

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.01.007

刘晓淑, 侯翠红, 陈新平, 等. 无机包裹缓释肥对水稻生长与氮肥利用的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(1): 83-92.

无机包裹缓释肥对水稻生长与氮肥利用的影响

刘晓淑^{1,2}, 侯翠红^{2,3}, 陈新平¹, 丁茂^{2,4},
束维正^{2,4}, 王孟来⁵, 井红权³, 张务帅¹

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 绿色智能复合肥研究院, 合肥 230001;
3. 郑州大学 化工学院, 郑州 450001; 4. 中盐安徽红四方肥业股份有限公司, 合肥 230001;
5. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 昆明 650699

摘要: 研究地上、地下养分供需匹配、保障产量和提高氮肥利用效率的一次性施肥产品及配套施用技术, 是现代化、规模化、轻简化水稻生产的迫切需求。本文探究无机包裹型缓释肥一次性施用技术, 为水稻养分高效吸收和管理精准轻简的施肥策略提供理论依据。采用盆栽试验, 设置 4 个处理: 不施肥(CK)、常规分次施肥(FP)、一次性施用无机包裹型缓释肥料(DF)和减量 20% 一次性施用无机包裹型缓释肥料(JF), 比较水稻生长发育、花前花后干物质及氮素积累转移、产量、土壤无机氮动态变化特征和氮肥利用率的差异。结果表明: 一次性施无机包裹型缓释肥 DF 处理水稻产量达 8 403.57 kg/hm², 较常规施肥 FP 处理增产 13.02%, 减量 20% 一次性施无机包裹型缓释肥 JF 处理与 FP 处理产量差异不显著。DF 处理可在改善花前干物质转运量的同时提高花后干物质量, 花后干物质量对籽粒产量的贡献率较 FP 处理提高 16.18%。DF、JF 处理促进了水稻根系的发育, 分蘖期总根长达 455.84~530.42 cm, 较 FP 处理提高 12.13% 和 30.48%。整个生育期内 DF、JF 处理土壤无机氮浓度(59.45~14.96 mg/kg)始终高于 FP 处理(55.84~12.71 mg/kg)。DF 处理较 FP 处理氮肥农学效率显著提高 23.01%、当季回收率显著提高 63.80%、氮肥偏生产力显著提高 13.01%。一次性基施无机包裹型缓释肥料可实现水稻增产, 氮肥利用率显著提高, 为水稻高产高效和轻简化栽培提供了增效肥料产品和可行性施肥策略。

关键词: 水稻; 缓释氮肥; 氮素积累转移; 根系形态;

氮肥利用率

中图分类号: S511

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)01-0083-10

Effect of Inorganic Encapsulated Slow-Release Fertilizer on Rice Growth and Nitrogen Fertilizer Utilization

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2023YFD1700203); 国家磷资源开发利用工程技术研究中心开放基金资助项目(NECP2022-02)。

作者简介: 刘晓淑, 硕士研究生, 主要从事绿色智能复合肥研发应用研究。

通信作者: 张务帅, 副教授, 硕士生导师。

LIU Xiaoshu^{1,2}, HOU Cuihong^{2,3}, CHEN Xinping¹,
DING Mao^{2,4}, SHU Weizheng^{2,4}, WANG Menglai⁵,
JING Hongquan³, ZHANG Wushuai¹

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Green Intelligent Compound Fertilizer Research Institute, Hefei 230001, China;

3. College of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

4. China Salt Anhui Hongsifang Fertilizer Industry Co. Ltd, Hefei 230001, China;

5. National Engineering and Technology Research Center for Development & Utilization of Phosphate Resources, Kunming 650699, China

Abstract: Research on disposable fertilizer products and supporting application technologies that match nutrient supply and demand above and below the ground of plant, safeguard yields and improve nitrogen fertilizer utilization efficiency is an urgent need for modernized, scaled-up, and light-simplified rice production. This paper explores the one-time application technology of inorganic encapsulated slow-release fertilizer to provide a theoretical basis for the strategy of fertilizer application for highly efficient absorption of nutrient, and environmentally friendly and precise and light management of rice. In this study, we used the pot experiment method and set up four fertilizer treatments: no fertilization (CK), conventional split fertilization (FP), one-time application of inorganic encapsulated slow-release fertilizer (DF) and 20% reduced one-time application of inorganic encapsulated slow-release fertilizer (JF), to compare the differences in growth and development of rice, dry matter and nitrogen accumulation and transfer pre-flowering and post-flowering, yields, the characteristics of soil inorganic nitrogen dynamics, and the efficiency of nitrogen fertilizer utilization. The results showed that the rice yield of one-time application of inorganic encapsulated slow-release fertilizer DF treatment reached 8 403.57 kg/hm², increased by 13.01% compared with conventional split fertilization FP treatment, while the yield of 20% reduced one-time application of inorganic encapsulated slow-release fertilizer JF treatment was not significantly different from that of the FP treatment. DF treatment could improve the pre-flowering dry matter transfer and the post-flowering dry matter production. The contribution of the post-flowering dry matter production to the yield of grains was 16.84% higher than that of the FP. DF and JF treatments promoted the development of rice root system, and the total root length at tillering stage reached 455.84–530.42 cm, which was 12.13% and 30.48% higher than that of FP, respectively. The soil inorganic N concentration of DF and JF treatments (59.45–14.96 mg/kg) was always higher than that of FP (55.84–12.71 mg/kg) in the whole growth period. Compared to FP, the agronomic efficiency of nitrogen fertilizer, the recovery rate of the current season and the bias productivity of nitrogen fertilizer of DF treatment was significantly higher by 23.01%, 63.80% and 13.01%, respectively. One-time basal application of inorganic encapsulated slow-release fertilizer can achieve increased rice yield and significantly improved nitrogen utilization, providing fertilizer products and feasible fertilizer application strategies for high-yield, high-efficiency and light-simplified production of rice.

