

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.012

黄思怡, 周旋, 田昌, 等. 控释尿素减施对双季稻光合特性和经济效益的影响. 土壤, 2020, 52(4): 736–742.

控释尿素减施对双季稻光合特性和经济效益的影响^①

黄思怡¹, 周旋², 田昌^{1*}, 徐泽³, 袁浩凌¹, 刘强¹, 谢桂先¹, 彭建伟¹

(1 湖南农业大学资源环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128; 2 湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3 湖南省长沙县农业农村局, 长沙 410100)

摘要: 通过研究控释尿素减施对双季稻产量、经济效益及光合特性的影响, 并探讨各构成因素间及其与水稻产量的相互关系, 筛选出最佳双季稻连作施用量, 为双季稻节本增效提供依据。定位试验结果表明: 与常规施肥处理相比, 2015—2016 年控释尿素处理早晚稻产量分别提高 2.6%~8.1% 和 6.7%~22.3%, 早稻控释尿素减 N 10% 处理经济效益、总颖花数和总实粒数分别提高 3.00%、0.02% 和 6.34%, 晚稻控释尿素减 N 20% 处理分别提高 12.18%、5.09% 和 6.53%, 且晚稻施用控释尿素的增产增收效果较早稻好。控释尿素处理随着施 N 量的减少其净光合速率先增加后降低。相关性分析表明: 早、晚稻籽粒产量与总颖花数和总实粒数呈显著正相关。综合水稻产量和经济效益评估认为, 在双季稻区习惯施 N 水平基础上, 通过适当降低控释尿素 N 用量, 利于形成有效穗数, 提高水稻功能叶净光合速率, 有效扩充籽粒库容, 促进水稻增产节肥增效, 且早、晚稻分别以控释尿素减 N 10% 和减 N 20% 处理效果最佳。

关键词: 双季稻; 控释尿素; 减氮; 产量; 经济效益; 光合特性

中图分类号: S143.5 文献标志码: A

Effects of Reducing Controlled-release Urea Application on Photosynthetic Characteristics and Economic Benefit of Double-rice Cropping System

HUANG Siyi¹, ZHOU Xuan², TIAN Chang^{1*}, XU Ze³, YUAN Haoling¹, LIU Qiang¹, XIE Guixian¹, PENG Jianwei¹

(1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2 Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 3 Agricultural and Rural Bureau of Changsha County, Changsha 410100, China)

Abstract: A long-term field experiment was conducted to study the effect of reducing controlled-release urea (CRU) on yield, economic benefit and photosynthetic characteristics, and the relationship between yield components and yield of double-cropping rice in order to find out the optimal application rate of CRU for saving cost and improving efficiency. The results showed that compared with conventional fertilization treatment, for early rice, CRU treatments increased early and late grain yield (2015—2016) by 2.6%–8.1% and 6.7%–22.3%, and economic benefit, total spikelet number and total grain number increased by 3.00%, 0.02% and 6.34% of reducing N 10% for early rice, for late rice, reducing N 20% treatment increased by 12.18%, 5.09% and 6.53%, respectively. The above increasing effects were better for late rice than early rice. With reducing N application rate, the net photosynthetic rate in CRU treatments was first increased and then decreased. Correlation analysis showed that the grain yields were significantly positively correlated with the total number of spikelet and total number of grains of early- and late- rice. By considering the rice yield and economic benefit, it is concluded that on the basis of the conventional N application level, proper reducing N application rate in CRU in double-cropping rice region is conducive to the formation of the effective spikes, improve the net photosynthetic rate of rice function leaves, effectively expand the grain storage capacity, and thus promote the saving cost and improving yield and efficiency in double-cropping rice system. Reducing 10% N is optimum for early rice while reducing 20% N optimal for late rice.

