

刘梦竹, 王锐, 冯源, 等. 控释尿素释放周期对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(5): 827-834.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.05.007

## 控释尿素释放周期对水稻产量和氮肥利用的影响

刘梦竹, 王锐, 冯源, 王坤庭, 糜凯亮, 邢志鹏, 张洪程, 张海鹏

(农业农村部长江流域稻作技术创新中心/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/扬州大学水稻产业工程技术研究院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 为研究不同释放周期的控释尿素对水稻产量形成及氮素利用的影响, 以南粳 9108 为材料, 在总施氮量为 270 kg/hm<sup>2</sup> 的条件下, 以不施氮(N0)和施用普通尿素(CK)为对照, 探讨普通尿素分别搭配释放周期为 60 d、80 d、100 d、120 d 的 4 种控释尿素处理(分别记作 T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理)对水稻产量、茎蘖数、干物质积累量及氮肥利用率的影响。结果表明, 与单纯施用普通尿素相比, 普通尿素搭配控释尿素处理的水稻产量均有显著提高。普通尿素搭配适宜释放周期的控释尿素处理可以增加水稻植株的茎蘖数、叶面积指数, 促进干物质与氮素积累, 获得较高结实率。与释放周期为 120 d 的控释尿素相比, 释放周期为 100 d 的控释尿素的氮素释放量更加匹配水稻不同生长发育时期所需的氮素量, 氮肥利用率较高。由此可见, 普通尿素搭配适宜释放周期的控释尿素能够提高水稻产量和对氮肥的利用率。

**关键词:** 水稻产量; 控释尿素; 释放周期; 氮肥利用率

**中图分类号:** S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)05-0827-08

## Effects of controlled-release urea releasing period on rice yield and nitrogen fertilizer utilization

LIU Mengzhu, WANG Rui, FENG Yuan, WANG Kunting, MI Kailiang, XING Zhipeng, ZHANG Hongcheng, ZHANG Haipeng

(Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** To investigate the effects of controlled-release urea with different release periods on rice yield formation and nitrogen utilization, the rice variety Nanjing 9108 was used as the experimental material in this study, and the total nitrogen application rate was 270 kg/hm<sup>2</sup>. The experiment included six treatments: no nitrogen fertilizer (N0), a control treatment using conventional urea (CK), and four controlled-release urea treatments with release periods of 60 d, 80 d, 100 d, and 120

d (T1, T2, T3, and T4, respectively). The study aimed to explore the impact of these treatments on rice yield, tiller number, dry matter accumulation, and nitrogen utilization efficiency. The results showed that compared with CK, the yield of rice treated with common urea and controlled-release urea was significantly increased. The treatment of common urea combined with controlled-release urea with suitable releasing period could increase the number of tillers and leaf area index of rice plants, promote the accumulation of dry matter and nitrogen, and obtain higher seed setting

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901447); 江苏省重点研发计划项目(BE2022338); 农业重大技术协同推广项目(2022-ZYXT-04-1); 江苏水稻产业技术体系项目[JATS(2022)485]

作者简介: 刘梦竹(1998-), 女, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事水稻高产栽培生理研究。(E-mail) 18762303319@163.com

通讯作者: 张洪程, (E-mail) hc Zhang@yzu.edu.cn; 张海鹏, (E-mail) hp Zhang@yzu.edu.cn

rate. Compared with the controlled-release urea with a release period of 120 d, the nitrogen release amount of the controlled-release urea with a release period of 100 d was more suitable for the nitrogen amount required by rice at different growth and development stages, and the nitrogen fertilizer utilization rate was higher. It can be seen that ordinary urea combined with controlled-release urea with appropriate release period can improve rice yield and nitrogen utilization rate.

**Key words:** rice yield; controlled-release urea; release period; nitrogen utilization efficiency

水稻是中国的主要粮食作物之一,解决国家粮食安全问题的关键在于水稻产量的提高<sup>[1]</sup>。持续、大量的氮肥投入是提高水稻产量的一项重要措施<sup>[2]</sup>。中国稻田氮肥平均用量已高达 180 kg/hm<sup>2</sup>,但仅有约 1/3 的当季氮肥能被水稻吸收利用<sup>[3-4]</sup>,更多氮肥通过多种途径损失,如淋溶、径流、硝化-反硝化等,由此引起了一系列环境生态问题<sup>[5-7]</sup>。因此,如何在提高产量的同时减少氮肥施用量、提高氮肥利用效率备受关注。目前,国内外研究人员已经在水稻氮肥减施增效方面做了大量研究,主要集中在施肥方法、氮肥运筹策略<sup>[8]</sup>、氮肥类型<sup>[9-10]</sup>、水氮管理、氨挥发和硝化-反硝化抑制剂研发<sup>[11]</sup>等方面,其中施用控释尿素在协同提高水稻产量和氮肥利用率上具有较好效果<sup>[12-13]</sup>。

