

两种控释氮肥养分释放特性及其在双季水稻上的应用效果

廖育林^{1, 2} 鲁艳红^{1, 2} 聂军^{1, 2*} 周兴^{1, 2} 谢坚^{1, 2} 杨曾平^{1, 2}

(1 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙, 410125; 2 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南长沙, 410125)

摘要: 研究不同控释氮肥的养分释放规律及其在减氮量施用条件下早、晚稻产量效应、氮素吸收利用和土壤氮素养分特性的差异, 为南方双季稻区控释氮肥在水稻高产节肥栽培上的应用提供参考。采用静水溶解试验和田间小区试验研究了2种控释氮肥(树脂包膜尿素和硫包膜尿素)的养分释放特性和在常规尿素施氮量基础上减氮15%和30%对早、晚稻产量、产量构成因素、氮素养分吸收利用及土壤氮素养分含量的影响。结果表明, 两种控释氮肥的氮素累积释放曲线均为“S”形, 但在培养期间硫包膜尿素氮素累积释放率均高于树脂包膜尿素。在田间条件下, 与常规尿素处理相比, 早稻减氮15%和30%施用硫包膜尿素和树脂包膜尿素均表现为增产, 而晚稻施硫包膜尿素增产, 施树脂包膜尿素减产。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。施用2种控释氮肥均能促进早、晚稻水稻植株氮素养分的吸收积累, 施用相同种类控释氮肥早晚稻稻谷、稻草和植株氮养分积累量随施氮量提高而提高。减氮15%和30%施用2种控释氮肥有利于氮肥回收利用率、氮肥偏生产力及氮肥农学效率的提高, 在同一施氮水平下, 硫包膜尿素的提高效果优于树脂包膜尿素。常规尿素处理、减15%氮的2种控释氮肥处理均能保持较高的土壤氮素水平, 减30%氮的控释氮肥处理土壤氮素肥力较试验前有所降低。适当降低氮用量施用控释氮肥, 能促进双季水稻增产、增加氮素利用效率、维持或提高土壤氮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。

关键词: 控释氮肥; 养分释放特性; 双季稻产量; 氮素吸收; 土壤氮素肥力

化肥氮的施用在我国农业生产中发挥了举足轻重的作用, 但近年来随着我国氮肥施用量快速增加, 氮肥增产效应呈递减趋势, 氮肥当季利用率偏低、损失率偏高, 环境风险增加等问题日益凸显^[1]。在我国耕地资源有限、人口压力大的现实国情下, 如何在提高氮肥增产效应的同时, 降低施肥对环境的负面作用、提高氮肥利用效率已成为我国农业可持续发展的必然要求。

肥料中氮素养分供应与作物吸收的同步性将促进作物高产和氮素养分高效利用, 减少氮素损失和提高氮肥利用效率^[2]。普通化肥氮如尿素, 由于其速效性特点, 施入稻田后短时间内迅速溶解, 一次性基施通常导致水稻前期养分供应过量, 中后期营养供应不足, 养分利用率低、损失率高^[3], 只有通过分次施用才能达到为作物全生育期提供养分的目的, 但分次施用方法并不适应目前农村劳动力日益紧缺的现状。控释氮肥通过各种调控机制有效控制养分

释放速度和时间, 延长植物对其养分吸收利用的有效期, 达到一次性全量基施即可满足作物全生育期对氮素养分的生理需求, 实现作物增产, 促进植株氮素的吸收利用^[4], 同时还可适当减少施氮量, 提高氮肥利用效率^[5], 减少对环境的污染。但不同类型控释氮肥养分释放速率和规律也不尽相同, 肥料效应也存在差异。因此, 在一定生态区域内, 针对不同作物筛选适合的控释肥料类型及确定适宜的肥料用量和施用方法, 对实现区域农业高效生产和生态环境保护具有重要意义。

本研究以南方双季水稻为对象, 选用树脂包膜尿素(PFU)和硫包膜尿素(SCU)2种具有较好代表性的控释氮肥, 研究其减氮量施用条件下在早、晚稻上的产量效应、氮素吸收

利用和土壤氮素养分特性, 并通过静水溶解实验分析2种控释氮肥的养分释放特性差异, 比较评价2种控施氮

基金项目: 国际植物营养研究所(IPNI)资助项目(IPNI-HN-17)。

作者简介: 廖育林(1975-), 男, 湖南新化人, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养与施肥原理研究。E-mail: ylliao2006@126.com

通讯作者: 聂军(1972-), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究员, 主要从事土壤与施肥原理方面的研究。E-mail: junnie@foxmail.com

肥在双季水稻节氮高产、高效栽培应用的节肥增效机理、适宜施用量及施用方法, 以期为南方双季稻区水稻高产节肥栽培生产上控释氮肥的推广应用提供理论依据和数据支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地点描述