Key words: Double-cropping rice; Controlled-release urea; Reducing N; Grain yield; Economic benefit; Photosynthetic characteristics

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800500)、国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U19A2050)、湖南省自然科学基金项目(2019JJ50233)和湖南农业大学“双一流”建设项目(SYL201802004)资助。

* 通讯作者(chtian12@126.com)

作者简介: 黄思怡(1995—), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: 920942452@qq.com

化肥是农业持续发展的物质保证,是粮食增产的重要基础^[1]。目前,我国是世界上最大的化肥生产国和消费国^[2]。化肥大量使用保证了水稻持续稳定增产,但存在肥料利用率低、养分流失严重、人工投入成本高等问题。我国施肥过量的现象普遍存在,单季水稻氮肥平均用量 193.5 kg/hm²,比世界氮肥单位面积平均用量(113 kg/hm²)高 70% 左右^[3]。传统速效肥料肥效期短,生产上必须分次追肥才能满足水稻生长需求,存在施肥次数多、费工费时、农民不易掌握其技术要点等局限性^[4],随着农村劳动力日益紧缺,追肥时损失量较大,难以提高肥料利用效率^[5]。因此,在稳定稻谷产量的同时,如何提高肥料利用效率、减少肥料投入与降低生产成本日益受到重视。

面对我国耕地面积的不断减少而粮食需求不断增长的局面,稳定和增加双季稻种植面积、提高双季稻单产是提高水稻和粮食总产的重要途径^[6]。长江中下游地区具备种植双季稻的土壤和气候条件,是我国最重要的水稻生产区域^[7]。

缓/控释肥料养分释放缓慢,肥效期长,在作物整个生长期可持续提供养分,简化了施肥技术,可节省人工成本,减少肥料流失^[8-9],但包膜控释尿素价格高,严重制约其推广应用^[10-11]。

因此,探索适宜的施用技术,提高产量和肥料利用效率的同时又能降低成本,是缓控释肥应用研究的重要方向。研究发现,氮肥减量施用能增加水稻产量,节本增效明显。鉴于控释氮肥的高肥力和长肥效作用,有研究认为减量施用控释氮肥依然可稳产甚至高产,这对于成本控制具有现实意义^[12]。目前,国内关于稻田施用缓控释肥料的研究报道主要集中在缓控释材料的筛选、养分释放和吸收利用方面,而关于缓控释肥对水稻产量形成、经济效益及光合特性方面的协同减施效应报道较少。为进一步研究缓控释肥在双季稻生产上的应用效果,以长江中游双季稻区为试验对象,研究缓控释尿素减施对双季稻产量、经济效益和光合特性的影响,并明确其适宜减施量及施用方法,旨在为南方双季稻区包膜控释肥料的推广应用及实现化肥减量减排、节本增效的目标提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试地点

长期定位试验于 2013 年在湖南省浏阳市原种场沿溪镇花园村(28°19'N, 113°49'E)开始进行(2013—2016 年每小区的施肥方式一致)。供试土壤为河流冲

积物发育的潮沙泥,0~20 cm 耕层的基本理化性质:有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 16.62、1.21、0.54、11.51 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 48.93、21.25、155.68 mg/kg, pH 为 5.61。

1.2 供试材料

2015 年和 2016 年供试早稻、晚稻品种均为中早 39 和泰优 390。供试氮肥为普通尿素(含 N 46%),控释尿素(山东金正大生态工程股份有限公司生产,树脂包膜,含 N 42%,控释期 3 个月);磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%);钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%)。

1.3 试验设计

采用田间小区试验,共设置 6 个处理:①不施氮肥(CK);②普通尿素(UREA);③等 N 量控释尿素(CRU1);④控释尿素减 N 10%(CRU2);⑤控释尿素减 N 20%(CRU3);⑥控释尿素减 N 30%(CRU4)。小区面积 20 m²(4 m×5 m),随机区组排列,重复 3 次。小区间用水泥田埂(宽 20 cm,高 20~25 cm)隔开,以防串水串肥。