控释尿素以传统尿素肥料颗粒为核心,通过在尿素表面涂覆一层膜材料,调节尿素养分的释放速率,使养分释放与作物吸收同步,从而减少土壤无机氮的淋失量,提高氮素利用率<sup>[14-17]</sup>。在水稻生产中,施用控释尿素不仅有利于减少因氨挥发或反硝化-脱氮而引起的氮损失,也有利于减少因淋溶作用或表面径流而导致的氮损失,对环境保护和减少劳动力投入而言意义重大<sup>[18-20]</sup>。有研究发现,与常规分次施肥相比,单一控释尿素基施处理的水稻产量下降了 5%<sup>[21]</sup>。由于养分释放规律不尽相同<sup>[22-24]</sup>,不同释放周期的控释尿素的养分供给不能完全适配水稻各阶段的养分需求,对水稻生长发育的影响也不尽相同。释放周期过短,可能引起后期养分供应不足,释放周期过长,则可能导致前期营养不足而后期营养过剩<sup>[25-26]</sup>,从而制约控释尿素的实际推广应用。因此,控释尿素与普通尿素混配一次性施用成为大田作物轻简化施肥的主流方向。二者混施既能减少稻田氮损失、提高氮肥利用率、降低水稻生产成本,又能克服前期因控释尿素氮素供应不足而导致减产的问题。但是如何选择适宜释放周期的控释尿素与普通尿素进行混配施用还有待明确,不同释放周期的控释尿素和普通尿素混配施用对水稻产量形

成和氮肥利用影响的研究也亟待深入。为此,本研究拟选用多穗型粳稻品种南粳 9108 为试验材料,在等量施氮条件下,比较不同释放周期的控释尿素、普通尿素混配施用对水稻产量形成和氮肥利用的影响,以期遴选出适宜释放周期的控释尿素与普通尿素混配组合,为水稻高产、绿色、轻简化栽培提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2019 年、2020 年在江苏省扬州市扬州大学试验田(119.42°E, 32.39°N)中进行。供试土壤为沙壤土。0~20 cm 土层有机质含量 24.4 g/kg,全氮含量 1.32 g/kg,碱解氮含量 104.2 mg/kg,速效磷含量 35.4 mg/kg,速效钾含量 72.5 mg/kg,速效镁含量 43.41 mg/kg,土壤 pH 值 6.03。

供试水稻品种为南粳 9108,全生育期 153 d,由江苏省农业科学院粮食作物研究所提供。本研究所用尿素购自河南晋开化工投资控股集团有限责任公司。本研究所用控释尿素为聚氨酯包膜尿素(43.5%氮),由山东茂施肥料有限公司提供,氮(N)的释放周期分别为 60 d、80 d、100 d、120 d。

### 1.2 试验设计

本研究采用田间小区试验,各小区面积为 20 m<sup>2</sup>。本试验共设 6 个处理,分别为不施氮肥处理(N0 处理)、只施尿素(46.0% N)处理(CK)、50%尿素+50%控释尿素(释放周期 60 d)处理(T1 处理)、50%尿素+50%控释尿素(释放周期 80 d)处理(T2 处理)、50%尿素+50%控释尿素(释放周期 100 d)处理(T3 处理)、50%尿素+50%控释尿素(释放周期 120 d)处理(T4 处理)。各处理设 3 个重复,随机排列。

在总施氮量为 270 kg/hm<sup>2</sup>的条件下,将 CK 的氮肥分 3 次施入土中,分别是基肥、分蘖肥、穗肥,施用比例为 4:3:3。基肥在秧苗移栽前 1 d 施入距地表 10 cm 处的土中,分蘖肥、穗肥采用撒施方式施用;T1、T2、T3、T4 处理的氮肥一次性基施;磷肥为过磷酸钙(12%

$P_2O_5$ ),用量为  $135\text{ kg/hm}^2$ ,作基肥施用;钾肥为氧化钾( $60\% K_2O$ ),用量为  $270\text{ kg/hm}^2$ ,基肥、穗肥施用比例为 1:1(表 1)。各处理在 2 年内保持一致。

表 1 各处理氮肥的类型、用量与施用时间

Table 1 Nitrogen fertilizer types, dosages and application time of each treatment

处理	基肥用量 ( $\text{kg/hm}^2$ )		分蘖肥用量 ( $\text{kg/hm}^2$ )		穗肥用量 ( $\text{kg/hm}^2$ )	
	尿素	控释尿素	尿素	尿素	尿素	尿素
N0	0	0	0	0	0	0
CK	108	0	81	81	81	81
T1	135	135	0	0	0	0
T2	135	135	0	0	0	0
T3	135	135	0	0	0	0
T4	135	135	0	0	0	0