试验于2014年在宁乡县回龙铺镇天鹅村(北纬 $N 28^{\circ}12'$, 东经 $112^{\circ}26'$, 海拔高度60米)进行, 试验区属亚热带大陆性季风湿润气候, 年均降雨量1358毫米, 年均气温 $16.8^{\circ}C$, 年均无霜期274天, 年均日照时数1739小时。供试稻田土壤为白鳝泥田。试验前耕层0-20厘米土壤基本理化性状为: pH 6.5, 有机质58.3克/公斤, 全氮2.84克/公斤, 全磷0.75克/公斤, 全钾11.2克/公斤, 碱解氮279.3毫克/公斤, 有效磷8.5毫克/公斤, 速效钾57.0毫克/公斤。

1.2 田间试验设计

试验共设6个处理。处理1: CK(不施任何肥料); 处理2: CF(常规施肥, 氮肥用普通尿素, 磷肥为过磷酸钙、钾肥为氯化钾); 处理3: 85%PSU(节氮15%, 氮肥用树脂包膜尿素, 磷钾肥同CF处理); 处理4: 70%PSU(节氮30%, 氮肥用树脂包膜尿素, 磷钾肥同CF处理); 处理5: 85%SCU(节氮15%, 氮肥用硫包膜尿素, 磷钾肥同CF处理); 处理6: 70%SCU(节氮30%, 氮肥用硫包膜尿素, 磷钾肥同CF处理)。CF处理的施肥量按早稻氮(纯氮)10公斤/亩, 磷(五氧化二磷)5公斤/亩、钾(氧化钾)6公斤/亩, 晚稻氮(纯氮)12公斤/亩, 磷(五氧化二磷)3公斤/亩、钾(氧化钾)8公斤/亩施用, 其他施肥处理的施氮量按处理设计施用, 磷、钾用量与CF处理一致。尿素分2次施用, 其中70%做基肥施入, 余下30%做分蘖肥追施, 控释氮肥做基肥一次性施入, 磷肥做基肥一次性施入, 钾肥按50%做基肥、50%做分蘖肥施入。基肥于抛秧前1d施入, 施入后立即用铁齿耙耙入5cm深的土层内, 分蘖肥于抛秧后7-10天撒施。早稻品种为常规稻湘早粳45号, 4月20日抛秧, 每亩抛2.5万株, 7月15日收获; 晚稻品种(组合)为杂交稻荆楚优148, 7月18日抛秧, 每亩抛1.8万株, 10月24日收获。试验设3次重复, 小区面积20平方米, 随机区组排列。小区间砌20厘米高、30厘米宽的泥埂覆膜隔离, 实行单独排灌。其他管理与大田相同。

1.3 静水溶解实验设计

实验室条件下采用静水溶解法测定2种控释氮肥的氮素养分初期溶出率、时段释放率和累积释放率。称取10.0克肥料放入小网袋中, 置于300毫升玻璃瓶中, 加入250毫升蒸馏水, 加盖密封在 $25^{\circ}C$ 的恒温条件下培养。前7天内分别在第1天(24小时)、第3天、第5天和第7天测定培养液中总氮含量, 以后每隔7天测定一次, 培养期共91天。测定时先将全部培养液转出, 取溶液10毫升转移至100毫升容量瓶定容, 取样时注意使溶液浓度保持一致。然后用去离子水将网袋连同袋中肥料冲洗干净后再次放入玻璃瓶中, 再向瓶中加入250毫升去离子水, 继续培养。肥料样品3次重复。

1.4 分析测定项目

1.4.1 控释氮肥氮素养分溶出率的测定

用凯氏法^[6]测定实验室静水溶解培养液含氮量。氮素养分累积释放率按下式计算:

初期溶出率(%) = 24 小时溶出的氮素养分量 / 试样中的氮量 $\times 100\%$

氮素养分累积释放率(%) = n 天氮的累积溶出量 / 试样中的氮量 $\times 100\%$

1.4.2 田间试验分析测定项目

田间试验开始前采集0-20厘米耕层土样, 用于测定pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾。早、晚稻成熟期各小区单打单晒, 分别测产, 并采集各小区植株样用于考种并测定稻谷和稻草的氮含量。早、晚稻成熟期采集各小区耕层土样, 用于全氮和碱解氮测定。土样和植株样品均采用常规方法分析测定^[6]。

1.5 数据处理

采用如下方法计算氮素养分吸收量及氮素养分利用效率的相关参数^[7]:

稻谷氮吸收量(公斤/亩) = 稻谷产量 \times 稻谷氮含量
植株氮总吸收量(公斤/亩) = 稻谷产量 \times 稻谷氮含量 + 稻草产量 \times 稻草氮含量