早稻栽插株行距为 16.7 cm×20.0 cm,每穴 2 苗;CK、UREA、CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 处理 N 用量分别为 0、150、150、135、120、105 kg/hm²,P₂O₅、K₂O 用量均为 72、90 kg/hm²。晚稻栽插株行距为 20.0 cm×20.0 cm,每穴 2 苗;CK、UREA、CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 处理 N 用量分别为 0、180、180、162、144、126 kg/hm²,P₂O₅、K₂O 用量均为 60、105 kg/hm²。所有磷肥全部作基肥(土层混施)一次性施用,氮肥、钾肥作基肥(60%)(土层混施)和分蘖肥(40%)(表层撒施)施用。早稻施肥移栽、追肥、收获的时间分别为 2015 年 4 月 25 日、5 月 5 日和 7 月 17 日,2016 年 4 月 28 日、5 月 10 日和 7 月 23 日;晚稻施肥移栽、追肥、收获的时间分别为 2015 年 7 月 23 日、8 月 2 日和 11 月 1 日,2016 年 7 月 27 日、8 月 6 日、11 月 5 日。插秧后适当保持几天浅水,以后保持灌溉,促进分蘖,达到所需有效穗苗数的 90% 时开始晒田,培育壮秆;在孕穗期和灌浆期以湿润和浅水相间灌溉,乳熟期后自然落干直至收获。整个生育期按常规田间管理进行。

1.4 测定项目与分析方法

于水稻齐穗期,用美国产 LI-6400XT 便携式光合测量系统(LI-COR,美国),于晴天 9:00—11:00 分别测定剑叶净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、胞间 CO₂ 浓度(*Ci*)和蒸腾速率(*Tr*)。控制条件如下:CO₂ 浓度 400 μmol/mol,温度 30 °C,光照 1 000 μmol/(m²·s)。

3 次重复, 求其平均值。各小区测定 5 片代表性的主茎剑叶的中部, 每叶重复测定 3 次。

水稻成熟后, 按小区收获脱粒风干后按含水量 14% 测实产。每小区采水稻地上部 5 穴进行室内考种, 分别测定其株高、穗长、有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重等。

经济效益(元/hm²)=水稻产量×单价-肥料成本-人工费用^[13]。

谷草比=籽粒产量/秸秆产量。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行数据处理和分析, 处理间差异显著性分析采用最小显

著差异法(LSD)。

2 结果与分析

2.1 双季稻产量

由表 1 可知, 2015 年和 2016 年早、晚稻平均产量均以 CK 最低, 分别以 CRU2、CRU1 最高。说明双季稻田施用氮肥能显著增加籽粒产量。早、晚稻成熟期施 N 处理两年平均产量较 CK 处理增幅分别为 29.8% ~ 40.3% 和 36.8% ~ 67.4%。与 UREA 处理相比, CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理早稻两年平均产量分别提高 5.42%、8.14%、3.70% 和 2.56%, 晚稻分别提高 22.35%、21.78%、15.57%

表 1 不同施肥处理下双季稻产量及其构成因素(2015—2016 年平均)
Table 1 Yield and its components of double-cropping rice under different fertilization treatments

稻季	处理	株高(cm)	穗长(cm)	有效穗数($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数	每穗实粒数	结实率(%)
早稻	CK	69.5 a	18.9 ab	271.9 c	74.5 a	63.2 a	85.7 a
	UREA	72.3 a	19.2 ab	342.0 a	74.4 a	59.4 a	79.8 b
	CRU1	69.0 a	19.0 ab	332.3 ab	75.3 a	64.4 a	85.5 a
	CRU2	69.0 a	19.8 a	338.0 a	75.6 a	64.4 a	85.0 a
	CRU3	68.9 a	18.9 ab	320.8 ab	75.0 a	63.6 a	84.6 ab
	CRU4	68.4 a	18.3 b	299.0 bc	74.5 a	63.3 a	84.8 ab
	平均值	69.5	19.0	317.3	74.9	63.1	84.2
晚稻	CK	70.6 b	20.3 a	270.0 b	76.6 b	62.8 b	81.9 b
	UREA	73.2 ab	20.7 a	343.8 a	82.7 ab	69.6 ab	83.7 ab
	CRU1	76.6 ab	21.4 a	362.3 a	89.2 a	77.6 a	87.0 a
	CRU2	78.2 a	21.4 a	363.3 a	86.1 ab	74.7 a	86.3 ab
	CRU3	74.5 ab	20.9 a	356.7 a	84.3 ab	72.1 a	85.2 ab
	CRU4	74.8 ab	21.0 a	330.3 ab	83.8 ab	71.5 a	84.5 ab
	平均值	74.7	20.9	337.7	83.8	71.4	84.7
稻季	处理	总颖花数($\times 10^7/\text{hm}^2$)	总实粒数($\times 10^7/\text{hm}^2$)	千粒重(g)	谷草比	理论产量(t/hm ²)	实际产量(t/hm ²)
早稻	CK	20.1 a	17.1 a	27.2 a	1.14 a	4.5 b	4.1 c
	UREA	25.4 a	20.4 a	26.5 a	1.14 a	5.3 ab	5.3 b
	CRU1	25.0 a	21.4 a	27.1 a	1.11 a	5.7 a	5.6 ab
	CRU2	25.4 a	21.7 a	27.4 a	1.16 a	5.9 a	5.8 a
	CRU3	24.0 a	20.4 a	27.0 a	1.12 a	5.4 ab	5.5 ab
	CRU4	22.3 a	18.9 a	26.8 a	1.16 a	5.0 ab	5.5 ab
	平均值	23.7	20.0	27.0	1.14	5.3	5.3
晚稻	CK	20.5 b	16.7 c	24.8 a	1.19 b	4.2 d	4.3 e
	UREA	28.2 a	23.7 ab	25.5 a	1.13 b	6.0 bc	5.8 d
	CRU1	32.1 a	28.0 a	25.4 a	1.13 b	7.1 a	7.1 a
	CRU2	30.9 a	26.6 ab	26.2 a	1.13 b	6.9 ab	7.1 a
	CRU3	29.7 a	25.2 ab	25.6 a	1.26 a	6.4 abc	6.7 b
	CRU4	27.3 a	23.2 b	25.3 a	1.18 b	5.7 c	6.2 c
	平均值	28.1	23.9	25.5	1.20	6.0	6.2

