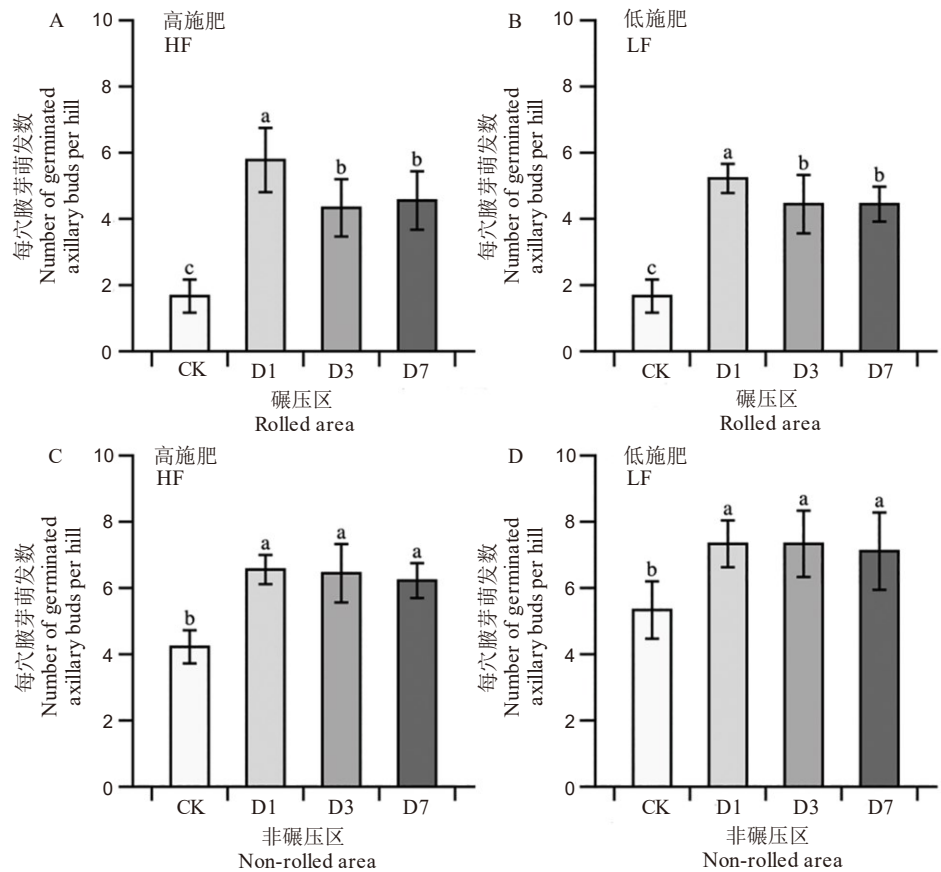


图 2 叶面肥施用时间对再生季稻桩的腋芽萌发数

Fig. 2. Effects of foliar fertilizer application timing on number of axillary bud germinations on ratoon rice stubble

3.5 倍和 3.1 倍, 表明碾压受损部分再生芽的萌发对 FNF 需求较为急迫。在非碾压区(图 2-C、D), HF 和 LF 试验地的腋芽萌发数也随 FNF 处理显著增加, 较 CK 分别提高 1.3~1.4 倍和 1.4~1.6 倍, 但各处理间差异不显著。

2.6 再生季有效穗数构成

由图 3 可知, 叶面施氮(FNF)增加了再生季水稻的有效穗数。在 HF 试验地碾压区, D1 处理增幅最大, 较 CK 显著提高 61.5%; 非碾压区各处理较 CK 显著提高 27.8%~30.6%, 但处理间差异不显著。