Key words: rice; slow-release nitrogen fertilizer; nitrogen accumulation and transfer; root morphology; nitrogen fertilizer utilization

我国 60% 的人口以稻米为主食, 水稻种植面积占全国粮食种植总面积的 25.8%, 分别占全球水稻种植面积和产量的 19% 和 28%^[1]。在我国, 水稻氮肥施用最普遍的方法是基肥加多次追施尿素, 且多采用表面撒施的施肥方式^[2], 一方面会导致温室气体排放^[3]、径流损失污染水体^[4-8]和肥料利用率低(利用率仅 25%~35%) 等问题^[9]。另一方面, 随着土地集中流转和水稻集约化种植模式的发展, 更加轻简高效的施肥模式亟待应用。因此, 基于水稻稳产、氮肥高效的一次性施肥技术研究具有重要的现实意义。

缓/控释肥料可根据作物需求规律缓慢释放养分^[10], 一次施肥可满足作物整个生育期的养分需求^[11-12]。前期我国在水稻栽培上开展了大量缓/控释肥料研究, 主要包括两类: 一是单施缓/控释肥, 如树脂包膜尿素、硫包膜尿素、无机包裹型缓释肥等; 二是酰胺缓/控释氮肥与尿素搭配一次性施用。前人大量研究表明, 一次性施缓/控释肥料在降低劳动成本的同时可提高水稻产量和肥料利用率, 降低稻田 N₂O 排放和 NH₃ 挥发^[11-15]。然而, 也部分存在一次施肥较分次施肥产量有所降低的情况, 造成这种差异的原因可能是所选用的缓/控释肥料养分释放速率与水稻需求不匹配, 存在前期供应过量或后期供应不足的现象^[16]。

无机包裹型缓释肥采用肥料包裹肥料的工艺原理, 以颗粒状氮肥(尿素、硝铵)为核心, 采用枸溶性磷肥或含有植物营养成分的固体缓释剂作为包裹材料, 其包裹材料高效环保, 肥料配方可调节^[17]。固体缓释剂与含有植物营养成分的反应性液体黏结剂, 在包裹过程中产生化学反应, 生成细小的水不溶性化合物, 从而形成致密的包裹层, 实现氮肥的缓释^[18]。谢建昌在江苏溧阳进行的无机包裹型缓释肥水稻肥效试验表明, 在投入常规肥料 $\frac{2}{3}$ 用量的情况下达到了相近的水稻产量, 氮肥利用率比常规施肥提高 12.82%^[18]。我国水稻分次施肥多采用人工撒施的方式, 不符合现代规模化、机械化生产的高效轻简需求; 同时, 一次性施肥技术仍存在肥料氮素供应与水稻养分需求不完全匹配问题。因此, 针对巢湖流域水稻设计水稻专用无机包裹型缓释肥料配方, 一次性施用对实现水稻稳产和氮肥高效具有重要意义。

研究表明, 花后氮素供应与作物高产呈正相关关系^[19-20], 花后氮素累积也是评估肥料氮素缓释性能与作物氮素吸收规律是否匹配的关键。本研究以农户常规施肥作对比, 基于水稻养分需求规律, 创新一次性基施无机包裹型缓释肥料技术, 比较其对水稻地上、地下生长与氮肥利用效率的影响, 拟为水稻轻简高效养分管理策略提供理论依据与产品技术选择方案。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2022 年 6 月至 10 月在安徽农业大学皖中综合试验站(安徽省庐江县北圩村)(31°29'26"N, 117°13'46"E)开展。该站位于巢湖流域, 属亚热带季风气候区。供试土壤类型为水稻土。理化性质为: 有机质 9.35 g/kg、铵态氮 2.75 mg/kg、硝态氮 11.35 mg/kg、有效磷 19.67 mg/kg、速效钾 38.4 mg/kg、pH 值为 6.7。土壤风干后过 5 mm 筛留存备用。研究地点种植制度为水稻—小麦轮作。