注: 同列数据小写字母不同表示各稻季不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下表同。

和 6.69%。说明控释尿素养分释放缓慢, 利于作物吸收, 从而实现高产。相关性分析表明, 早、晚稻产量与施肥量呈线性正相关(早稻: $y = 0.0111x + 4.1679$, $R^2 = 0.9574$; 晚稻: $y = 0.0166x + 4.2563$, $R^2 = 0.9893$)。控释尿素处理间两年平均产量随着施 N 量的增加而增加。说明控释尿素减施能有效提高双季稻产量, 实现高产稳产, 而过量减 N 施用增产效果低。

2.2 双季稻产量构成因素

由表 1 可知, 早、晚稻施 N 处理两年平均总颖花数较 CK 处理增幅分别为 10.8%~26.2% 和 32.7%~56.4%; 两年平均总实粒数增幅分别为 10.7%~26.8% 和 38.5%~67.6%。与 UREA 处理相比, 早稻两年平均总颖花数 CRU2 处理提高 0.02%, CRU1、CRU3 和 CRU4 处理分别降低 1.55%、5.49%、12.20%; 总实粒数 CRU1、CRU2、CRU3 处理分别提高 5.16%、6.34%、0.05%, CRU4 处理则降低 7.11%。晚稻两年平均总颖花数和总实粒数 CRU1、CRU2、CRU3 处理分别提高 13.80%、9.55%、5.09% 和 18.25%、12.37%、6.53%, CRU4 处理分别降低 3.46% 和 2.29%。说明控释尿素能有效提高双季稻总颖花数及

总实粒数, 为高产稳产奠定基础, 而过量减 N 施用会导致总颖花数及总实粒数降低, 影响产量构成。

早、晚稻两年平均株高、穗长处理间差异不显著。早稻两年平均千粒重的处理间无显著差异, 而早稻控释尿素处理高于 UREA 处理, 晚稻施 N 处理高于 CK 处理。早稻两年的平均结实率各控释尿素处理与 CK 处理之间无明显差异, 但均显著高于 UREA 处理。说明控释尿素减施处理对水稻株高、穗长、结实率及千粒重无明显的影响。

2.3 早、晚稻各产量构成因素的相关性分析

各产量构成因素及其与水稻产量的相关性分析(表 2)显示, 2 种施肥模式间存在较大差异。早稻施肥中总颖花数和总实粒数与产量呈显著正相关, 其余性状与产量相关性不显著, 而株高、千粒重、结实率、谷草比与产量呈负相关; 分次施肥中水稻各产量构成因素与产量呈极显著正相关(千粒重除外), 而谷草比与产量呈负相关。不同施肥处理下水稻各相关性状间的相关规律也存在差异。说明控释尿素减量条件下, 要尽量协调有效穗数和每穗实粒数的关系, 即在保证一定数量的有效穗数基础上, 尽量稳定每穗实粒数。