氮肥回收利用率(%) = (施肥区地上部氮吸收量 - 对照区地上部氮吸收量) / 施氮量 $\times 100\%$

氮肥农学效率(公斤稻谷/公斤氮) = (施肥区籽粒产量 - 对照区籽粒产量) / 施氮量

氮肥偏生产力(公斤稻谷/公斤氮) = 施肥区籽粒产量 / 施氮量

氮素生理利用率(公斤稻谷/公斤氮)=(施肥区籽粒产量-对照区籽粒产量)/(施肥区地上部氮吸收量-对照区地上部吸氮量)

氮收获指数(%)=籽粒吸氮量/地上部氮吸收量×100%

在本试验中由于未设置不施氮肥仅施磷钾肥的处理,计算上述参数采用不施任何肥料处理(CK)为对照。数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.5 等数据处理系统。

2 结果与分析

2.1 2种控释氮肥的氮素静水释放特征

在 25℃ 静水溶解条件下,两种控释氮肥的氮素累积释放曲线均为“S”形,累积释放率随培养时间增加,在整个培养期间,硫包膜尿素氮素累积释放率均高于树脂包膜尿素(图 1 a)。硫包膜尿素初期溶出率为 7.7%,树脂包膜尿素初期溶出率仅为 3.6%;在培养 7 天和 14 天硫包膜尿素氮素累积释放率分别达到 19.3% 和 23.1%,树脂包膜尿素氮素累积释放率分别为 13.7% 和 16.2%;在培养 28 天硫包膜尿素氮素累积释放率为 34.0%,树脂包膜尿素仅为 22.4%;硫包膜尿素氮素累积释放率在 63 天达到 80.3%,树脂包膜尿素氮素释放率在 77 天达到 80.1%。

由树脂包膜尿素和硫包膜尿素的氮素时段释放曲线(图 1 b)可以看出,两种控释氮肥都存在 1 个释放高峰期,硫包膜尿素的氮素释放高峰期为第 35-49 天,树脂包膜尿素的氮素释放高峰期为 56-70 天,树脂包膜尿素较硫包膜尿素大约晚 20 天。

2.2 不同施肥处理对水稻产量和产量构成因素的影响

2.2.1 不同施肥处理早晚稻产量效应

试验结果表明,2种控释氮肥在常规施氮基础上节氮 15% 和 30% 施用对早、晚稻稻谷产量和生物产量的效应有所差异(表 1)。节氮 15% 和 30% 的硫包膜尿素处理(85%CSU 和 70%CSU)早、晚稻稻谷产量和生物产量均高于 CF 处理,其中早稻稻谷产量和生物产量与 CF 处理间差异均达到显著水平($p < 0.05$),晚稻 70%CSU 处理稻谷产量与 CF 处理间差异达到显著水平($p < 0.05$),生物产量差异不显著,晚稻 85%CSU 处理稻谷产量和生物产量与 CF 处理之间差异不显著($p > 0.05$)。节氮 15% 和 30% 树脂包膜尿素处理(70%PSU 和 85%PSU)早稻稻谷产量和生物产量均高于 CF 处理,但差异均未达到显著水平($p > 0.05$),晚稻稻谷产量和生物产量则均显著低于 CF 处理($p < 0.05$)。

在本试验条件下,硫包膜尿素减量施用早晚稻均取得较好增产效应。早晚稻减量 15% 和 30% 施用硫包膜尿素均能促进水稻生长,取得较高产量,其中早稻节氮 15% 硫包膜尿素的增产效果优于节氮 30% 硫包膜尿素处理,晚稻节氮 30% 的硫包膜尿素增产效果优于节氮 15% 处理。早稻节氮 15% 和 30% 施用树脂包膜尿素也可实现一定的增产,而晚稻则表现为减产。

2.2.2 不同施肥处理对早、晚稻产量构成因素的影响

不同施肥处理对早、晚稻株高、穗长、有效穗、每穗实粒数、结实率和千粒重等产量构成因素也有一定的影响(表 1)。各施肥处理的早、晚稻株高、穗长、有效穗、每穗实粒数和千粒重均高于 CK 处理,早稻产量较