1.2 试验设计

试验设 4 个处理: ① CK, 不施肥; ② FP, 当地常规施肥, 氮肥基追比为 6:3:1; 磷钾肥全部基施; ③ DF, 与常规施肥等养分一次性基施无机包裹型缓释肥; ④ JF, 养分投入减少 20% 一次性基施无机包裹型缓释肥。每个处理共 9 个重复, 每次破坏性取 3 个重复。盆栽使用白色塑料桶(上口径 47×高 50×底 35 cm)。土深 45 cm, 约 50 kg, 先装土 25 cm 深, 基肥与上层 20 cm 土壤混匀后再装入盆中, 浇水浸泡 2 d, 浸泡后土壤沉降约 40 cm。每桶移栽水稻 5 穴, 每穴 1 株。每桶肥料施用量依据田间实际施肥量 N 187.5 kg/hm²、P₂O₅ 67.5 kg/hm²、K₂O 75 kg/hm², 按照桶内土壤的上表面积(直径 42 cm, 约等于 0.14 m²)计算。FP 处理基肥施用: 复合肥 5.25 g、尿素 1.37 g、氯化钾 0.18 g, 分蘖肥施尿素

1.71 g, 穗肥施尿素 0.57 g, 两次追肥采用表面撒施的方式; DF 处理一次性基施无机包裹缓释肥 10.5 g; JF 处理一次性基施无机包裹缓释肥 8.4 g。其他种植管理按当地种植管理方式。水稻移栽和收获时间分别为 2022 年 6 月 18 日和 2022 年 10 月 29 日。不同处理施肥种类及施用量见表 1。

表 1 不同处理施肥种类和施肥量

处理	基肥/(kg·hm ⁻²)			分蘖肥/ (kg·hm ⁻²)		穗肥/ (kg·hm ⁻²)		合计/ (kg·hm ⁻²)		
	无机包裹 型缓释肥	复合肥	尿素	氯化钾	尿素	尿素	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
FP	0	375	97.8	12.5	122.3	40.8	187.5	67.5	75	
DF	750	0	0	0	0	0	187.5	67.5	75	
JF	600	0	0	0	0	0	150	54	60	

1.3 试验材料

供试肥料为水稻无机包裹型缓释肥(简称 ICCRCF), 由郑州大学化工学院磷肥与复肥研究所提供, 是以钙镁磷肥为包裹层, 多层包裹粒状尿素而制得的缓释肥料^[18], 依据巢湖流域水稻施肥需求, 配方设计为 N-P₂O₅-K₂O: 25-9-10 的水稻无机包裹型缓释肥。常规施肥处理施用常规复合肥(N-P₂O₅-K₂O: 18-18-18), 尿素(含 N 46%), 氯化钾(含 K₂O 60%)。供试水稻品种为‘荃香 19’。

1.4 样品采集与测定

水稻分蘖期、扬花期、成熟期整桶破坏性齐根收取水稻地上部。用烘箱 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重, 测定生物量(成熟期分为秸秆和穗部两部分); 然后取部分烘干的植物样品粉碎用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮法测定氮素含量。在分蘖期将水稻根系无损取出清洗干净, 用中晶 MICROTEK 扫描仪扫描根系形态。水稻成熟期用土钻五点取样法分别取 0~20 cm 和 20~40 cm 土样。土样鲜样采用靛酚蓝比色法和紫外分光光度法分别测定铵态氮含量和硝态氮含量, 同时采用烘干法测定土壤含水量。

产量测定: 水稻成熟时测定每盆的有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量。每个重复单独脱粒烘干称重并换算成 14% 的含水量作为产量。

1.5 数据计算方法

花前营养器官氮素向籽粒转运量(Y_{Ntra} , g/株)、花前营养器官氮素转运量对籽粒氮素积累量的贡献率(Y_{Ctra} , %)、花后氮素生产量(Y_{Npost} , g/株)和花后氮素生产量对籽粒氮素积累量的贡献率(Y_{Cpost} , %)的计算式如下:

$$Y_{Ntra} = Y_{Npre} - Y_{Nhar}$$

$$Y_{Ctra} = \frac{Y_{Ntra}}{Y_{Ngrain}} \times 100\%$$

$$Y_{Npost} = Y_{Ntotal} - Y_{Nsilk}$$

$$Y_{Cpost} = \frac{Y_{Npost}}{Y_{Ngrain}} \times 100\%$$

式中: Y_{Npre} 为扬花期植株氮素积累量, Y_{Nhar} 为成熟期秸秆氮素积累量, Y_{Ngrain} 为成熟期籽粒氮素积累量, Y_{Ntotal} 为成熟期地上部氮素积累量, Y_{Nsilk} 为扬花期地上部氮素积累量, 单位均为 g/株^[19]。

氮肥农学效率(Y_{NAE} , kg/kg)、氮肥吸收利用率(Y_{NUE} , %)和氮肥偏生产力(Y_{NFPF} , kg/kg)的计算式如下:

$$Y_{NAE} = \frac{Y_N - Y_0}{Y_{Nrate}}$$

$$Y_{\text{NUE}} = \frac{T_{\text{N}} - T_0}{Y_{\text{Nrate}}} \times 100\%$$

$$Y_{\text{NFPF}} = \frac{Y_{\text{N}}}{Y_{\text{Nrate}}}$$

式中: Y_{N} 为施氮处理籽粒产量 (kg/hm^2); Y_0 为不施氮处理籽粒产量 (kg/hm^2); Y_{Nrate} 为施氮量 (kg/hm^2); T_{N} 为施氮处理植株氮素累积量 (kg/hm^2); T_0 为不施氮处理植株氮素累积量 (kg/hm^2)。