表 2 不同施肥处理下水稻产量构成因素与产量间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between rice yield components and yield under different fertilization treatments

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
X1		0.937**	0.944**	0.960**	0.957**	0.795	0.969**	0.970**	0.975**	0.978**	-0.178
X2	-0.172		0.981**	0.853*	0.892*	0.845*	0.939**	0.918**	0.882*	0.894*	-0.373
X3	0.242	0.288		0.849*	0.947**	0.738	0.973**	0.965**	0.902*	0.919**	-0.393
X4	0.803	0.364	0.583		0.917**	0.821*	0.894*	0.918**	0.987**	0.978**	-0.214
X5	0.589	-0.450	0.639	0.506		0.647	0.975**	0.998**	0.967**	0.979**	-0.335
X6	-0.052	-0.642	0.441	-0.186	0.727		0.706	0.677	0.769	0.756	-0.263
X7	-0.120	-0.917*	-0.158	-0.502	0.453	0.809		0.986**	0.944**	0.959**	-0.271
X8	0.183	-0.921**	0.039	-0.197	0.703	0.850*	0.944**		0.966**	0.978**	-0.319
X9	0.826*	0.310	0.582	0.998**	0.550	-0.143	-0.450	-0.139		0.999**	-0.274
X10	0.879*	0.045	0.587	0.941**	0.748	0.096	-0.180	0.146	0.959**		-0.291
X11	-0.018	0.048	0.250	-0.114	-0.094	0.102	-0.118	-0.135	-0.127	-0.171	

注: X1: 产量, X2: 株高, X3: 穗长, X4: 有效穗数, X5: 每穗粒数, X6: 千粒重, X7: 结实率, X8: 每穗实粒数, X9: 总颖花数, X10: 总实粒数, X11: 谷草比。下三角(左下部分数据)表示早稻的相关系数; 上三角(右上部分数据)为晚稻的相关系数; *和**分别表示相关性达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。

2.4 双季稻经济效益

由表 3 可知, 早、晚稻施 N 处理经济效益较 CK 处理增幅为 26.0%~31.5% 和 32.6%~56.1%。与 UREA 处理相比, CRU2 处理早稻经济效益提高 3.00%, CRU1、CRU3 和 CRU4 处理分别降低 1.37%、0.75%、0.75%, 晚稻经济效益分别提高 17.03%、17.79%、12.18%、3.56%。说明施用控释尿素省工、

省时、高效, 能有效提高双季稻经济效益, 为农户增收奠定基础, 而过量减 N 施用会导致经济产值降低, 影响经济效益。

说明一定范围内控释尿素减施其水稻产值不减, 超过合理减施量则水稻产值较常规尿素低。虽然控释尿素成本较普通尿素高, 但其一次性基施降低了人工追肥成本。

表 3 不同施肥处理下双季稻的经济效益(2015—2016 年平均)
Table 3 Economic profits of double-cropping rice under different fertilization treatments

稻季	处理	经济产值(元/hm ²)	肥料成本(元/hm ²)	经济效益(元/hm ²)	较 CK 增收(%)
早稻	CK	10 687.8 c	960.0	9 727.8 b	-
	UREA	13 869.2 b	1 612.2	12 257.0 a	26.0
	CRU1	14 620.7 ab	2 531.4	12 089.2 a	24.3
	CRU2	14 998.4 a	2 374.3	12 624.1 a	29.8
	CRU3	14 382.0 ab	2 217.1	12 164.9 a	25.1
	CRU4	14 224.5 ab	2 060.0	12 164.5 a	25.0
	平均值	13 797.1	1 959.2	11 837.9	
晚稻	CK	11 082.6 e	960.0	10 122.6 d	-
	UREA	15 161.2 d	1 742.6	13 418.6 c	32.6
	CRU1	18 549.1 a	2 845.7	15 703.4 ab	55.1
	CRU2	18 462.6 a	2 657.1	15 805.5 a	56.1
	CRU3	17 521.3 b	2 468.6	15 052.7 b	48.7
	CRU4	16 176.3 c	2 280.0	13 896.3 c	37.3
	平均值	16 158.9	2 159.0	13 999.9	