N0:不施氮;CK:尿素;T1:50%尿素+50%控释尿素(释放周期 60 d);T2:50%尿素+50%控释尿素(释放周期 80 d);T3:50%尿素+50%控释尿素(释放周期 100 d);T4:50%尿素+50%控释尿素(释放周期 120 d)。

水稻于每年 5 月 15 日播种,6 月 15 日移栽。每穴定植 4 株,种植密度为  $13.3\text{ cm}$ (株距) $\times 30.0\text{ cm}$ (行距)。小区之间筑埂并用塑料膜包埂隔开,确保每个小区单独排灌。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖动态的调查 每个小区连续定点 10 穴,移栽后调查茎蘖数,每隔 10 d 调查 1 次,直至茎蘖数不再变化。

1.3.2 产量的测定 采用五点法普查 50 穴,计算有效穗数,在普查的基础上,每个小区取 5 穴测定每穗粒数、结实率和千粒重,计算理论产量,实收测产。

1.3.3 叶面积和干物质量的测定 于拔节期、抽穗期、成熟期 3 个关键时期,在各小区取 3 穴,用长宽系数法测叶面积;将水稻于  $105\text{ }^\circ\text{C}$  杀青 0.5 h,于  $80\text{ }^\circ\text{C}$  烘至恒重后测定干物质量。

1.3.4 各器官含氮量的测定 将成熟期水稻植株的茎鞘、叶片、穗杀青、烘干后粉碎,用半微量凯氏定氮法测定氮含量,计算含氮量。

### 1.4 数据计算与统计分析

叶面积指数(LAI)衰减速率( $LAI, 1\text{ d}$ )=(抽穗期 LAI-成熟期 LAI)/抽穗期至成熟期间隔天数;

$$\text{光合势} = (LAI_1 + LAI_2) \times (t_2 - t_1) / 2;$$

水稻各部位氮素积累量 = 干物质积累量  $\times$  植株氮含量;

氮素总积累量 = 茎鞘氮素积累量 + 叶片氮素积累量 + 穗氮素积累量;

氮肥吸收利用率 = (施氮肥区水稻氮素总积累量 - 不施氮肥区水稻氮素总积累量) / 施氮量  $\times 100\%$ ;

氮肥贡献率 = (施氮肥区水稻产量 - 不施氮肥区水稻产量) / 施氮肥区水稻产量  $\times 100\%$ 。

式中:  $LAI_1$ 、 $LAI_2$  分别为前后 2 次测定的叶面积指数,  $t_1$ 、 $t_2$  分别为前后 2 次测定的时间。

在本研究中,用 Excel 2016 进行数据处理和图表绘制,用 SPSS 25.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同释放周期控释尿素对水稻产量及其构成因素的影响

由表 2 可知,与多次施氮的 CK 相比,控释尿素与普通尿素混配施用的处理均可增加水稻产量。与 CK 相比,T1~T4 处理的产量在 2019 年、2020 年分别显著增加了 5.4%~22.2%、9.7%~26.1%,表明控释尿素与普通尿素混施对水稻产量的提升效果优于单施普通尿素。随着控释尿素释放周期的增加,水稻产量总体表现为先增后降的规律,以 T3 处理产量最高,说明控释尿素释放周期差异对水稻产量存在影响,且 T3 处理的养分释放规律与水稻生长规律最贴合。

对产量构成因素分析可知,在控释尿素与普通尿素混配施用条件下,各处理产量的提高主要得益于有效穗数的增加,2020 年的有效穗数比 CK 增加了 7.5%~16.2%。同时,与 CK 相比,适宜释放周期的控释尿素与普通尿素混配施用提高了群体颖花量、结实率,进而提高了水稻产量。

### 2.2 不同释放周期控释尿素对水稻茎蘖动态的影响

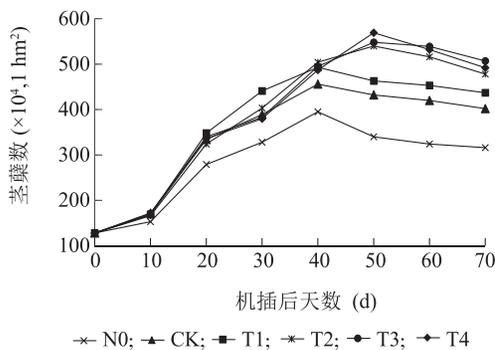
由图 1 可知,控释尿素与普通尿素混配施用处理的水稻茎蘖数均表现为先增加后减少的趋势,在分蘖初期,茎蘖数迅速增加,达到最大值,而后无效分蘖死亡,分蘖总数趋于平稳。T2、T3、T4 处理的茎蘖数在机插后 50 d 达到苗期高峰,而 T1 处理的茎蘖数则与 CK 保持一致,在机插后 40 d 达到苗期高峰。T1~T4 个处理在苗期高峰的茎蘖数均显著高于 CK。在机插后 70 d,与 CK 相比,各处理的无效分蘖数减少,有效茎蘖数的排序为 T3>T4>T2>T1>CK,与 CK 相比的增幅为 8.7%~26.1%。由此可见,控释尿素释放周期差异对水稻分蘖存在影响。