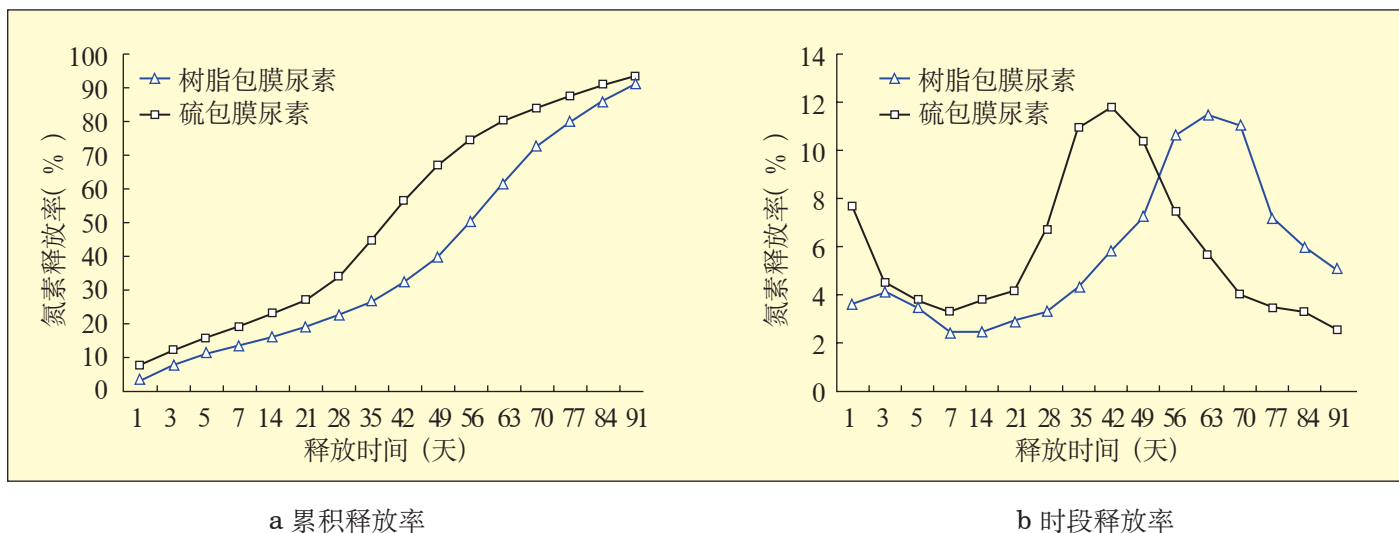


图 1 2种控释氮肥 25℃ 静水下的氮素释放率

表 1 不同施肥处理早晚稻产量及产量构成因素

处理	稻谷产量	生物产量	株高	穗长	有效穗	实粒数	结实率	千粒重
	(公斤/亩)		(厘米)		(穗/蔸)	(粒/穗)	(%)	(克)
早 稻								
CK	264.2c	490.0c	65.3b	19.5b	8.9b	50.2c	76.1d	23.5c
CF	374.9b	706.7b	79.8a	20.2a	12.4a	52.6b	75.9d	23.8bc
85%PSU	402.7ab	762.3ab	80.6a	20.3a	13.3a	52.7b	76.8c	24.1b
70%PSU	384.8b	751.2ab	80.1a	20.1a	13.1a	51.4bc	76.3cd	24.2b
85%CSU	428.1a	787.9a	81.9a	20.4a	12.5a	56.3a	78.7a	25.1a
70%CSU	423.2a	791.2a	81.2a	20.2a	12.3a	55.6a	77.9b	24.9a
晚 稻								
CK	337.5e	636.2e	91.4c	23.2b	9.5d	70.1d	73.3e	25.4c
CF	576.9b	1096.5ab	108.3ab	24.7a	12.4c	92.7ab	81.4b	27.5a
85%PSU	535.3c	1021.9c	108.6ab	23.6b	13.7a	80.1c	78.3c	26.0b
70%PSU	495.6d	926.5d	107.1b	23.9ab	13.5ab	81.1c	76.7d	26.1b
85%CSU	577.1b	1092.4b	112.6a	24.7a	12.7abc	91.1b	82.1a	27.4a
70%CSU	598.6a	1123.6a	110.8ab	24.7a	12.5bc	93.5a	82.5a	27.4a

注：采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验，早稻、晚稻同列数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

表 2 早、晚稻产量与产量构成因素的相关系数表 (样本个数 n=6)

	株高	穗长	有效穗	每穗实粒数	结实率	千粒重
早 稻						
稻谷产量	0.945 ^{**}	0.923 ^{**}	0.782 ^{**}	0.664 [*]	0.437	0.680 [*]
生物产量	0.970 ^{**}	0.902 ^{**}	0.862 ^{**}	0.875 ^{**}	0.335	0.599 [*]
晚 稻						
稻谷产量	0.929 ^{**}	0.754 [*]	0.561	0.544	0.909 ^{**}	0.743 [*]
生物产量	0.924 ^{**}	0.560	0.740 [*]	0.864 ^{**}	0.907 ^{**}	0.736 [*]