注: 肥料价格(2015—2016 年): 普通尿素为 2.00 元/kg、树脂包膜尿素 4.40 元/kg、氯化钾为 3.20 元/kg、过磷酸钙为 0.80 元/kg。早、晚稻籽粒价格为 2.6 元/kg。经济效益(元/hm²)= 水稻产量×单价—肥料成本。

2.5 双季稻光合特性

由表 4 所示, 早、晚稻施 N 处理两年净光合速率较 CK 处理增幅为 0.02%~9.12% 和 0.07%~25.77%。与 UREA 处理相比, CRU1、CRU2 和 CRU3 处理早稻两年净光合速率分别提高 2.27%、3.68%、1.41%, CRU4 处理降低 3.18%; 晚稻两年净光合速率分别提高 5.81%、18.08%、15.77%、0.53%。说明施用控释尿素有利于提高水稻生育中后期叶片的净

光合速率。胞间 CO₂ 浓度的变化趋势与净光合速率相反。表明控释尿素减施水稻叶片同化利用 CO₂ 能力减弱。提高水稻功能叶净光合速率, 促进叶肉细胞的羧化效率, 提高 CO₂ 的同化速率。控释尿素合理减施能够提高水稻叶片蒸腾速率和气孔导度, 降低胞间 CO₂ 浓度, 表明在一定浓度范围内, 控释尿素合理减施能够提高叶片蒸腾速率, 调节气孔开闭, 增强 CO₂ 同化能力, 提高光合速率。

表 4 不同处理下双季稻齐穗期剑叶的光合特征参数(2016 年)
Table 2 Photosynthetic parameters of flat leaves of double-cropping rice at full heading stage under different treatments

稻季	处理	净光合速率 $Pn(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	气孔导度 $Gs(\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	胞间 CO ₂ 浓度 $Ci(\mu\text{mol}/\text{mol})$	蒸腾速率 $Tr(\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$
早稻	CK	18.3 a	0.310 a	249.94 a	7.39 a
	UREA	19.2 a	0.333 a	247.95 a	7.73 a
	CRU1	19.7 a	0.343 a	243.88 a	7.75 a
	CRU2	19.9 a	0.330 a	248.44 a	7.91 a
	CRU3	19.5 a	0.320 a	248.77 a	7.50 a
	CRU4	18.6 a	0.317 a	250.84 a	7.48 a
	平均值	19.19	0.33	248.30	7.63
晚稻	CK	12.0 b	0.287 a	295.94 a	5.80 a
	UREA	12.8 ab	0.307 a	288.92 a	6.30 a
	CRU1	13.5 ab	0.323 a	290.76 a	6.62 a
	CRU2	15.1 a	0.347 a	289.94 a	6.55 a
	CRU3	14.8 a	0.350 a	299.50 a	6.50 a
	CRU4	12.8 ab	0.310 a	301.30 a	6.32 a
	平均值	13.49	0.32	294.39	6.35

3 讨论

3.1 控释尿素减施对双季稻产量及其构成因素的影响

施用缓/控释肥能显著提高水稻地上部生物量和吸氮量, 提高土壤氮素残留, 减少氮素损失, 提高氮素的利用率^[14]。徐明岗等^[15]发现, 等量控释氮肥处理较普通尿素处理早、晚稻产量分别增加 3.61% 和 9.30%。与本研究结果一致, CRU 处理较 UREA 处理早、晚稻两年平均产量分别提高 5.42% 和 22.35%(表 1), 且晚稻较早稻增产效果好。主要由于双季早稻生育期短, 控释尿素前期养分不能及时释放造成有效穗下降, 加上生长后期控释尿素养分释放减慢, 每穗实粒数下降, 导致产量明显下降。