表 2 不同释放周期控释尿素对水稻产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of controlled-release urea with different release periods on rice yield and yield components

年份	处理	有效穗数 ( $\times 10^4$ , 1 hm <sup>2</sup> )	每穗粒数 (粒)	群体颖花量 ( $\times 10^6$ , 1 hm <sup>2</sup> )	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (t/hm <sup>2</sup> )
2019	N0	217.00e	112.26a	243.69d	90.24c	26.60a	5.85e
	CK	339.33d	115.29a	391.09c	90.72bc	26.13a	9.27d
	T1	352.33cd	115.19a	405.58bc	91.53a	26.30a	9.77bc
	T2	365.00bc	111.56a	406.86bc	91.27ab	27.08a	10.06bc
	T3	390.67a	115.67a	452.33a	91.74a	27.28a	11.33a
	T4	384.33ab	111.79a	429.74ab	90.86bc	27.18a	10.60ab
2020	N0	206.21e	111.22a	229.11e	90.30c	26.40a	5.47e
	CK	348.00d	113.28a	394.21d	90.94bc	26.04a	9.34d
	T1	374.10c	112.84a	422.02c	91.84a	26.44a	10.25bc
	T2	381.52bc	111.45a	425.20c	91.04ab	27.33a	10.58bc
	T3	404.46a	114.60a	463.51a	92.34a	27.52a	11.78a
	T4	394.87b	111.57a	440.06b	91.09ab	27.14a	10.89b

N0、CK、T1~T4 见表 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。



N0、CK、T1~T4 见表 1 注。

图 1 不同释放周期控释尿素对水稻茎蘖动态的影响

Fig.1 Effects of controlled-release urea with different release periods on tiller dynamics of rice

### 2.3 不同释放周期控释尿素对水稻叶面积指数的影响

与单施尿素相比,配施控释尿素能更好地维持水稻群体叶面积指数。如表 3 所示,普通尿素搭配不同释放周期的控释尿素能够影响不同时期的水稻叶面积指数,随着控释尿素释放周期的增加,拔节期水稻叶面积指数呈现先升后降的规律。在拔节期,T2、T3 处理的水稻叶面积指数显著高于 T1、T4 处理和 CK, T2、T3 处理的水稻叶面积指数与 CK 相比增幅分别为 20.9%和 22.9%。在抽穗期,T2、T3、T4 处理的水稻叶面积指数显著高于 T1 处理、CK, T3 处理的水稻叶面积指数最高,较 CK 增加了 32.6%。在成熟期,T4 处理的水稻叶面积指数显著高于 CK,增幅为 19.7%, T1、T2、T3 处理与 CK 的叶面积指数之间并无显著差

异,总体表现为T4>T3>T2>T1>CK。普通尿素配施控释尿素处理的叶面积指数衰减速率随控释尿素释放周期的增加呈现先升后降的趋势,CK 的叶面积指数衰减速率显著低于其他处理,其中 T2 处理的叶面积指数衰减最为严重。由此可见,不同释放周期的控释尿素对水稻叶面积指数有不同影响。

表 3 不同释放周期控释尿素对水稻叶面积指数的影响

Table 3 Effects of controlled-release urea with different release periods on leaf area index of rice

处理	叶面积指数			叶面积指数 衰减速率 (LAI, 1 d)
	拔节期	抽穗期	成熟期	
N0	2.12c	4.88d	2.01c	0.073 5a
CK	4.11b	5.28c	3.81b	0.037 7c
T1	4.27b	6.18b	3.91b	0.058 2b
T2	4.97a	6.77a	3.99b	0.071 2a
T3	5.05a	7.00a	4.27ab	0.069 9ab
T4	4.32b	6.67a	4.56a	0.054 0b

N0、CK、T1~T4 见表 1 注。LAI:叶面积指数。同列数据后标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

### 2.4 不同释放周期控释尿素对水稻光合势的影响

如表 4 所示,在拔节期至抽穗期、抽穗期至成熟期,与 CK 相比,普通尿素搭配不同释放周期的控释尿素能在一定程度上提高水稻光合势。随着控释尿素释放周期的增加,虽然播种期至拔节期、拔节期至抽穗期的水稻光合势均呈现先增加后降低的趋势,但是不同释放周期的控释尿素对水稻光合势有不同的影响。在播种期至拔节期,T2、T3 处理的光合势