1.6 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2019 进行处理。数据统计分析软件采用 SPSS 21, 利用单因素方差分析 Duncan 法进行显著性分析。使用 Origin 2023 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻产量及其构成因素的影响

对水稻产量及其构成因素分析(表 2)可知, 一次性施无机包裹型缓释肥 DF 处理水稻产量最高, 达 $8\,403.57\text{ kg}/\text{hm}^2$, 较常规施肥 FP 处理显著提高 13.02%, 减量 20% 一次性施无机包裹型缓释肥 JF 与 FP 处理产量无显著差异; 对产量构成因素分析发现, DF 和 JF 处理有效穗数较 FP 处理分别显著提高 28.57% 和 14.29%; DF 较 FP 处理总颖花量显著提高 21.59%; 各处理穗粒数、结实率和千粒质量无显著差异。

表 2 不同处理水稻产量及其构成因素

处理	产量/ ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	有效穗数/ (穗 $\cdot \text{株}^{-1}$)	穗粒数/ 个	总颖花量/ ($\times 10^3 \cdot \text{株}^{-1}$)	结实率/ %	千粒质量/ g
CK	$9.05 \pm 2.16\text{c}$	$4 \pm 0.12\text{c}$	$112 \pm 31.71\text{a}$	$0.43 \pm 0.12\text{c}$	$82.60 \pm 3.06\text{a}$	$25.09 \pm 2.54\text{a}$
FP	$20.82 \pm 0.86\text{b}$	$7 \pm 0.40\text{b}$	$123 \pm 11.95\text{a}$	$0.88 \pm 0.05\text{b}$	$86.40 \pm 7.03\text{a}$	$26.42 \pm 0.41\text{a}$
DF	$23.53 \pm 1.42\text{a}$	$9 \pm 0.20\text{a}$	$126 \pm 9.67\text{a}$	$1.07 \pm 0.06\text{a}$	$88.90 \pm 3.47\text{a}$	$27.71 \pm 1.52\text{a}$
JF	$20.96 \pm 0.86\text{ab}$	$8 \pm 0.20\text{a}$	$119 \pm 11.93\text{a}$	$0.99 \pm 0.07\text{ab}$	$86.67 \pm 6.07\text{a}$	$26.49 \pm 3.22\text{a}$

注: 同列数据后无相同字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同处理对水稻地上部生物量及氮素累积量的影响

由图 1a 可知: 不同处理水稻地上部生物量在分蘖期无显著性差异; 分蘖期至扬花期各处理生物量大幅增加; 扬花期各施肥处理 FP、DF 和 JF 地上部生物量无显著差异; 成熟期 DF 处理地上部生物量最高, 较 FP 和 JF 处理分别显著提高 17.25% 和 14.63%, JF 和 FP 处理较 CK 分别显著提高 97.06% 和 101.57%。

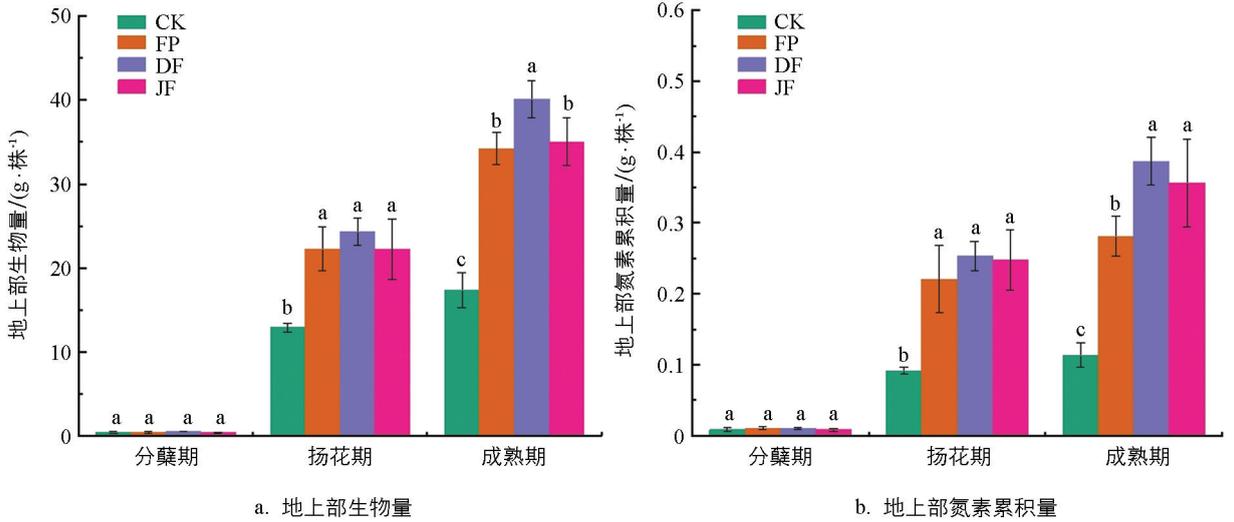
由图 1b 可知: 地上部氮素累积量在分蘖期无显著差异; 扬花期 3 个施肥处理 FP、DF 和 JF 地上部氮素累积量无显著差异; 成熟期两个一次性施用无机包裹型缓释肥 DF、JF 处理的地上部氮素累积量最高, 较 FP 处理分别显著提高 37.86% 和 27.14%。