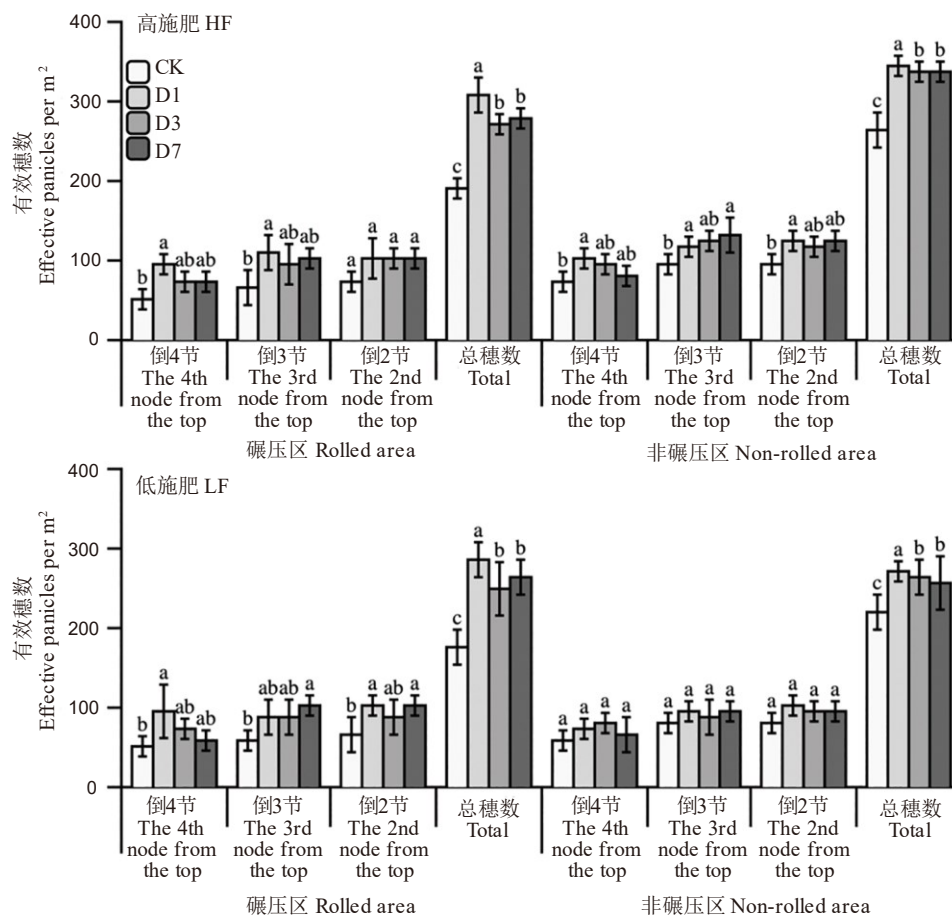


图3 叶面肥施用时间对再生季有效穗数构成

Fig. 3. Effects of foliar fertilizer application timing on composition of effective panicle number in ratoon rice

在 LF 试验地, 碾压区与非碾压区趋势一致, D1 处理下增幅最高, 分别较 CK 显著提高 62.5% 和 23.3%; 且碾压区增幅(50.0%~62.5%)整体高于非碾压区(16.7%~23.3%), 说明碾压区的有效穗数对喷施时间更为敏感。

再生季各节位有效穗数受喷施处理的影响亦存在差异。在 HF 试验地, 与 CK 相比, 碾压区 FNF 处理提高了各节位有效穗数。其中, 倒 4 节和倒 3 节的有效穗数随 FNF 时间推迟增幅降低, 倒 4 节增幅为 42.9%~85.7%, 倒 3 节为 44.4%~66.7%, D1 处理分别显著提高 85.7% 和 66.7%; 倒 2 节各处理间无显著差异。在非碾压区, 与 CK 相比, 倒 4 节 FNF 处理提高 10.0%~40.0%, 其中, D1 处理显著提高 40%; 倒 3 节各 FNF 处理有效穗数提高 23.1%~38.5%; 倒 2 节各处理间无显著差异, 但 D1 处理显著提高 30.8%。总体而言, FNF 对倒 4 节位的影响最大, 其次为倒 3 节和倒 2 节。

在 LF 试验地, 碾压区 FNF 处理各节位有效穗数均较 CK 有所提高, 且随 FNF 时间推迟增幅降低。其中, 倒 4 节 FNF 处理提高 14.3%~85.7%, D1 处

理提高 85.7%; 倒 2 节和倒 3 节各处理间无显著差异。总体来看, 碾压区 FNF 对倒 4 节位影响最大, 其次为倒 3 节和倒 2 节; 非碾压区则以倒 4 节影响最大, 其次为倒 2 节和倒 3 节。