显著大于 CK, T1、T4 处理的光合势较 CK 无显著差异。在拔节期至抽穗期, 4 种释放周期的控释尿素处理的光合势都显著大于 CK, T3 处理的光合势较 CK 高 28.33%。在抽穗期至成熟期, 与 CK 相比, 4 种释放周期的控释尿素处理的光合势均有显著提升, 提升幅度为 17.41%~29.16%。上述结果表明, 配施具有适宜释放周期的控释尿素能够提高水稻光合作用能力, 可为水稻物质生产打下良好基础。

表 4 不同释放周期控释尿素对水稻光合势的影响

Table 4 Effects of controlled-release urea with different release periods on photosynthetic potential of rice

处理	不同阶段的光合势 [(m <sup>2</sup> ·d)/m <sup>2</sup> ]		
	播种期-拔节期	拔节期-抽穗期	抽穗期-成熟期
N0	82.68c	115.50e	96.59c
CK	160.29b	154.94d	103.65c
T1	166.53b	172.43c	121.70b
T2	193.83a	193.71a	131.12a
T3	196.95a	198.83a	133.87a
T4	168.48b	181.34b	133.41a

N0、CK、T1~T4 见表 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

表 5 不同释放周期控释尿素对水稻不同时期干物质积累的影响

Table 5 Effects of controlled-release urea with different release periods on rice dry matter accumulation at different growth stages

处理	播种期-拔节期		拔节期-抽穗期		抽穗期-成熟期	
	干物质积累量 (t/hm <sup>2</sup> )	占比 (%)	干物质积累量 (t/hm <sup>2</sup> )	占比 (%)	干物质积累量 (t/hm <sup>2</sup> )	占比 (%)
N0	2.54d	26.40a	3.65c	37.94c	3.43e	35.65c
CK	4.19c	24.81c	7.24b	42.87a	5.46d	32.33d
T1	5.16a	25.88ab	8.19a	41.07b	6.59c	33.05d
T2	5.23a	25.16bc	8.21a	39.49bc	7.35b	35.35c
T3	4.74b	23.02c	7.48b	36.33c	8.37b	40.65b
T4	4.73b	22.82d	7.39b	35.65d	8.61a	41.53a

N0、CK、T1~T4 见表 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

## 2.6 不同释放周期控释尿素对水稻植株含氮量的影响

如表 6 所示, 随着控释尿素释放周期的增加, 水稻茎鞘的含氮量呈现先增加后降低的趋势。在 T3 处理下, 茎鞘、叶片、穗的含氮量均显著高于 CK, 分别增加了 30.1%、18.5%、14.4%; 在 T1 处理下, 茎鞘、叶片、穗的含氮量与 CK 均无显著差异。上述结果表明, 不同释放周期的控释尿素对水稻植株含氮量有不同的影响。

## 2.5 不同释放周期控释尿素对水稻植株干物质积累量的影响

由表 5 可知, 在播种期至拔节期、抽穗期至成熟期, 与 CK 相比, 普通尿素搭配不同释放周期的控释尿素处理均能在一定程度上提高水稻植株的干物质积累量。在播种期至拔节期, 普通尿素配施不同释放周期控释尿素处理的干物质积累量均显著高于对照, 增幅为 12.9%~24.8%; T2、T3 处理与 CK 间的干物质积累量占比差异不显著, T1 处理的干物质积累量占比显著高于 CK, 而 T4 处理的干物质积累量占比则显著低于 CK。在拔节期至抽穗期, T1、T2 处理的干物质积累量显著高于 CK, 分别较 CK 增加了 13.1%、13.4%。抽穗期至成熟期, 与 CK 相比, 4 个处理的干物质积累量增幅为 20.7%~57.7%, 均显著高于 CK; T4 处理的干物质积累量占比最高, T2、T3、T4 处理的干物质积累量占比显著高于 CK, T1 处理的干物质积累量占比与 CK 无显著差异。综上, T1、T2 处理的植株主要在抽穗前进行干物质积累, 而 T3、T4 处理的植株主要通过加快抽穗后的干物质积累来保证水稻后期籽粒充分灌浆, 减少空瘪粒的产生, 进而获得高产。

从植株氮素积累量上看, T3、T4 处理下水稻茎鞘内的氮素积累量显著高于 CK, 分别增加了 25.1%、17.1%。T3 处理下水稻叶片内的氮素积累量最高, 为 43.32 kg/hm<sup>2</sup>。T2、T3、T4 处理的穗内氮素积累量均显著高于 CK, 分别增加了 4.7%、14.8%、8.9%。