注：^{*}和^{**}分别表示相关性达到 0.05 和 0.01 的显著和极显著水平。

高的 85%CSU 和 70%CSU 处理的株高、每穗实粒数、结实率和千粒重均高于其他施肥处理，晚稻产量较高的 85%CSU、70%CSU 和 CF 处理的株高、穗长、每穗实粒数、结实率和千粒重也较高。这些指标的变化趋势与产量变化趋势基本一致，相关分析 (表 2) 表明早稻株高、穗长、有效穗与稻谷产量极显著正相关 ($p < 0.01$)，每穗实粒数、千粒重与稻谷产量显著正相关 ($p < 0.05$)；晚稻株高、结实率与稻谷产量极显著正相关 ($p < 0.01$)，穗长、千粒重与稻谷产量显著正相关 ($p < 0.05$)。早稻株高、穗长、有效穗、每穗实粒数与生物产量极显著正相关 ($p < 0.01$)，千粒重与生物产量显著正相关 ($p < 0.05$)；晚稻株高、每穗实粒数、结实率与生物产量极显著正相关 ($p < 0.01$)，有效穗、千粒重与生物产量显著正相关 ($p < 0.05$)。

2.3 不同施肥处理对早晚稻氮吸收利用的影响

2.3.1 不同施肥处理对植株氮养分吸收量的影响

不同施肥处理早、晚稻稻谷、稻草氮养分含量存在差

异 (表 3)。不同施肥处理对早晚稻稻谷、稻草和植株氮养分积累量存在较为明显的影响 (表 3)。早、晚稻各施肥处理稻谷、稻草及植株氮素养分积累量均显著高于 CK 处理 ($p < 0.05$)；除晚稻 70%PSU 处理，节氮 15% 和 30% 水平的 2 种控释氮肥处理早晚稻稻谷、稻草和植株氮素养分总积累量均高于常规施氮量的 CF 处理；早晚稻施用同种类型控释氮肥，施氮量较高的处理稻谷、稻草和植株氮素养分总积累也较高。

在节氮 15% 和 30% 水平下，施用树脂包膜尿素和硫包膜尿素均能提高早晚稻稻谷、稻草和植株氮素养分总积累量；相同施氮量水平下，早稻两种控释氮肥处理间的差异不明显，而晚稻硫包膜尿素处理稻谷、稻草和植株氮素养分总积累量提高效果优于树脂包膜尿素处理。

2.3.2 不同施肥处理对氮养分吸收利用效率的影响

氮肥回收利用率 (NRE) 反映作物对肥料中氮素的吸收效率。用差减法计算氮肥利用率的结果表明 (表 4)，

表 3 不同施肥处理早、晚稻稻谷和稻草的氮素养分含量及积累量

处理	全氮含量(克/公斤)		氮素养分吸收量(公斤/亩)		植株氮素养分总吸收量(公斤/亩)
	稻谷	稻草	稻谷	稻草	
早 稻					
CK	1.37c	1.05b	3.62d	2.37b	5.99c
CF	1.42bc	1.16a	5.33c	3.85a	9.17b
85%PSU	1.51a	1.13a	6.08a	4.06a	10.15a
70%PSU	1.45b	1.14a	5.58bc	4.18a	9.75ab
85%CSU	1.41bc	1.15a	6.04ab	4.14a	10.17a
70%CSU	1.37c	1.08b	5.80abc	3.97a	9.77ab
晚 稻					
CK	1.22bc	1.51a	4.12d	4.51d	8.63d
CF	1.08e	1.27c	6.23c	6.60c	12.83c
85%PSU	1.26ab	1.55a	6.75b	7.54a	14.29ab
70%PSU	1.29a	1.53a	6.39c	6.59c	12.99c
85%CSU	1.21cd	1.48a	6.98a	7.63a	14.61a
70%CSU	1.17d	1.37b	7.00a	7.19b	14.19b

表 4 不同施肥处理对早、晚稻氮素养分吸收利用效率的影响

处理	氮肥回收利用率 (%)	氮肥偏生产力	氮肥农学效率 (公斤稻谷/公斤氮)		氮收获指数 (%)
			氮素生理利用率		
早 稻					
CK	--	--	--	--	60.4
CF	31.8b	37.5d	11.1b	34.8c	58.0
85%PSU	48.9a	45.3c	14.2b	29.1d	59.9
70%PSU	53.8a	57.5a	19.8a	36.9bc	57.2
85%CSU	49.2a	50.4b	19.3a	39.2ab	59.3
70%CSU	54.0a	60.5a	22.7a	42.0a	59.3
晚 稻					
CK	--	--	--	--	47.7
CF	35.0d	48.1d	19.9c	52.6a	48.6
85%PSU	55.5bc	48.6d	15.5d	28.0d	47.2
70%PSU	51.9c	63.7b	23.5b	45.5b	49.2
85%CSU	58.6a	56.6c	23.5b	40.1c	47.8
70%CSU	66.3a	71.3a	31.1a	46.9b	49.3