2.3 不同处理对水稻花前花后生物量和氮素累积的影响

各处理水稻花后生物量生产量对产量的贡献率 (48.33% ~ 67.00%) 均高于花前生物量转运量对产量的贡献率 (20.67% ~ 39.33%), 具体结果见表 3。FP 处理花前营养器官生物量向籽粒转运量及对籽粒产量的贡献率均高于 DF、JF 处理, 但未达到显著性。DF、JF 处理花后生物量生产量高于 FP 处理, 分别提高 32.32% 和 16.18%。DF、JF 处理对籽粒产量的贡献率高于 FP 处理, 分别提高 6.60%、5.20%。

FP、DF 和 JF 处理的水稻花前营养器官氮素转运量均显著高于 CK。FP、DF 和 JF 处理花前营养器官的氮素转运量及对籽粒的贡献率与生物量转运表现一致。但 DF、JF 处理花后氮素生产量分别较 FP 处理

显著提高 116.67% 和 83.33%。DF 处理花后氮素生产量对籽粒的贡献率较 FP 处理显著提高 65.07%。综上所述,一次性施用无机包裹缓释肥促进了水稻花后生物量和氮素的生产及向籽粒的转运。



不含有相同字母表示差异达到显著水平 ($p < 0.05$), 下同。

图 1 不同处理水稻各生育期地上部生物量和氮素累积量

表 3 不同处理水稻花前花后生物量和氮素累积转运量

处理	生物量				氮素			
	花前		花后		花前		花后	
	转运量/ (g·株 ⁻¹)	贡献率/ %	生产量/ (g·株 ⁻¹)	贡献率/ %	转运量/ (g·株 ⁻¹)	贡献率/ %	生产量/ (g·株 ⁻¹)	贡献率/ %
CK	3.46±0.39b	39.33±7.77a	4.48±1.61c	48.33±7.37b	0.04±0.00b	67.00±13.53a	0.02±0.01b	33.00±13.53b
FP	6.32±1.74a	30.33±7.57ab	11.94±1.19b	57.67±7.57ab	0.12±0.04a	65.67±14.84ab	0.06±0.02b	34.33±14.84ab
DF	4.84±1.14ab	20.67±6.01b	15.80±2.30a	67.00±6.00a	0.10±0.02a	43.33±9.07b	0.13±0.03a	56.67±9.07a
JF	5.65±0.92ab	27.00±4.00ab	12.73±0.86b	60.67±4.51ab	0.09±0.01a	46.67±7.10ab	0.11±0.02a	53.33±7.10ab

2.4 不同处理对水稻分蘖期根系形态的影响

无机包裹型缓释肥料促进了水稻根系的生长(表 4 和图 2)。DF 和 JF 处理总根长达 455.84~530.42 cm, 显著高于 FP 处理。JF 处理的总根长较 DF 又显著提高 16.36%。JF 处理根表面积较 CK 显著提高 33.96%, 与 DF、FP 处理无显著差异。JF 处理根尖数达 1205 个, 较 CK、FP 和 DF 处理分别显著提高 91.88%、52.53% 和 33.44%。各处理间根体积无显著差异。JF 处理具有最高的总根长、根表面积和根尖数。

表 4 不同处理水稻分蘖期根系形态

处理	总根长/cm	根表面积/cm ²	根体积/cm ³	根尖数/个
CK	363.43±4.43c	118.53±22.55b	6.41±1.76a	628±55b
FP	406.52±1.33c	123.75±17.57ab	9.31±4.00a	790±59b
DF	455.84±36.68b	128.95±5.02ab	9.03±1.91a	903±254b
JF	530.42±33.53a	158.78±23.49a	10.08±1.92a	1205±151a



上图中从左往右依次是 CK、FP、DF、JF 处理。

图 2 不同施肥处理水稻分蘖期根系扫描图

2.5 不同处理水稻生育期土壤无机氮含量动态变化特征

水稻移栽前施入基肥后, 淹水放置 2 d 模拟泡田。此时土壤无机氮含量最高, 达 48.35~59.45 mg/kg, 各处理间无显著差异(图 3)。移栽 18d, DF 和 JF 处理无机氮含量均显著高于 CK, 分别增加 132.35% 和 77.86%。至移栽 84d, DF 和 JF 处理无机氮含量始终高于 FP 和 CK 处理, 保持在 59.45~15.73 mg/kg。水稻生育后期 DF 和 JF 处理土壤无机氮含量在 14.96~15.29 mg/kg, 略高于 FP 和 CK 处理, 但无显著差异。