综合水稻植株地上部氮素积累量进行分析可知, 与 CK 相比, T2、T3、T4 处理可以提高全株氮素积累量, 且 T3 处理增加全株氮素积累量的效果最明显。

表6 不同释放周期控释尿素对水稻成熟期含氮量和氮素积累量的影响

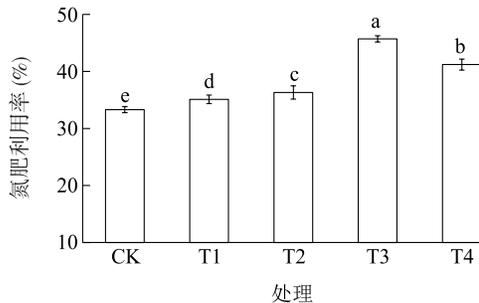
Table 6 Effects of controlled-release urea with different release periods on nitrogen content and nitrogen accumulation in rice at maturity stage

处理	含氮量 (mg/g)			氮素积累量 (kg/hm <sup>2</sup> )			
	茎鞘	叶片	穗	茎鞘	叶片	穗	全株
N0	6.32de	15.04b	9.90b	24.23c	20.17d	52.81e	97.21e
CK	6.45d	15.23b	10.13b	43.52b	36.49c	107.05d	187.06d
T1	6.61cd	16.20ab	10.20b	43.74b	37.40c	110.74cd	191.88cd
T2	7.45bc	17.13ab	10.41b	44.63b	38.56bc	112.04c	195.23c
T3	8.39a	18.05a	11.59a	54.44a	43.32a	122.87a	220.63a
T4	7.62b	17.35ab	11.51a	50.98a	41.00ab	116.54b	208.52b

N0、CK、T1~T4 见表1注。同列数据后标有不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

## 2.7 不同释放周期控释尿素对氮肥利用率的影响

由图2可知,与CK相比,普通尿素搭配不同释放周期控释尿素处理的水稻氮肥利用率均表现出显著提高的趋势,随着控释尿素释放周期的增加,水稻氮肥利用率呈现先增后降的趋势。T3处理的氮肥利用率相较于其他处理显著提高,其氮肥利用率为45.7%,较CK增加了12.4个百分点。T1、T2、T4处理的氮肥利用率分别较CK提升了1.8个百分点、3.0个百分点、7.9个百分点。在相同运筹方式下,4种不同释放周期的控释尿素处理的氮肥利用率排序为T3>T4>T2>T1。



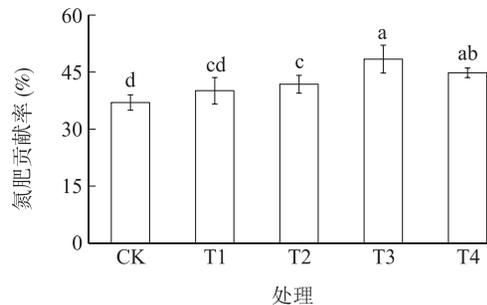
N0、CK、T1~T4 见表1注。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图2 不同释放周期控释尿素对水稻氮肥利用率的影响

Fig.2 Effects of controlled-release urea with different release periods on nitrogen use efficiency of rice

从图3可以看出,与CK相比,普通尿素搭配适宜释放周期的控释尿素处理提高了水稻的氮肥贡献率,随着控释尿素释放周期的增加总体表现为先升后降的趋势,T3处理的氮肥贡献率最高,为48.4%,说明100d的释放周期最贴合水稻全生育期对氮肥的吸收规律,T2、T4处理的氮肥贡献率也显著高于

CK,分别为41.8%、44.8%,即释放时长为80d、120d的控释尿素相较于普通尿素对水稻利用氮素有一定的促进作用,但不完全符合水稻生育期的生长规律。T1处理的氮肥贡献率与CK无显著差异。



N0、CK、T1~T4 见表1注。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图3 不同释放周期控释尿素对水稻氮肥贡献率的影响

Fig.3 Effects of controlled-release urea with different release periods on nitrogen contribution rate in rice

## 3 讨论

### 3.1 不同释放周期控释尿素对水稻产量的影响

干物质积累是水稻生长过程中的重要内容<sup>[27-30]</sup>,水稻高产的前提就是积累了充足的干物质。在总施氮量一致的情况下,施用控释尿素能够优化水稻各方面的生长指标,提高水稻产量<sup>[31]</sup>。在本试验中,普通尿素搭配适宜释放周期的控释尿素对水稻光合势、叶面积指数有良好的提升作用。有研究表明,水稻产量主要来源于光合物质的产生<sup>[32]</sup>。在相同氮肥水平下,混施具有适宜释放周期的控释尿素和普通尿素处理对水稻干物质积累量的增加效果优于单施普通尿素处理。控释尿素通过田