魏海燕等^[16]指出, 缓控释肥基施后分蘖期施用尿素处理能有效增加植株茎蘖数, 提高成穗率和最终穗数, 扩大叶面积指数, 增强光合势, 增加干物质和氮素的积累, 获得高产。鲁艳红等^[17]认为, 株高、每穗实粒数、结实率和千粒重的增加是早、晚稻增产的主要原因。相关性分析表明(表 3), 早、晚稻总颖花数、总实粒数与产量之间呈显著正相关(早稻: $r_{\text{总颖花数}}=0.826^*$, $r_{\text{总实粒数}}=0.879^*$; 晚稻: $r_{\text{总颖花数}}=0.975^{**}$, $r_{\text{总实粒数}}=0.978^{**}$)。控释氮肥增产原因在于作物生育中后期控释氮肥能够保证 N 素持续供应, 为作物灌浆孕穗提供充足的 N 素营养, 利于籽粒产量建成^[17]。郭晨等^[18]发现, 控释肥处理单位面积颖花量和实际产量之间呈极显著正相关关系。王强等^[19]发现, 树脂包膜型掺混控释肥较传统分次施肥具有增产作用主要是其在保证有效穗数、结实率及千粒重的基础上增加穗粒数。与本研究结果一致, 控释尿素能在确保千粒重及结实率的基础上, 提高或保持足够的有效穗数和穗粒数来提高产量。

相关研究表明: 控释尿素养分释放呈“S”型曲线, 一次性基施控释肥减少氮肥用量会导致水稻生长后期由于供肥不足而减产^[20]。鲁艳红等^[21]发现, 两种土壤上施用控释肥后早、晚稻产量较 UREA 处理明显提高, 特别是河沙泥中, 稻谷总产量以减 N 30% 处理最高, 较 UREA 处理增产 4.95%。本研究中, 早稻施用控释尿素在一定用量范围内, 双季稻产量随施 N 水平的提高而增加, 但是超过一定水平后, 氮肥施用会降低单位面积有效穗数, 同时造成水稻营养生长过剩而抑制生殖生长, 导致每穗粒数和结实率下降而影响产量^[22-23]; 晚稻产量随着施氮量的减少而显著降低。李敏等^[24]发现, 控释尿素减施 20% 较普通

尿素显著提高水稻产量, 增幅达 4.7%, 超过此减施量水稻产量显著降低。

3.2 控释尿素减施对双季稻经济效益的影响

缓控释肥能否在水稻生产中大面积推广主要取决于施肥的效果和成本。施用控释氮肥适当降低 N 用量, 能促进双季水稻增产、增加 N 素利用效率、维持或提高土壤 N 素肥力和可持续生产力, 控释氮肥养分释放规律的差异是导致其作用效应不同的主要原因^[17]。本研究中, 减少氮肥用量, 一定程度上降低肥料成本, 但主要因树脂包膜尿素比普通尿素能提高水稻产量, 获得较高的稻谷产值, 所以树脂包膜尿素减少 N 用量提高水稻经济效益。

陈远利等^[25]发现, 2009—2011 年大区定位对比, 水稻施用控释复合肥具有明显的增产节肥效果, 较常规施肥增产 7%~25%, 节肥 10%~20%, 667 m² 节省施肥用工 1~2 工。马昕等^[11]发现, 控释尿素(控释期 50 d 和 60 d)虽然肥料投入稍有增加, 但每公顷增收 3 000 元以上, 且施用释放长期的控释肥增收效果更好。李敏等^[24]发现, 经济效益以控释尿素减施 20% 处理最高, 较普通尿素处理产值增加 4.7%, 纯收入增加 5.7%, 控释尿素减量施用各处理较普通尿素均能有效提高水稻产投比。本研究中早稻净收入以 CRU1 处理最高, 控释尿素减量施用各处理的净收入则小于 UREA 处理。晚稻净收入各控释尿素处理均高于 UREA 处理, 且以 CRU2 处理效果最高。双季稻控释尿素施 N 量可降低 20%~30%, 水稻增产显著, 纯收益增加。生产企业应进一步改进缓控释肥的生产工艺流程, 降低生产成本, 提高其市场竞争力。通过多方面努力来降低缓控释肥的生产成本, 使之与常规肥料的成本投入相当或减少, 可以较快地促进缓控释肥被农户接受和应用。