2.6 不同处理对水稻氮肥利用率的影响

不同施肥处理对水稻氮肥利用率影响显著(表 5)。DF 和 JF 处理的氮肥农学效率、吸收利用率和偏生产力均显著高于 FP 处理, 其中: 氮肥农学效率分别显著提高 23.01% 和 26.69%; 吸收利用率分别显著提高 63.80% 和 81.91%; 偏生产力分别显著提高 13.01% 和 26.06%。JF 和 DF 处理的氮肥农学效率和氮肥吸收利用率无显著差异。JF 较 DF 处理的氮肥偏生产力显著提高了 11.55%。

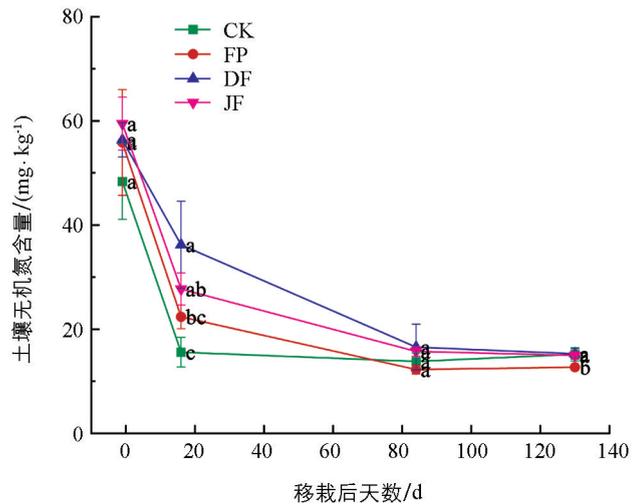


图 3 不同处理土壤无机氮含量动态变化情况

表 5 不同处理水稻氮肥利用率

处理	氮肥农学效率/(kg·kg ⁻¹)	氮肥吸收利用率/%	氮肥偏生产力/(kg·kg ⁻¹)
CK	—	—	—
FP	24.73±1.81b	35.00±6.25b	43.75±1.81c
DF	30.42±2.98a	57.33±7.02a	49.44±2.98b
JF	31.33±1.07a	63.67±16.56a	55.15±1.07a

3 讨论和结论

3.1 讨论

3.1.1 水稻一次性基施无机包裹型缓释肥的增产稳产效应

本研究发现与常规施肥等养分一次性基施无机包裹缓释肥 DF 处理水稻产量较常规施肥 FP 处理显著提高 13.01%。DF 处理增产的原因是显著提高了水稻有效穗数和产量库容(总颖花量)^[22], 而大幅度提升产量库容是水稻获得高产的关键, 且增加有效穗数是提升产量库容的有效途径之一^[22-25]。一次性基施无机包裹缓释肥 JF 处理虽然较常规施肥 FP 处理养分投入量减少 20%, 但仍获得与 FP 处理相似的水稻产量。JF 处理也显著提高了水稻有效穗数, 但穗粒数存在劣势, 这可能是由于肥料用量减量过多, 所以取得了稳产的效果。

地上、地下部良好生长发育是水稻高产形成的前提^[26]。一方面, 根系的发育, 特别是分蘖期, 对水稻高产的形成尤为关键^[27]。常规施肥处理基肥可能存在氮素供应过量、快速损失的问题, 抑制了水稻根系的发育^[28], 根系浅, 从而出现个体质量差和易倒伏的现象, 水稻产量也受到影^[29]。而无机包裹缓释肥氮素能够缓慢释放, 显著提高了水稻分蘖期总根长(表 4, 图 2), 形成了良好的根系形态。地上、地下协同发育, 从而为水稻高产提供了保障。文献^[30]的研究也表明缓控释肥能促进水稻根系生长、优化根系形态, 进而促进地上部生长和水稻高产。另一方面, 水稻产量是干物质积累分配的结果, 合理的氮肥供应能优化干物质和氮素的积累转移^[19-20, 31]。无机包裹型缓释肥一次性施用处理水稻各关键生育期地上部生物量均高于农户传统施肥, 尤其是花后干物质及氮素生产量显著提高。研究表明, 水稻中后期地上部干物质积累和氮素累积更具增产潜力, 与水稻产量呈极显著正相关^[20, 32]。无机包裹型缓释肥一次性施用处理花后干物质生产对产量的贡献率也显著高于农户传统。此外, 土壤养分供应能力直接影响作物生长和产量^[33], 肥料氮素释放匹配作物氮素需求是优化产量的重要保障^[16]。本研究中 DF、JF 处理各个关键生育期土壤无机氮浓度均高于农户传统施肥, 氮素供应能够保持平衡稳定。综上所述, 一次性基施无机包裹缓释肥氮素缓慢释放, 促进了水稻分蘖期根系的发育, 提高了花后干物质、氮素生产量和对籽粒产量形成的贡献率, 从而获得高产和减肥稳产的效果。

