

控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响

杜 君¹, 孙克刚^{1*}, 张运红¹, 和爱玲¹, 孙克振²

(1.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所/河南省农业生态与环境重点实验室, 河南 郑州 450002; 2.河南省固始县农业局, 河南 固始 465200)

摘要:为了探明控释尿素(CRU)提高氮肥利用率并减少土壤中硝态氮累积的作用机理,通过田间试验,研究了控释尿素对水稻氮代谢关键酶活性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响。结果表明,控释尿素能显著提高齐穗期和乳熟期叶片中的硝酸还原酶活性,特别是乳熟期最为明显;能显著增强水稻叶片谷氨酰胺合成酶和谷氨酰胺转化酶活性,且增强作用可持续到蜡熟期,其增强效果在齐穗期最为明显;还能显著提高乳熟期和蜡熟期叶片的蛋白水解酶活性。其中,以处理4(CRU60%+PU40%)最为明显。控释尿素还能显著增强籽粒中的谷氨酰胺合成酶和谷氨酰胺转化酶活性,并能显著提高水稻的产量及氮肥利用率,也是以处理4增强效果最为明显。控释尿素还明显增加了蛋白质的含量,在一定程度上改善了稻米品质。同时,控释尿素还可明显降低水稻土壤中硝态氮的含量,减少硝态氮向土壤深层渗漏数量,以减轻对地下水污染风险。

关键词:控释尿素;水稻;生理特性;氮肥利用率;土壤硝态氮

中图分类号:S145.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)02-0134-08

doi: 10.13254/j.jare.2015.0233

引用格式:

杜 君, 孙克刚, 张运红, 等. 控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 134-141.

DU Jun, SUN Ke-gang, ZHANG Yun-hong, et al. Effects of Controlled Release Urea on Physiological Characteristics and Nitrogen Use Efficiency of Rice and NO_3^- -N Contents in Soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 134-141.

Effects of Controlled Release Urea on Physiological Characteristics and Nitrogen Use Efficiency of Rice and NO_3^- -N Contents in Soil

DU Jun¹, SUN Ke-gang^{1*}, ZHANG Yun-hong¹, HE Ai-ling¹, SUN Ke-zhen²

(1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences/Henan Key Laboratory of Agricultural Eco-environment, Zhengzhou 450002, China; 2. Gushi Agricultural Bureau of Henan Province, Gushi 465200, China)

Abstract: Field experiments were conducted to study the effects of controlled release urea (CRU) on key enzymes activities of nitrogen metabolism of rice, nitrogen use efficiency and soil NO_3^- -N contents, in order to verify the mechanism of CRU on increasing nitrogen use efficiency and increasing soil NO_3^- -N accumulation. The results showed that CRU could improve significantly nitrate reductase (NR) activities of rice leaves in full heading stage and milk stage, especially in milk stage. The activities of glutamine synthetase and glutamine transaminase of rice leaves were obviously increased, and the enhancement continued till dough grain stage, especially in full heading stage. Meanwhile, CRU was able to promote significantly protease activity of rice leaves in milk stage and dough grain stage. The treatment of 4 (CRU60%+PU40%) was the best treatment of the key enzymes activities of nitrogen metabolism. CRU also had better effect on promoting glutamine synthetase and glutamine transaminase activities of brown rice, and increased significantly rice yield and nitrogen use efficiency, especially the treatment of 4. CRU enhanced significantly protein contents in brown rice, therefore which improved quality of rice to some extent. Moreover, CRU could reduce NO_3^- -N accumulation in soil profile significantly. CRU application could evidently decrease the quantity of soil NO_3^- -N leached to deep soil and lessen the risk to ground water pollution.

Keywords: controlled release urea; rice; physiological characteristics; nitrogen use efficiency; soil NO_3^- -N

收稿日期: 2015-09-22

基金项目: 河南省财政预算项目“氮肥增值提效及高效施用技术研究与推广”; 河南省农业科学院科技发展专项资金项目“优质稻米的关键施肥技术研究”(20137913); 复合肥料国家地方联合工程研究中心项目“肥料提质增效研究和应用”

作者简介: 杜 君(1978—), 男, 河南周口人, 博士, 助理研究员, 主要从事植物营养与作物施肥方面的研究。E-mail: dujun0520@163.com