减氮 15% 和 30% 的 2 种控释氮肥处理均能较常规尿素处理提高氮肥回收利用率, 且硫包膜尿素的效果优于树脂包膜尿素。与 CF 处理相比, 早稻减 15% 氮量树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理(85%PSU 和 85%CSU)较 CF 处理氮肥回收利用率分别提高 53.8% 和 54.7%, 晚稻分别提高 58.6% 和 67.4%; 早稻减 30% 氮量的树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理(70%PSU 和 70%CSU)较 CF 处理氮肥回收利用率分别提高 69.2% 和 69.8%, 晚稻分别提高 48.3% 和 89.4%。早、晚稻控释氮肥处理氮肥回收利用率与 CF 处理间的差异均达到显著水平($p < 0.05$)。施用相同种类的控释氮肥, 除晚稻树脂包膜尿素处理(85%PSU 和 70%PSU), 其它控释氮肥处理的氮肥回收利用率均随施

氮量的减少而提高。

氮肥偏生产力(PFP)反映了单位施氮量对产量的贡献。与施用尿素相比, 减量施用不同控释氮肥对氮肥偏生产力均有提高作用(表 4), 且硫包膜尿素的提高效果优于树脂包膜尿素。与 CF 处理相比, 早稻减 15% 氮量的树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理(85%PSU 和 85%CSU)较 CF 处理氮肥偏生产力分别提高 20.8% 和 34.4%, 晚稻分别提高 1.0% 和 17.7%; 早稻减 30% 氮量的树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理(70%PSU 和 70%CSU)较 CF 处理氮肥偏生产力分别提高 53.3% 和 61.3%, 晚稻分别提高 32.4% 和 48.2%。除晚稻 85%PSU 处理, 其他施控释氮肥处理早晚稻氮肥偏生产力与 CF 处理间的差异均达显著

水平 ($p < 0.05$)；施用相同类型的控释氮肥，早晚稻氮肥偏生产力均随氮用量的减少而提高。

氮肥农学效率 (ANUE) 表征单位施氮量作物经济产量增加量，反映单位氮肥用量增产效果。试验结果 (表 4) 表明除晚稻 85%PSU 处理，其他控释氮肥处理早晚稻氮肥农学效率均较 CF 处理有所提高；各施肥处理早稻氮肥农学效率在 11.1–22.7 公斤稻谷 / 公斤氮之间变化，晚稻在 15.5–31.1 公斤稻谷 / 公斤氮之间变化；在相同施氮量水平下，早晚稻施用硫包膜尿素对氮肥农学效率的提高作用均优于树脂包膜尿素。

氮素生理利用率 (NPE) 是施用氮肥增加的作物经济产量与相应的植株氮素积累量增加量的比值，反映氮素的籽粒生产效率。不同施肥处理对氮素生理利用率存在明显影响 (表 4)。早稻除 85%PSU 处理外，其他控释氮肥处理氮素生理利用率均较 CF 处理有所提高；而晚稻所有控释氮肥处理的氮素生理利用率较 CF 处理均降低。在不同类型控释氮肥中，施氮量相同条件下，早晚硫包膜尿素处理的氮素生理利用率均显著高于树脂包膜尿素处理 ($p < 0.05$)；对于同一种控释氮肥，早晚稻氮素生理利用率均随氮肥施用量减少而提高。

氮收获指数 (NHI) 反映氮素在植株营养器官与生殖器官间的分配。结果表明不同处理对早晚稻氮收获指数有一定的影响 (表 4)。其中，早稻各处理氮收获指数在 57.2%–60.4% 之间变化，晚稻在 47.2%–49.3% 之间变化。

2.4 不同施肥处理对早、晚稻土壤氮素养分的影响

土壤全氮和碱解氮是表征土壤供氮能力的重要指标，土壤中碱解氮的变化直接反映了土壤的供氮强度。从表 5 可以看出，不同处理对早、晚稻后土壤全氮、碱解氮有一定的影响。早稻后土壤全氮含量最高的为 85%CSU 处理，其次为 85%PSU 和 CF 处理，碱解氮最高的为 85%CSU 处理，其次为 85%PSU 处理；晚稻后土壤全氮含量最高的为 85%CSU 处理，其次为 CF 和 85%PSU 处理，碱

解氮最高的为 85%PSU 处理，其次为 CF 和 85%CSU 处理。早稻后土壤全氮含量最低的为 70%CSU 处理，其次为 70%PSU 处理，碱解氮最低的为 CK 处理，其次为 70%CSU 处理；晚稻后土壤全氮含量最低的为 CK 处理，70%PSU 和 70%CSU 处理也较低，碱解氮最低的为 70%CSU 处理，其次为 CK 处理。表明常规尿素处理、减 15% 氮量的树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理均能保持土壤较高的氮素肥力水平，减 30% 氮量的控释氮肥处理，尤其是减 30% 氮量硫包膜尿素处理不利于土壤氮素肥力的保持。