间酚醛树脂等高分子材料来控制尿素养分的释放速率,使之与作物所需养分保持一致<sup>[33]</sup>。但不同释放周期的控释尿素养分释放规律不尽相同。T1、T2 处理通过增加前期干物质积累量、增加物质转运量来提高产量,而 T3、T4 处理则是通过提高后期干物质积累量使水稻后期灌浆充实,从而提高产量。充足的有效分蘖是水稻高产的前提,控释尿素能促进有效分蘖的发生<sup>[34]</sup>。从产量构成因素看,提高有效穗数是获得高产的首要目标,在此基础上可以优化每穗粒数、结实率和千粒重。康兴蓉等<sup>[35]</sup>发现,控释尿素与普通尿素混施处理能显著提高水稻的有效穗数。本研究结果表明,控释尿素和普通尿素混施可大幅提高茎蘖数,减少无效分蘖的发生,T3 处理的有效茎蘖数高于其他处理。综上所述,普通尿素搭配不同释放周期的控释尿素处理对于水稻的增产效果整体表现为 T3 处理最佳,与其他处理相比,T3 处理更加符合水稻中后期对养分的需求规律。

### 3.2 不同释放周期控释尿素对氮素利用的影响

尿素在土壤中极易淋溶和挥发,导致氮肥利用率降低<sup>[36]</sup>。改用控释氮肥是减少氮肥流失、提高氮肥利用率的有效途径。但是控释尿素肥效释放缓慢,一次性基施不足以为作物提供前期生长的养分<sup>[37]</sup>。因此,本试验将普通尿素和控释尿素按 1:1 进行混合后基施。结果表明,与 CK 相比,T3、T4 处理对氮素积累量有明显的提升效果。4 种不同释放周期的控释尿素与普通尿素混施处理的氮肥利用率较普通尿素增加了 1.8~12.4 个百分点。释放周期为 100 d 的控释尿素搭配普通尿素处理的氮肥利用率显著高于其他处理,可见释放周期为 100 d 的控释尿素更加符合水稻中后期对于养分的需求。主要原因在于相较于普通尿素,控释尿素可以控制调节氮素释放速率,使水稻茎、叶等营养器官生长旺盛,水稻能吸收、积累更多氮素,在抽穗期后,光合作用产生的物质能更多地转移到水稻籽粒中,使得氮素利用更加高效。不同地区、不同类型的水稻生长发育各不相同,对于控释肥料的要求也不相同。张木等<sup>[38]</sup>研究发现,对于南方双季稻区,控释尿素养分释放期为 60 d 时较为适中,90 d 的控释尿素养分释放期过长,控释尿素养分释放期过长会导致灌浆期氮素供应过剩,水稻贪青导致灌浆不足,从而降低千粒重。曹兵等<sup>[39]</sup>研究发现,释放周期适宜的控释肥料不仅可以促进水稻增产,还可降低氮素流失、提高

氮肥利用率。在本试验中,控释尿素的最佳释放周期较长的原因是本试验对象为迟熟中稻,与其他地区的水稻在养分需求上有差异。因此,选择何种释放周期的控释尿素使其养分释放完美贴合水稻生长需求需因地制宜。

## 4 结论

普通尿素搭配不同释放周期的控释尿素对于水稻的增产效果优于普通尿素,T3 处理的增产效果最好。适宜释放周期的控释尿素与普通尿素混施可以在确保前期分蘖充足的前提下,保证较大的叶面积指数,增强光合势,提升水稻干物质积累量和植株含氮量,由此获得更高的产量和氮肥利用率。本研究结果表明,释放周期为 100 d 的控释尿素与普通尿素混合一次性基施的方法不仅可以减少田间施肥次数,还能满足水稻不同生长发育阶段对氮肥的需求,有利于提高水稻产量和促进氮肥的高效利用。

### 参考文献:

- [1] 张佳凤,李敏,王荣基,等. 缓释复混肥运筹方式对宜香优 2115 氮肥利用率及产量的影响[J]. 杂交水稻,2022,37(6): 104-108.
- [2] 王敬国,林杉,李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学,2016,49(3):503-517.
- [3] 龙瑞平,杨兆春,穆家伟,等. 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻生长和氮肥利用效率的影响[J]. 土壤,2022,54(4):708-714.
- [4] 蔡媛媛,王瑞琪,王丽丽,等. 华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报,2020,37(4):503-510.
- [5] HE Y P, ZHANG J Y, YANG S H, et al. Effect of controlled drainage on nitrogen losses from controlled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization[J]. Agricultural Water Management,2019,221:231-237.
- [6] 乔月,朱建强,吴启侠,等. 不同氮肥对不同种植方式稻田径流氮流失与氨挥发的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(2): 32-41.
- [7] 夏苏敬,乔月,朱建强. 调整氮肥基追比减少稻田氮素损失和保证直播稻产量[J]. 浙江农业学报,2022,34(11):2482-2490.
- [8] 王秀斌,徐新朋,孙静文,等. 氮肥运筹对机插双季稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016, 22(5):1167-1176.
- [9] 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.
- [10] 谢媛圆,熊又升,孙琛,等. 包膜尿素和氮肥增效剂对鲜食玉米生长发育及产量的影响[J]. 湖北农业科学,2022,61(16):