* 通信作者: 孙克刚 E-mail: kgsun@ipni.ac.cn

作物单产除受培育品种影响外,还受栽培措施等方面的影响^[1],而栽培措施中则以氮肥对作物产量的影响最大^[2]。氮肥作为作物增产的决定因子,在我国粮食生产中发挥着举足轻重的作用^[3]。据统计,我国每年生产、施用的氮肥量(纯氮计)约为2千万t^[4],但当季利用率仅为30%~35%^[5-6]。因此,普通氮肥的低利用率以及由此带来的环境污染,一直是困扰农业生产的大问题。普通氮肥不仅利用率较低,而且施入土壤后极易挥发、淋溶和发生反硝化反应^[7-9],导致氮素的大量损失,造成环境污染^[10]。为此,具有肥效长且稳定、利用率高等特点的控释肥料,成为肥料研究领域的热点^[11]。

近年来,一些科研单位和企业致力于研发和生产利用率较高的肥料品种,以控释肥料代替普通化肥,初具成效。宗晓庆等^[12]研究表明,在同等氮素用量下,与普通尿素相比,硫膜控释尿素处理能显著提高玉米的产量;卢艳艳等^[13]研究表明,相对于硫膜控释尿素,树脂膜控释尿素在玉米需肥高峰期更能持续保持较高水平的耕层土壤无机氮含量,玉米产量和氮素利用率均有不同程度的提高。杨雯玉等^[14]研究表明,控释尿素配施普通尿素与普通尿素单施相比,无论是相同施氮量还是减少30%的施氮量,都显著增加小麦产量及提高氮肥利用率。有关控释尿素在水稻的应用研究也较多,也多集中在控释尿素对水稻的增产效应及提高氮肥利用率等方面^[15-19]。而控释氮肥对水稻的生理特性、品质及稻田土壤无机氮积累的研究报道偏少。本文以水稻为试验材料,研究控释尿素对水稻叶片和籽粒中的硝酸还原酶活性等主要氮代谢指标、产量与品质以及氮肥利用率的影响,旨在从水稻生理特性的角度研究控释尿素提高氮肥利用率和水稻产量,改善水稻品质以及降低稻田土壤硝态氮积累的作用机理,从而为水稻的科学施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2014年在信阳市罗山县农科所试验园区进行,试验地前茬为小麦,供试土壤类型为水稻土,质地为轻粘土(粘粒含量33.5%,粒径<0.001mm)。土壤基本农化性状为pH 6.5,有机质18.1 g·kg⁻¹,碱解氮95.0 mg·kg⁻¹,速效磷42.3 mg·kg⁻¹,速效钾98.5 mg·kg⁻¹。

1.2 供试材料

供试水稻品种为郑稻18号(粳稻)。供试肥料中,控释尿素(N,34%)为6个月控释期(在静水中25℃

下的释放测定结果)的包膜尿素,由金正大生态工程集团股份有限公司生产提供;普通尿素(N,46%)、普通过磷酸钙(P₂O₅,12%)和氯化钾(加拿大产,K₂O,60%)肥料均在当地农化市场购买。

1.3 试验设计

试验设5个处理:①对照CK(不施氮肥,施磷、钾肥);②普通尿素100%(PU100%);③控释尿素40%+普通尿素60%(CRU40%+PU60%);④控释尿素60%+普通尿素40%(CRU60%+PU40%);⑤控释尿素100%(CRU100%)。氮肥用量按N 180 kg·hm⁻²,其中,控释尿素作底肥一次施入,普通尿素除普通尿素100%(30%作底肥、70%作追肥)外,其他处理作追肥一次施入。同时,普通过磷酸钙和氯化钾作基肥分别施P₂O₅ 90 kg·hm⁻²和K₂O 150 kg·hm⁻²。

各处理重复3次,随机区组排列。小区面积20 m²,周围设1 m保护行,重复间设走道,小区间设畦埂,上覆塑料薄膜,防止串水串肥。2014年6月10日划行移栽,株行距30 cm×14 cm,密度为14.3万穴·hm⁻²。田间管理按照常规方式进行,6月28日搁田,7月10日复水,10月10日测产并结束试验。

1.4 测定项目与方法

分别在水稻齐穗期、乳熟期和蜡熟期取功能叶,测定其各生理指标(硝酸还原酶、蛋白水解酶、谷氨酰胺合成酶与转氨酶活性),分别在水稻结实期的乳熟前期、乳熟后期和蜡熟期取籽粒样,测定籽粒中的谷氨酰胺合成酶与转氨酶的活性。成熟期各小区全部收获,实打实收,脱粒扬净后取1 kg烘干,称质量,计算烘干率,单独计产,并折算成公顷产量。同时,分别采取各处理水稻的籽粒和秸秆样品,测定其全氮含量。