3 讨论与结论

氮肥合理施用是水稻生产稳产、高产的基本保证，对提高氮肥利用率和增产效果具有双重意义。合理施用氮肥包括适宜施氮量的确定和适宜肥料类型的选择等，如将普通氮肥改为施用控释氮肥就是方法之一，已有研究结果表明施用控释氮肥能明显提高氮肥利用率和水稻产量^[8]。

缓控释肥对作物产量形成和产量构成因素的影响已有较多研究，普遍认为缓控释肥作为基肥一次性施入，由于有效延缓养分释放量和释放速率，达到与作物需肥规律基本吻合，从而有利于作物产量的形成^[9]。水稻产量的形成过程其实质是干物质生产、分配、转运的过程^[10]，水稻营养生长阶段的干物质积累是后期产量形成的重要基础，因此要实现水稻高产的目标，必须满足水稻不同生长阶段对养分的需求。在此阶段提供水稻生长充足的氮素养分对水稻获得高产十分关键。在本试验中，与常规尿素处理相比，早晚稻减量 15% 和 30% 施用硫包膜尿素均显著增产，早稻节氮 15% 和 30% 施用树脂包膜尿素也在一定程度上提高了产量，但增产效果不及施用硫包膜尿素的处理，而晚稻较常规尿素处理产量下降。导致 2 种控释氮肥早晚稻产量效应差异可能与它们的氮素养分释放规律差异导致养分供应与水稻生长对养分需求的同步性和匹配性有关。硫

表 5 不同施肥处理早、晚稻土壤氮素养分含量变化的影响

处理	早稻后		晚稻后	
	全氮 (克 / 公斤)	碱解氮 (毫克 / 公斤)	全氮 (克 / 公斤)	碱解氮 (毫克 / 公斤)
CK	2.57	252.4	2.47	172.3
CF	2.85	279.2	2.87	202.6
85%PSU	2.87	298.1	2.84	206.2
70%PSU	2.50	279.2	2.54	193.3
85%CSU	3.05	317.6	2.88	199.7
70%CSU	2.43	259.2	2.54	162.1

包膜尿素静水培养 14 天的氮素累积释放率为 23.1%，较树脂包膜尿素高 6.9 个百分点，培养 28 天硫包膜尿素累积释放率为 34.0%，较树脂包膜尿素高 11.6 个百分点，硫包膜尿素的氮素释放高峰期为 35–49d，而树脂包膜尿素较其晚 20d 左右。有研究认为在水稻不同生育期中分蘖期和孕穗期是吸氮最多的时期^[11]，拔节至抽穗期是水稻的吸氮高峰^[12]，水稻移栽后 10–50 天正是作物氮素养分需求量较大的时期，硫包膜尿素的养分释放速率和释放时间可能与该种植条件下的水稻养分需要规律匹配较好，因此有利于促进水稻作物生长和产量形成；而树脂包膜尿素氮素养分前期释放较慢，释放时间较长可能造成早稻增产效果不及硫包膜尿素，晚稻期间更是由于养分释放较慢的特性，不能满足晚稻分蘖较早稻提早对氮素养分的需求，导致氮素养分供应不足，未能为后期生长和产量形成提供好的前期基础从而导致减产。

氮素是水稻产量主要影响因子，氮素的增产作用主要通过提高有效穗数与每穗粒数获得^[13]，谢春生的研究认为一次性施用控释肥增加了水稻成穗数、穗粒数从而实现增产^[14]。本研究结果表明早晚稻产量较高的 85%CSU 和 70%CSU 处理株高、每穗实粒数、结实率和千粒重也较高，可能是与硫包膜尿素的养分释放规律与水稻生长需肥规律较为同步有关。晚稻产量较低的 85%PSU 和 70%PSU 处理的穗长、每穗实粒数、结实率和千粒重也较低，可能与树脂包膜尿素前期释放率低、释放量少而未能满足水稻生长前期对氮素养分需求有关。符建荣认为将少量的速效氮肥与缓控释肥料配合后一次基施的方法可以满足作物前期对氮素的需要，保证有足够的分蘖数和较多有效穗而获得高产^[15]，因此，也可在本研究基础上进一步针对树脂包膜尿素前期释放率低的情况考虑用少量速效氮肥与其配合施用进行研究。