3.3 控释尿素减施对双季稻光合特性的影响

聂军等^[26]发现, 施用控释尿素较普通尿素更能有效提高水稻生育中后期叶片叶绿素含量和净光合速率, 延长生育后期功能叶的光合功能, 延缓叶片衰老, 提高产量。李敏等^[4]发现, 与普通尿素一次性基施相比, 90 d 硫膜和树脂膜控释尿素均能显著提高盆栽水稻籽粒产量, 增幅分别达 15.1%~51.4%, 显著提高水稻生育中后期叶片净光合速率及 SPAD 值, 可延缓叶片衰老。本试验研究结果与此一致, 水稻进入抽穗期后, 施用控释尿素的水稻叶片净光合速率显著高于普通尿素, 与控释尿素供 N 特征有关。

郭智等^[27]发现, 氮肥减施对水稻叶片色素含量及净光合速率影响较大。减施 15% 氮肥处理较常规

施肥处理灌浆前期水稻叶片 Chl a、Chl a+b 含量及叶片净光合速率均未显著降低。随氮肥减施幅度的增大和处理时间的延长, 叶片色素含量及 Pn 显著下降。本研究中, 氮肥减施(减施 30% 氮肥)显著降低水稻叶片色素含量及净光合速率, 且随生育进程进一步降低。氮肥减施 30% 条件下, 水稻对光能的利用量显著下降。适宜减量施用水稻胞间 CO_2 浓度较低, 能促进叶肉细胞的羧化效率, 提高 CO_2 同化速率, 明显提高水稻生育后期剑叶的光合速率, 并延长叶片光合功能期和截光时间。

4 结论

控释肥技术工效高, 劳动强度低, 符合国家“一控、两减、三基本”中减少农药化肥使用量的目标要求, 易于在农业生产中大面积使用。控释尿素减量施用能有效提高库容量, 增强光合作用效率, 保证水稻稳产、高产, 节支效果明显。其中, 以控释尿素减 N 10%~20% 处理效果最佳, 且晚稻中施用效果更好。

参考文献:

- [1] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.
- [2] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1136-1143.
- [3] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1067-1077.
- [4] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808-815.
- [5] 张小翠, 戴其根, 胡星星, 等. 不同质地土壤下缓释尿素与常规尿素配施对水稻产量及其生长发育的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(8): 1494-1503.
- [6] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成, 等. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策[J]. 中国稻米, 2013, 19(4): 1-4.
- [7] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展[J]. 中国农业科学, 2011, 44(2): 254-262.
- [8] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463-473.
- [9] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 988-995.
- [10] 袁嫚嫚, 叶舒娅, 刘枫, 等. 树脂包膜尿素对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 83-87.
- [11] 马昕, 杨艳明, 刘智蕾, 等. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1095-1103.
- [12] 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.
- [13] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田水稻产量和经济效益的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3517-3525.
- [14] 侯红乾, 冀建华, 刘益仁, 等. 缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 43-50.
- [15] 徐明岗, 李菊梅, 李冬初, 等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1010-1015.
- [16] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(5): 730-740.
- [17] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 155-161, 174.
- [18] 郭晨, 徐正伟, 李小坤, 等. 不同施氮处理对水稻产量、氮素吸收及利用率的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4): 618-622.
- [19] 王强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 长江下游单季稻一次性施肥产量效应及影响因子研究[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(11): 1875-1881.
- [20] 张海军, 武志杰, 梁文举, 等. 包膜肥料养分控释机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2337-2341.
- [21] 鲁艳红, 纪雄辉, 郑圣先, 等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 490-495.
- [22] 韦正宝. 不同控释氮肥用量对早稻生长性状及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2011, 42(4): 388-390.
- [23] 龙继锐, 马国辉, 周静, 等. 缓释尿素对超级杂交稻 Y 两优 1 号生长发育及氮肥利用率的影响[J]. 杂交水稻, 2007, 22(6): 48-51.
- [24] 李敏, 郑仁兵, 韩上, 等. 控释尿素减量施用的水稻产量效应研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(22): 83-84, 100.
- [25] 陈远利, 吴良欢, 董作珍, 等. 水稻施用控释复合肥效果初报[J]. 浙江农业科学, 2012, 53(8): 1095-1097.
- [26] 聂军, 郑圣先, 戴平安, 等. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(3): 255-261.
- [27] 郭智, 刘红江, 张岳芳, 等. 氮磷减施对水稻剑叶光合特性、产量及氮素利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2263-2269.