2.7 再生季干物质质量积累

由图 4 可知, 在不同碾压情况下, 与 CK 相比, 叶面施氮(FNF)处理均显著提高了干物质量。在碾压区, 随着 FNF 时间的推迟, 干物质量呈先提高后降低的趋势; HF 和 LF 试验地 FNF 处理较 CK 分别显著提高 12.4%~28.6% 和 13.8%~20.7%, 其中 D1 处理效果最佳, 较 CK 分别提升 28.6% 和 20.7%。在非碾压区, 各 FNF 处理间干物质量无显著差异, HF 和 LF 试验地较 CK 分别显著提高 11.7%~13.4% 和 12.1%~12.5%。

2.8 再生季各因素间相关性分析

斯皮尔曼相关性分析(图 5)表明, 机械收割造成的碾压对再生季产量及产量构成因素、稻米品质及水稻生理表现整体负相关。其中, 碾压与产量、再生芽数、干物质量等指标显著负相关; 而 FNF 喷施时间与产量、结实率、整精米率等指标呈显著正相

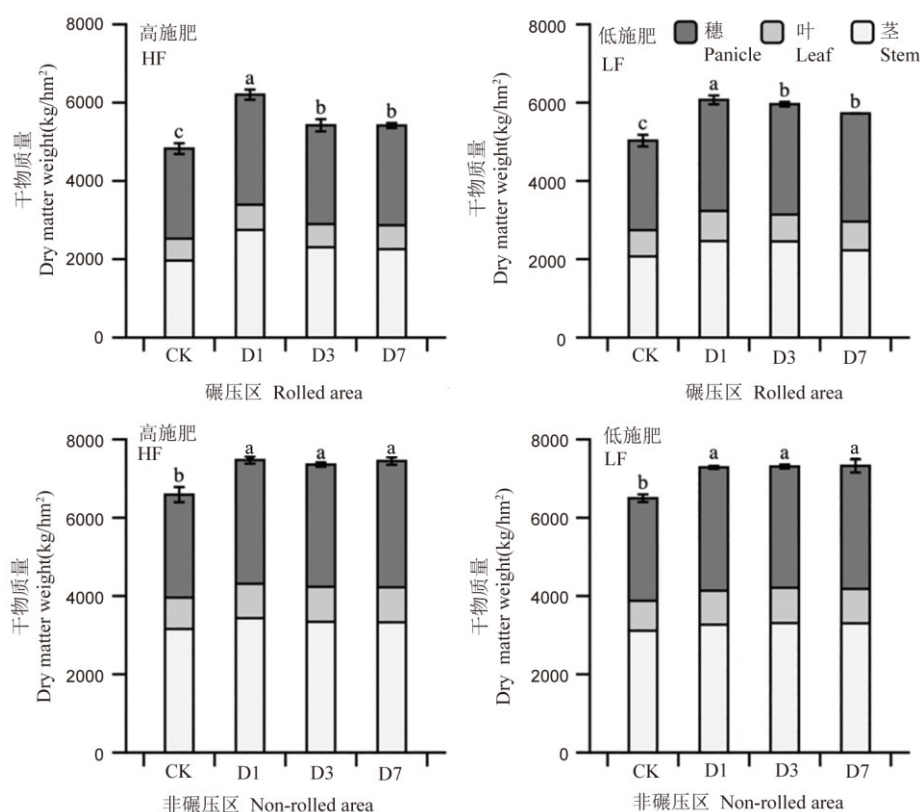


图4 叶面肥施用时间对再生季干物质质量积累

Fig. 4. Effects of foliar fertilizer application timing on dry matter accumulation of ratoon rice

关。进一步分析显示,产量主要受LAI、腋芽萌发数、有效穗数和结实率的显著影响;稻米品质整体受碾压、生理表现和干物质积累的影响,其中整精米率与LAI和SPAD值显著正相关。综上,机收碾压后,选择适宜的喷施时间进行FNF处理,可通过提高再生季水稻的生理活性和腋芽萌发数,进而形成更多有效穗数,最终实现再生季增产;同时,糙米率和整精米率也得以提升,且FNF处理在碾压区的促进效果较非碾压区更为显著。