3.1.2 水稻一次性施用无机包裹型缓释肥的氮高效利用机制

氮肥利用率是衡量施氮合理性最直接的指标^[34]。本研究结果显示, 两个一次性施用无机包裹缓释肥 DF、JF 处理均显著提高了氮肥农学效率、吸收利用率和偏生产力, 等肥增产和减肥稳产是氮肥利用率提高的两个直接原因。缓释肥料一次性施用是基于肥料养分释放与实际水稻生长养分需求在量和时间效益上同步的特点^[34-35]。因此, 判断作物一次性施用缓释肥料是否可行可以从两个方面入手。一方面是氮素供应特征。土壤无机氮动态浓度反映了肥料的氮素供应能力^[36]。本试验中, DF、JF 处理土壤无机氮浓度各关键生育期均高于 FP 处理, 做到了优于氮肥分次施用的效果, 为氮肥高效利用提供了保障。另一方面, 水稻对氮素的吸收转运差异影响了氮高效利用机制^[37]。DF、JF 处理水稻成熟期地上部氮素积累量均显著高于 FP 处理, 施肥投入的氮素被水稻大量吸收利用, 从而提高了利用率。

无机包裹缓释肥处理在促进水稻氮素吸收积累的基础上, 促进了氮素向籽粒的转移。DF、JF 处理花后氮素生产量对籽粒的贡献率均高于 FP 处理, 有利于籽粒的灌浆, 从而获得高产。文献^[36]的研究也发现: 一次性施用控释氮肥, 水稻全生育期氮素积累量增加, 促进水稻生长, 提高了氮肥利用率。此外, 根系的发育与水稻养分利用率息息相关: 文献^[38]研究发现, 氮肥利用率与水稻分蘖期根长、根表面积呈显著正相关; 文献^[27]研究也发现, 水稻氮积累量、产量与水稻移栽后 20 d 的总根长呈极显著正相关。本试验结果显示, DF、JF 处理促进了水稻分蘖期根系的发育, 显著提高了的总根长。综上所述, 一次性基施无机包裹缓释肥供应的氮素能够满足水稻需求, 促进了水稻对氮素的吸收利用, 从而显著提高了氮肥利用率。

3.2 结论

无机包裹缓释肥氮素缓慢释放, 一次性基施能够促进水稻的生长发育, 提高花后干物质和氮素生产量, 从而显著提高水稻的有效穗数、总颖花量和产量。无机包裹型缓释氮肥一次性施用促进了水稻对氮素的吸收利用, 显著提高了氮肥农学效率、吸收利用率和偏生产力。因此, 综合水稻地上、地下生长状况、产量和氮肥利用率等, 一次性施用无机包裹型缓释肥料是一种面向未来规模化和机械化水稻生产的高效精准轻简施肥策略。

参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization (FAO). FAOSTAT [EB/OL]. (2019-12-26) [2021-11-01]. <https://www.fao.org/faostat/en/>.
- [2] PENG S B, BURESH R J, HUANG J L, et al. Strategies for Overcoming Low Agronomic Nitrogen Use Efficiency in Irrigated Rice Systems in China [J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(1): 37-47.
- [3] 陈语, 翟泰雅, 王芳芳, 等. 氮肥对黄壤温室气体排放和玉米产量的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(8): 37-47.
- [4] ZHANG L, XU X C. Difference in Carbon Footprint between Single-and Double-Cropping Rice Production in China, 2003-2016 [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(21): 27308-27317.
- [5] 方艺, 委亚庆, 张世浩, 等. 重庆稻油轮作区氮素利用及氮肥投入阈值研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(8): 95-104.
- [6] 魏翠兰, 曹秉帅, 韩卉, 等. 施肥模式对中国稻田氮素径流损失和产量影响的 Meta 分析 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022(7): 190-196.
- [7] 杨紫薇, 尹高飞, 赵海璇, 等. 白洋淀流域种植结构及氮盈余的时空变化特征 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39(6): 111-119.
- [8] LIU X W, WANG H Y, ZHOU J M, et al. Effect of N Fertilization Pattern on Rice Yield, N Use Efficiency and Fertilizer-N Fate in the Yangtze River Basin, China [J]. *PLoS One*, 2016, 11(11): e0166002.
- [9] CAI S Y, ZHAO X, PITTELKOW C M, et al. Optimal Nitrogen Rate Strategy for Sustainable Rice Production in China [J]. *Nature*, 2023, 615(7950): 73-79.
- [10] 彭秋, 徐卫红. 纳米缓释肥氮素释放特性及茎瘤芥营养效应研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(11): 31-41.
- [11] KE J, SUN J, CHEN T T, et al. Effects of Mixed Fertilizers Formed by the Compounding of Two Targeted Controlled-Release Nitrogen Fertilizers on Yield, Nitrogen Use Efficiency, and Ammonia Volatilization in Double-Cropping Rice [J]. *The Crop Journal*, 2023, 11(2): 628-637.
- [12] 王远, 高兵倩, 王眺, 等. 5 种不同缓释肥在盆栽菜用甘薯上的应用研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(10): 11-20.
- [13] XU D, ZHU Y, ZHU H B, et al. Effects of a One-Time Application of Controlled-Release Nitrogen Fertilizer on Yield and Nitrogen Accumulation and Utilization of Late Japonica Rice in China [J]. *Agriculture*, 2021, 11(11): 1041.
- [14] ZHAO C, GAO Z J, LIU G M, et al. Optimization of Combining Controlled-Release Urea of Different Release Period and Normal Urea Improved Rice Yield and Nitrogen Use Efficiency [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, 69(5): 821-834.
- [15] WU Q WANG Y H, DING Y F, et al. . Effects of Different Types of Slow-and Controlled-Release Fertilizers on Rice Yield [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(6): 1503-1514.
- [16] 林清火, 刘海林, 黄艳艳, 等. 4 种缓控释氮肥的养分释放特征及肥效 [J]. *热带作物学报*, 2018, 39(9): 1718-1723.
- [17] 许秀成, 李荫萍, 王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告——第三报 包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展(续)3. 欧洲 [J]. *磷肥与复肥*, 2001, 16(2): 10-12.
- [18] 王好斌, 侯翠红, 王艳语, 等. 无机包裹型缓释复合肥料及其产业化应用 [J]. *武汉工程大学学报*, 2017, 39(6):