评价一种肥料在特定施用条件下的利用效率，不仅要有较高的回收利用率，同时还应有较高的生理效率或农学效率。氮肥回收利用率随施肥量的增加而降低，当氮肥过量施用，会造成水稻对氮的奢侈吸收，氮肥生理利用率和回收率将急剧下降^[16]。据研究，控释氮肥能促进水稻生育中、后期叶片的硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性，从而促进水稻孕穗后体内氮素的吸收与同化，增强水稻的

吸氮量，达到提高氮素利用效率的目的；同时，控释氮肥还可以增强水稻生育后期叶片中蛋白水解酶的活性，促进叶片中蛋白质的降解，有利于叶片中的氮素向籽粒运转，从而提高水稻氮肥农学效率或生理效率^[17]。本研究结果也表明，早晚稻在减氮 15% 和 30% 水平上施用硫包膜尿素和树脂包膜尿素均较常规尿素处理显著提高氮肥回收利用率和偏生产力，除晚稻 85%PSU 处理，其它控释氮肥处理的早晚稻氮肥农学效率均较 CF 处理有显著提高，且相同施氮水平下硫包膜尿素对氮肥回收利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率的提高效果均优于树脂包膜尿素。但氮素生理利用率仅早稻 70%PSU、70%CSU 和 85%CSU 处理高于 CF 处理，早稻 85%PSU 处理和晚稻所有控释氮肥处理的氮素生理利用率均低于常规尿素处理，其原因有待进一步研究。

通过施肥调控将土壤有效养分含量控制在一个适量的水平，既可保证较高产量又不会引起环境污染风险^[18]。包膜控释肥料可根据作物生长不同时期的需肥量来调节其养分释放速率，不同包膜材料肥料其养分控制释放的特性有所差异，施用后也会导致土壤养分状况有所差异。土壤氮素养分的变化与肥料中氮素的释放特性、氮肥用量和氮素损失量等因素有关。本试验条件下，常规尿素处理、减氮 15% 树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理均能保持早稻后土壤较高的氮素肥力水平，减氮 30% 控释氮肥处理，尤其是减氮 30% 硫包膜尿素处理不利于土壤氮素肥力的保持，可能与其氮素投入较少而植株带走较多氮素有关。尽管减氮 30% 硫包膜尿素早晚稻均取得较高产量，但从土壤肥力保持的角度看可能并不利于土壤氮素肥力和持续生产力的维持。

控释氮肥具有高肥力和长肥效的作用，其使用为既增加水稻产量又提高水稻种植中的氮素利用率提供了可行的解决手段。综合考虑作物的产量效应、养分吸收利用效率及土壤氮素肥力保持与培育，在本试验条件下或与该试验类似的生态区域，早晚稻一次性基施减氮 15% 的硫包膜尿素能取得较好的增产效应，并且有利于氮素养分吸收利用效率的提高和土壤肥力的保持；早稻施用减氮 15% 的树脂包膜尿素也可在一定程度上促进增产，但效果不及硫包膜尿素。

参考文献

- [1] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- [2] 司东霞, 崔振岭, 陈新平, 等. 不同控释氮肥对夏玉米同化物积累及氮平衡的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(6):1745-1751.
- [3] 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.
- [4] 王艳, 王小波, 王小晶, 等. 包膜缓释肥料 (CSFS) 增产机理与氮肥利用率示踪研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(5):109-111.
- [5] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):177-184.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [7] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):190-195, 201.
- [8] 徐明岗, 孙小凤, 邹长明, 等. 稻田控释氮肥的施用效果与合理施用技术 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4):487-493.
- [9] 李方敏, 樊小林, 陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4):494-500.
- [10] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 等. 不同水分条件下缓 / 控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、转运及分配的影响 [J]. 作物学报, 2014, 40(5):859-870.
- [11] 曹洪生, 黄丕生, 缪宝山, 等. 两种类型中粳稻吸氮分析及施肥技术研究 [J]. 苏州科技学院学报 (社会科学版), 1992, 9(1):35-41.
- [12] 王秀芹, 张洪程, 黄银忠, 等. 施氮量对不同类型水稻品种吸氮特性及氮肥利用率的影响 [J]. 上海交通大学学报 (农业科学版), 2003, 21(4):325-330.
- [13] 郭晨, 徐正伟, 李小坤, 等. 不同是氮处理对水稻产量、氮素吸收与利用率的影响 [J]. 土壤, 2014, 46(4):618-622.
- [14] 谢春生, 唐拴虎, 徐培智, 等. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2):177-182.
- [15] 付建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2):145-152.
- [16] 王光火, 张其春, 黄昌勇. 稻氮素利用率、控制氮肥污染的新途径-SSNM [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2003, 29(1):67-70.
- [17] 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.
- [18] Raun W R, Johnson G V, Westerman R L. Fertilizer nitrogen recovery in long-term continuous winter wheat [J]. Soil Sci Soc Am. J., 1999, 63(4):645-650.