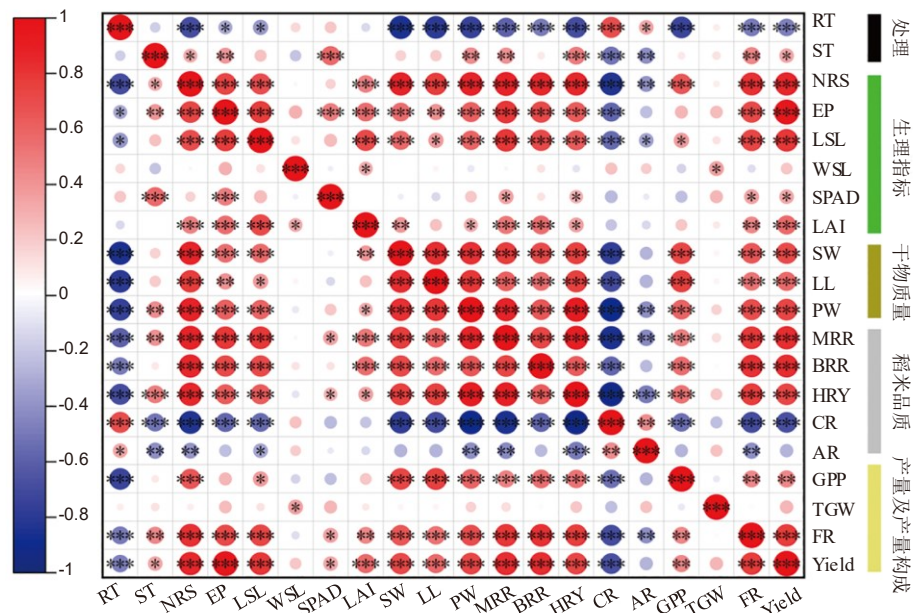
3 讨论

3.1 叶面施氮对再生季水稻生理特性及产量的影响

叶面肥常用于经济作物,多项研究已证实其能有效改善作物的农艺性状。其中,叶面施氮(FNF)的提效最为显著,应用也最为广泛^[16-17]。随着农业轻简化与机械现代化的推进,叶面施氮(FNF)在粮食作物中的应用也逐渐增多^[18-19]。作物的生长发育及干物质积累能力受叶片光合作用强度的影响^[20],而叶面积指数(LAI)和叶片SPAD值均是反映水稻光合能力的重要指标^[21]。研究表明,FNF不仅能显

著提高作物叶片SPAD值,芹菜提高1.8倍^[8],小麦提高5.13%^[22],玉米提高1.6倍^[23],水稻提高15.86%^[24];同时,对作物LAI影响也较大,对油菜的研究发现,不同氮含量配比下的FNF喷施处理,最高能使油菜LAI显著提高5.1%^[25]。本研究发现,FNF喷施处理下,再生季水稻叶片SPAD增幅为2%~13.6%(图1),LAI增幅为11.8%~76.4%,与前人研究结果类似,但变异较大,这与本研究中碾压情况和喷施时间不同有关,其中,碾压区表现出机收后当天喷施(D1)FNF效果最佳(表3),这可能是碾压导致留桩受损,影响叶片正常生长,而FNF作用效果很大程度上取决于叶片生长状况^[9-11]。

再生稻再生季主要通过腋芽萌发以实现再次收获,休眠芽受氮素养分供应影响显著,且高产栽培需要提高有效穗数^[3],籼稻优势再生节位为倒2、倒3节位,再生季产量贡献率可达70%,属于高节位再生型^[4]。本研究结果表明,再生季产量主要由倒2节和倒3节的有效穗数构成,其对再生季产量的贡献率达69.0%~76.1%。头季机收后喷施FNF,能有效提高再生季的有效穗数(16.7%~62.5%)、干物质(11.7%~28.6%)及产量(25.6%~82.8%),这与前人研究结果基本一致。究其原因,LAI与作物光合



GPP: 每穗粒数; TGW: 千粒重; FR: 结实率; NRS: 再生芽数; EP: 有效穗数; LSL: 剑叶长; WSL: 剑叶宽; SPAD: 孕穗期 SPAD; LAI: 叶面积指数; SW: 茎重; LW: 叶重; PW: 穗重; Yield: 产量; MRR: 整精米率; BRR: 糙米率; HRY: 整精米率; CR: 垩白率; AR: 长宽比; ST: 叶面喷施时间; RT: 碾压处理。其中, * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$ 。