- 35-39.
- [11] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95-104.
- [12] 刘俊松, 吴雅萍, 左思杰, 等. 控释肥养分释放机理及其影响因素研究进展[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 464-470.
- [13] 陈萍, 王素梅, 张萍, 等. 不同配比控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(15): 22-25.
- [14] KAVITHA R, LATIFAH O, AHMED O H, et al. Rejected sago starch as a coating material to mitigate urea-nitrogen emission[J]. Agronomy, 2022, 12(4): 941.
- [15] 于文勇, 葛祥菡, 孙娅婷, 等. 有机肥与控释尿素配施对坡耕地土壤氮素淋溶及玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(12): 53-60.
- [16] 薛欣欣, 吴小平, 张永发, 等. 控释尿素对稻田氨挥发、氮素转运及利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 133-140.
- [17] 徐祥玉, 周剑雄, 喻大昭, 等. 控释掺混肥对双季玉米氨挥发和肥料养分回收率的影响[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(21): 62-66.
- [18] 吴周周, 刘佳欣, 陈粤彤, 等. 缓控释肥研究现状及其在水稻上的应用[J]. 中国稻米, 2022, 28(1): 13-17.
- [19] 黄允, 徐天成, 高恒宽, 等. 缓控释肥应用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(增刊1): 32-36.
- [20] 张新宇, 竺平, 冯艳, 等. 控释氮肥增加中稻产量、氮素吸收及肥料利用率[J]. 中南农业科技, 2022, 43(4): 11-13, 16.
- [21] 付正豪, 马中涛, 魏海燕, 等. 不同机械化栽培方式下控释肥配比对迟熟中粳水稻产量形成及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(1): 165-179.
- [22] ZHAO C, GAO Z J, LIU G G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the yield, nitrogen use efficiency, and grain quality of single season late japonica rice[J]. Agronomy, 2023, 13(1): 276.
- [23] 张明伟, 马泉, 陈京都, 等. 缓控释肥在冬小麦上的应用研究进展及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 15-21.
- [24] 王晓磊, 刘艳岩, 单提波, 等. 不同缓控释尿素处理对水稻抗折力及产量的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊1): 356-363.
- [25] 马畅, 杜萌, 杨世宽, 等. 缓释肥与速效氮肥配比施用对滨海盐碱稻区水稻产量及生长发育的影响[J]. 北方水稻, 2020, 50(2): 7-10.
- [26] 乔艳, 胡诚, 李双来, 等. 基于水稻养分专家系统的控释尿素适宜释放期研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 16-22.
- [27] 石吕, 薛亚光, 韩笑, 等. 不同土壤类型条件下生物炭施用量对水稻产量、品质和土壤理化性状的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(23): 222-228.
- [28] 刘红杰, 任德超, 倪永静, 等. 播期和密度对冬小麦开花后干物质转运及灌浆特征参数的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(5): 1227-1237.
- [29] 周苗, 景秀, 蔡嘉鑫, 等. 灌浆前期高温干旱复合胁迫对优质食味粳稻产量与穗后物质生产特征的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(12): 3357-3368.
- [30] 吴秀宁, 张军, 王凤娟, 等. 肥密互作对旱地冬小麦商麦1619旗叶光合特性、干物质积累和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 924-930.
- [31] 宁倩倩. 一次性施肥配方及氮肥减施对土壤氮转化、水稻生长及产量的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [32] HU Q, JANG W Q, QIU S, et al. Effect of wide-narrow row arrangement in mechanical pot-seedling transplanting and plant density on yield formation and grain quality of japonica rice[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(5): 1197-1214.
- [33] 王超, 李普旺, 宋书会, 等. 环境响应性高分子材料与肥料缓控释的研究进展[J]. 高分子通报, 2020(10): 30-36.
- [34] 翟彩娇, 张蛟, 崔士友, 等. 盐逆境下缓/控释肥对水稻生长发育、产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2023(1): 143-151.
- [35] 康兴蓉, 周旋, 彭建伟, 等. 聚氨酯包膜尿素掺混比例对早稻产量及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 119-126.
- [36] 康露, 朱靖蓉, 杨涛, 等. 畦灌下不同施肥方式新疆棉田氮素淋溶损失特征[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 18-26.
- [37] GENG J B, SUN Y B, ZHANG M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 65-73.
- [38] 张木, 唐拴虎, 张发宝, 等. 60天释放期缓释尿素可实现早稻和晚稻的一次性基施[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 119-127.
- [39] 曹兵, 丁紫娟, 侯俊, 等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 56-63.

(责任编辑: 徐艳)