557-564.

- [19] 谷晓博, 宋慧, 白东萍, 等. 优化缓释氮肥与尿素配施比例提高冬小麦产量和氮肥利用效率 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 56-65.
- [20] 雷炳桦, 赵护兵, 刘吉飞, 等. 减氮结合覆盖下冬小麦养分累积及转移规律研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 30-39.
- [21] WANG L, XUE C, PAN X, et al. Application of Controlled-Release Urea Enhances Grain Yield and Nitrogen Use Efficiency in Irrigated Rice in the Yangtze River Basin, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 999.
- [22] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 粳型杂交水稻超高产形成规律与栽培途径的探讨 [J]. 杂交水稻, 2010, 25(S1): 346-353.
- [23] 方立魁, 隗冥, 丛云飞, 等. 稻油轮作机插秧水稻群体特征及产量形成机制研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(10): 33-39.
- [24] 冯向前, 殷敏, 王孟佳, 等. 播期对长江下游不同类型晚稻品种产量的影响及其与水稻全育期温光资源配置间关系 [J]. 作物学报, 2022, 48(10): 2597-2613.
- [25] 晏军, 吴启侠, 朱建强, 等. 适雨灌溉下氮肥运筹对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响 [J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 347-356.
- [26] 宋文杰, 罗嘉润, 刘伟, 等. 控释肥一次性侧深施对水稻生长、氮素利用和产量的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 99-107.
- [27] 张晨晖, 章岩, 李国辉, 等. 侧深施肥下水稻高产形成的根系形态及其生理变化特征 [J]. 作物学报, 2023, 49(4): 1039-1051.
- [28] 唐清芸, 杨晶晶, 赵蕾, 等. 施氮量对滴灌水稻根系形态构型和分形特征的影响 [J]. 作物学报, 2024, 50(6): 1540-1553.
- [29] YUAN M M, SUN Y X, WANG J B, et al. Application of Controlled-Release Compound Fertilizer to Mechanically Dry Direct-Seeded Rice Increased Rice Biomass, Nutrient Accumulation and Yield [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2023, 46(2): 300-311.
- [30] 侯红乾, 黄永兰, 冀建华, 等. 缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响 [J]. 中国水稻科学, 2016, 30(4): 389-396.
- [31] 胡明明, 丁峰, 彭志芸, 等. 多元化种植模式下秸秆还田配合水氮管理对水稻产量形成与氮素吸收利用的影响 [J]. 作物学报, 2024, 50(5): 1236-1252.
- [32] 段玉婷, 祝海竣, 刘乾峰等. 肥料运筹对双季杂交稻干物质积累及产量形成的影响 [J/OL]. 分子植物育种: 1-15 (2022-10-31) [2024-1-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221030.2005.008.html>.
- [33] CAI A D, XU M G, WANG B R, et al. Manure Acts as a Better Fertilizer for Increasing Crop Yields than Synthetic Fertilizer Does by Improving Soil Fertility [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 189: 168-175.
- [34] 方林发, 张宇亭, 谢军, 等. 氮肥用量和运筹对冷浸田水稻产量和氮素利用率的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 53-60.
- [35] 吕思琪. 缓释肥料氮效率与粳稻养分同步吸收研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [36] 辛志远, 王昌全, 申亚珍, 等. 水基包衣控释掺混肥料一次性施用对单季稻氮素利用的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 109-114.
- [37] 邱悦, 杨晓燕, 李天胜, 等. 减氮配施缓释氮肥对棉田土壤酶活性和氮素吸收利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 294-302.
- [38] 胡锐, 胡香玉, 傅友强, 等. 氮肥运筹对水稻根系生长发育的影响及其与氮肥吸收利用的关系 [J]. 作物杂志, 2023(5): 179-186.