GPP, Grains per panicle; TGW, Thousand grain weight; FR, Filled grain rate; NRS, Number of regenerated shoots; EP, Effective panicles; LSL, Length of flag leaf; WSL, Width of flag leaf; SPAD, SPAD value at booting stage; LAI, Leaf area index; SW, Stem weight; LW, Leaf weight; PW, Panicle weight; MRR, Milled rice ratio; BRR, Brown rice ratio; HRY, Head rice yield; CR, Chalkiness rate; AR, Aspect ratio; ST, Spray timing; RT, Rolling treatment. * indicates $P \leq 0.05$, ** indicates $P \leq 0.01$, and *** indicates $P \leq 0.001$.

图 5 不同叶面肥施用时间处理下再生季各因素间相关性分析

Fig. 5. Under various foliar fertilizer application timing on correlation analysis among various factors in ratoon rice

能力正相关,通过提高 LAI 是实现水稻高产栽培的有效途径之一^[26],且在关键的作物生长阶段,同时提高作物生理活跃时期叶面 SPAD 值也能有效增产^[27]。本研究中 FNF 喷施处理下,较高的叶片 SPAD 值与水稻再生季生理活跃时期相匹配,提高了再生季腋芽萌发数、有效穗数,并伴随着 LAI 的提高,增强了再生季光合作用能力,提高了再生季干物质积累,进而使得再生季产量得到显著提高。

然而,不同作物 FNF 的最佳喷施时间存在差异,进而导致其增产效果也各不相同。例如,陈嘉军等^[28]研究发现,小麦花后叶面施氮能延缓衰老、提高产量,其中花后 21 d 喷施较花后 7 d 喷施的氮素积累量、产量和氮素利用率增幅更大,产量增幅可达 10.9%。叶淑娟等^[29]则发现,在棉花盛蕾期、盛花期和盛铃期喷施 FNF,能通过促进棉铃结铃、增加果枝数,实现增产 37.3%~38.2%。蔡可为等^[13]研究表明,水稻灌浆后适量喷施 FNF,可使产量提高 2.8%。本研究中产量增幅变异较大(25.6%~82.8%),表明 FNF 的喷施效果不仅受作物种类影响,还可能与其生长状况密切相关。机收碾压受损区域与非碾压区域表现出不同的适宜喷施时期:碾

压区在机收后 1 d 内喷施增产效果最佳,而非碾压区在机收后 7 d 内喷施均可。因此,在研发碾压识别技术以实现无人机精准施肥时,需对不同碾压情况加以区别对待。综上,头季机收后根据碾压情况选择适宜时间喷施 FNF,是实现再生稻机收后高产栽培的有效途径之一。

3.2 叶面施氮对再生季稻米品质的影响

叶面施氮被证明能有效改善作物品质。Pannico 等^[30]研究发现,榛子喷施 FNF 后脂肪含量提高 4.3%,蛋白质含量增加 31.8%。张钧浩^[12]通过对小麦花后喷施 FNF,使小麦籽粒蛋白质含量提高 9.9%,有效改善了籽粒品质。董洪瑞等^[31]则发现,FNF 显著提高水稻整精米率 2.21%,显著降低垩白率 50.01%。宋聪等^[32]研究表明,FNF 能使水稻糙米率提高 3.28%~5.29%,精米率提高 3.50%~6.45%。

本研究发现,头季机收后喷施 FNF 能显著提高再生季稻米的整精米率(9.5%~17.8%),显著降低垩白率(8.1%~15.7%),与前人研究结果基本一致。其原因在于,FNF 喷施可延缓作物叶片衰老进程,延长灌浆时长^[33],使籽粒灌浆更加饱满,从而提高整精米率、降低垩白率,进而改善再生季稻米品质。

然而,再生稻整精米率最高仅约50%,垩白率接近40%(表2),表明再生季稻米碎米率高、垩白率高的问题仍较为突出,品质尚有较大提升空间。

此外,对比碾压区与非碾压区可知,随着FNF喷施时间推迟,稻米品质呈下降趋势。这是由于机械碾压叶片、叶肉细胞受损,且喷施时间越晚,使FNF难以充分发挥作用^[34]。因此,选择适宜时间喷施FNF也是再生稻机收后提升品质的有效途径之一。与产量结果(3.1部分)类似,碾压区宜在机收后当日喷施,非碾压区则在机收后7 d内喷施均可。

4 结论

再生稻头季机械收割后FNF能有效提高再生季叶片SPAD值、叶面积指数、干物质量及有效穗数、再生季产量和品质;其中,不同碾压情况下产量显著提高25.6%~82.8%,同时显著提高整精米率(9.5%~17.9%)和显著降低垩白率(8.1%~15.7%)。头季机收后的不同碾压条件下,FNF最适喷施时间存在差异,非碾压区,机收7日内均能显著提高再生季的产量和品质;而碾压区,机收当日是最佳喷施时间。综上,再生稻头季机收后喷施FNF是增产增效的有效措施,应该大力推广,同时应该根据不同碾压情况选择适宜时间喷施FNF。

参考文献:

- [1] Liu B, Yuan S, Peng S. A synthesis analysis of the relationship between main and ratoon crop grain yields in ratoon rice[J]. *Agronomy*, 2024, 14(9): 2170.
- [2] Xu F, Zhang L, Zhou X, Guo X, Zhu Y, Liu M, Xiong H, Jiang P. The ratoon rice system with high yield and high efficiency in China: Progress, trend of theory and technology[J]. *Field Crops Research*, 2021, 272: 108282.
- [3] 宋美芳, 刘莉, 冉娇, 邹家龙, 李继福, 吴启侠, 朱建强. 南方再生稻高产理论与技术发展趋势[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(22): 26-27, 37.
Song M F, Liu L, Ran J, Zou J L, Li J F, Wu Q X, Zhu J Q. High-yielding theory and technology development trend of southern ratoon rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(22): 26-27, 37. (in Chinese with English abstract)
- [4] 汪浩, 张强, 张文地, 李思宇, 黄健, 朱安, 刘立军. 腋芽萌发能力对再生稻产量影响的研究进展[J]. *中国水稻科学*, 2020, 34(3): 205-216.
Wang H, Zhang Q, Zhang W D, Li S Y, Huang J, Zhu A, Liu L J. Advances in the effects of the ability of axillary bud germination on grain yield in ratoon rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(3): 205-216. (in Chinese)
- [5] 陈斌. 再生稻全程机械化高产栽培技术[J]. *杂交水稻*, 2019, 34(3): 44-46.
- Chen B. High-yielding cultivation techniques of ratoon rice with whole process mechanization operation[J]. *Hybrid Rice*, 2019, 34(3): 44-46. (in Chinese with English abstract)
- [6] Ding Z, Li J, Hu R, Xiao D, Huang F, Peng S, Huang J, Li C, Hou J, Tian Y, Zhou J, Cao B. Root-zone fertilization of controlled-release urea reduces nitrous oxide emissions and ammonia volatilization under two irrigation practices in a ratoon rice field[J]. *Field Crops Research*, 2022, 287: 108673.
- [7] Ding Z, Li J, Huang F, Hu R, Peng S, Huang J, Hou J, Zhou J, Li C, Su B, Xu M. One-time root-zone fertilization of controlled-release urea increases nitrogen use efficiency while reducing nitrogen loss risk in a ratoon rice field under two irrigation practices[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2024, 128(1): 13-33.
- [8] 陈晨, 陈雪琼, 陈月珍, 冯顾城, 束胜, 王翔翔, 陶建平, 谭国飞, 陈姝妍, 刘佩卓, 王雅慧, 熊爱生. 叶面施氮对芹菜叶绿素含量及代谢有关基因表达的影响[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(8): 1533-1542.
Chen C, Chen X Q, Chen Y Z, Feng G C, Shu S, Wang L X, Tao J P, Tan G F, Chen S Y, Liu P Z, Wang Y H, Xiong A S. Effects of foliar application of nitrogen fertilizer on chlorophyll content and expression of metabolism-related genes in celery[J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(8): 1533-1542. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhang Q, Brown P H. The mechanism of foliar zinc absorption in pistachio and walnut[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1999, 124(3): 312-317.
- [10] Amanullah, Yasir M, Khalil S K, Jan M T, Khan A Z. Phenology, growth, and grain yield of maize as influenced by foliar applied urea at different growth stages[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, 33(1): 71-79.
- [11] Yadav K, Singh S P, Yadav D K, Yadav K G, Singh K, Yadav M. Influence of phosphorous and foliar nitrogen on the growth, quality and yield of kasuri methi (*Trigonella corniculata*)[J]. *Legume Research*, 2024, 47(8): 1306-1312.
- [12] 张钧浩. 后期叶面追氮对小麦产量、品质及氮素吸收利用的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
Zhang J H. Effects of late foliar N application on yield, quality and N uptake and utilization of wheat[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [13] 蔡可为, 陈兴良. 水稻抽穗灌浆后喷施尿素对茎叶及籽粒氮素吸收的影响[J]. *北方水稻*, 2019, 49(5): 33-34.
Cai K W, Chen X L. Effect of nitrogen absorption on stems, leaves and seeds when spraying urea after rice tassel and grout[J]. *North Rice*, 2019, 49(5): 33-34. (in Chinese with English abstract)
- [14] Delfim J, Dameto L S, Moraes L A C, Moreira A. Nitrogen and nickel foliar application on grain yield, yield components, and quality of soybean[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2022, 53(10): 1226-1234.
- [15] 孙钰林. 不同施氮量和留桩高度对再生稻产量及氮肥利用率的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
Sun Y L. Effects of different nitrogen application rates and piling height on ratooning rice yield and nitrogen use efficiency[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)

- [16] Garde-Cerdan T, Gutiérrez-Gamboa G, Pérez-Álvarez E P, Rubio-Bretón P. Foliar application of methyl jasmonate to Graciano and Tempranillo vines: Effects on grape amino acid content during two consecutive vintages[J]. *OENO One*, 2019, 53(1): 1-9.
- [17] Ishfaq M, Kiran A, ur Rehman H, Farooq M, Ijaz N H, Nadeem F, Azeem I, Li X, Wakeel A. Foliar nutrition: Potential and challenges under multifaceted agriculture[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 200: 104909.
- [18] Lončarić Z, Ivezić V, Kerovec D, Rebekić A. Foliar zinc-selenium and nitrogen fertilization affects content of Zn, Fe, Se, P, and Cd in wheat grain[J]. *Plants*, 2021, 10(8): 1549.
- [19] Rodrigues V A, Crusciol C A C, Bossolani J W, Portugal J R, Moretti L G, Bernart L, Vilela R G, Galeriani T, Lollato R P. Foliar nitrogen as stimulant fertilization alters carbon metabolism, reactive oxygen species scavenging, and enhances grain yield in a soybean-maize rotation[J]. *Crop Science*, 2021, 61(5): 3687-3701.
- [20] 朱启东, 聂军, 廖育林, 鲁艳红, 李东晖, 高雅洁, 谢雪. 翻压紫云英对早稻产量、干物质积累及光合特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(6): 158-166.
Zhu Q D, Nie J, Liao Y L, Lu Y H, Li D H, Gao Y J, Xie X. Effect of pulverized milk vetch on yield, dry matter accumulation and photosynthetic characteristics of early rice[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(6): 158-166. (in Chinese)
- [21] Jiang S, Du B, Wu Q, Zhang H, Zhu J. Increasing pit-planting density of rice varieties with different panicle types to improves sink characteristics and rice yield under alternate wetting and drying irrigation[J]. *Food and Energy Security*, 2023, 12(1): e335.
- [22] El-Sanatawy A M, Ash-Shormillesy S M A I, Abou El-Yazied A, El-Gawad H G A, Azab E, Gobouri A A, Sitohy M, Osman A. Enhancing grain yield and nitrogen accumulation in wheat plants grown under a Mediterranean arid environment by foliar spray with papain-released whey peptides[J]. *Agronomy*, 2021, 11(10): 1913.
- [23] Fan X, Zhao W, Li J. Dynamic responses of physiological indexes in maize leaves to different spraying fertilizers at varying concentrations[J]. *Irrigation Science*, 2023, 41(2): 309-320.
- [24] Danso O P, Wang Z, Zhang Z, Niu S, Wang Y, Wu G, Wang X, Zheng L, Dai J, Yin X, Zhu R. Effects of foliar selenium, biochar, and pig manure on cadmium accumulation in rice grains and assessment of health risk[J]. *Environmental Research*, 2024, 256: 119160.
- [25] Jarecki W. The reaction of winter oilseed rape to different foliar fertilization with macro- and micronutrients[J]. *Agriculture*, 2021, 11(6): 515.
- [26] Hirooka Y, Homma K, Kodo T, Shiraiwa T, Soben K, Chann M, Tsujimoto K, Tamagawa K, Koike T. Evaluation of cultivation environment and management based on LAI measurement in farmers' paddy fields in Pursat Province, Cambodia[J]. *Field Crops Research*, 2016, 199: 150-155.
- [27] Lin F F, Qiu L F, Deng J S, Shi Y Y, Chen L S, Wang K. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 71: S60-S65.
- [28] 陈嘉军, 林祥, 谷淑波, 王威雁, 张保军, 朱俊科, 王东. 花后叶面喷施尿素对冬小麦氮素吸收利用和产量的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49(1): 277-285.
Chen J J, Lin X, Gu S B, Wang W Y, Zhang B J, Zhu J K, Wang D. Effects of foliar spraying of urea post anthesis on nitrogen uptake and utilization and yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(1): 277-285. (in Chinese with English abstract)
- [29] 叶淑娟, 张宁, 成芳, 张成龙, 隋鲁鹏, 吴碧波, 巩养仓, 贺云新, 魏尚职, 屠小菊, 刘爱玉, 周仲华. 不同叶面肥喷施处理对棉花生长及产量品质的影响[J/OL]. *江苏农业科学*, 2024, 52(22): 90-96.
Ye S J, Zhang N, Cheng F, Zhang C L, Sui L P, Wu B B, Gong Y C, He Y X, Wei S Z, Tu X J, Liu A Y, Zhou Z H. Effects of different foliar fertilizer spraying treatments on cotton growth, yield and quality[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(22): 90-96. (in Chinese with English abstract)
- [30] Pannico A, Modarelli G C, Stazi S R, Giaccone M, Romano R, Rouphael Y, Cirillo C. Foliar nutrition influences yield, nut quality and kernel composition in hazelnut cv mortarella[J]. *Plants*, 2023, 12(11): 2219.
- [31] 董洪瑞, 朱杰, 周勇, 李皓轩, 杨伟, 蒋梦蝶, 朱波, 聂江文, 刘章勇. 穗肥施钾量和叶面肥对稻虾共作水稻生理特性、产量和品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2024, 53(5): 30-39.
Dong H R, Zhu J, Zhou Y, Li H X, Yang W, Jiang M D, Zhu B, Nie J W, Liu Z Y. Effects of panicle potassium fertilizer rates and foliar fertilizer on rice physiological characteristics, yield and quality under crayfish-rice integrated system[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(5): 30-39. (in Chinese with English abstract)
- [32] 宋聪. 叶面喷施氨基酸对香稻产量、品质和香气的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
Song C. Effects of foliar spraying of amino acids on yield, quality and aroma of fragrant rice[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [33] 闫政东, 郭平毅, 原向阳, 肖晓璐, 王东明. 叶面喷施氮肥对张杂谷 10 号光合特性及产量的影响[J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2018, 38(2): 37-41.
Yan Z D, Guo P Y, Yuan X Y, Xiao X L, Wang D M. Effect of foliar application of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of foxtail millet cultivar Zhangzagu 10 *Setaria italic*(L.) Beauv[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2018, 38(2): 37-41. (in Chinese with English abstract)
- [34] 王春晓, 郑永美, 矫岩林, 陈静, 李文金, 赵玉成, 华伟, 解晓梅, 孙学武, 于天一, 沈浦, 吴正锋, 王才斌. 以 ^{15}N 示踪技术分析叶面施氮对花生氮素吸收、分配及利用率的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2024, 46(4): 881-888.
Wang C X, Zheng Y M, Jiao Y L, Chen J, Li W J, Zhao Y C, Hua W, Xie X M, Sun X W, Yu T Y, Shen P, Wu Z F, Wang C B. Effects of foliar topdressing of labeled urea(^{15}N) on nitrogen absorption, distribution and utilization of peanut[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2024, 46(4): 881-888. (in Chinese with English abstract)