其中,硝酸还原酶活性用磺胺比色法测定,并以30℃下1 h内还原NO₃⁻形成1 μg NO₂⁻的量作为1个酶活性单位^[20];谷氨酰胺合成酶活性和谷氨酰胺转化酶活性采用比色法测定酶活力,并以30℃下1 h内形成1 μmol γ-谷氨酰基羟氨酸的量作为1个酶活性单位^[20];蛋白水解酶活性的测定参照韩雅珊^[21]的方法,以40℃下1 h内水解产生10 μg 酪氨酸的酶量作为1个酶活性单位;植物和籽粒中全氮含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,用半微量凯氏定氮法进行测定^[22]。氮肥利用率(%)=[施氮区植株吸氮量-无氮区植株吸氮量]/施氮量×100。籽粒的蛋白质含量=籽粒全氮含量×5.95;直链淀粉含量的测定参照国家标准《GB/T 17891—1999 优质稻谷》,其中,检验按GB/T 15683

执行。水稻收获后,按土层深度(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)用土钻分层采集各小区的土壤样品。土壤硝态氮含量采用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 为浸提液,在 210 nm 下用紫外分光光度法比色测定^[22]。土壤基本理化性状指标的测定采用常规分析方法^[22]进行。

1.5 数据处理

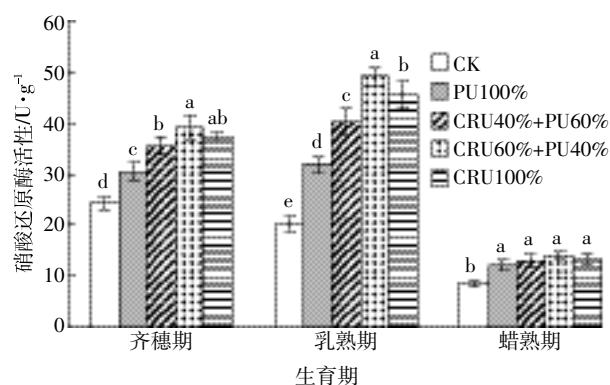
采用 Excel 2007 软件进行数据处理及绘图,用 SPSS17.0 软件进行方差分析,并用多重比较(LSD 法)进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻叶片硝酸还原酶活性的影响

试验结果表明,在采样的 3 个生育期中,3 个控释尿素处理(指 CRU40%+PU60%、CRU60%+PU40%和 CRU100%处理,下同)硝酸还原酶(NR)活性均高于对照和普通尿素处理,说明控释尿素能显著提高水稻功能叶的 NR 活性(图 1)。同时,对照和尿素处理的水稻功能叶 NR 活性呈逐渐下降趋势,而 3 个控释尿素处理水稻功能叶的 NR 活性先升高后下降,并且同一时期不同施氮处理之间 NR 活性的差异较大。说明叶片在衰老过程中氮素还原能力逐渐下降,而控释尿素在乳熟期则显著提高其还原能力。

在齐穗期,3 个控释尿素处理的水稻功能叶片 NR 活性均高于对照处理和普通尿素处理,而且差异显著。3 个控释尿素处理中,以处理 4 的 NR 活性最高,达 $39.1 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,其次是处理 5,处理 4 与处理 3 之间的差异较为显著,而处理 3 与处理 5 之间则无显著差异。其中,处理 4、处理 5 和处理 3 分别比对照处理提高 60.9%、52.7%和 45.7%,比普通尿素处理提高 28.2%、21.6%和 16.1%。各施肥处理 NR 活性差异最



同组数据柱上标注含有相同字母的表示差异不显著, $P < 0.05$ 。下同

图 1 不同处理水稻叶片中的硝酸还原酶活性

Figure 1 NR activity in rice leaves of different treatments

大时期在乳熟期,3 个控释尿素处理的 NR 活性显著高于对照和普通尿素处理,而且 3 个控释尿素处理相互之间的差异均达显著水平,其中处理 4 最高,达 $49.0 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,其次是处理 5。处理 4、处理 5 和处理 3 分别比对照处理提高 142.6%、124.8%和 98.5%,比普通尿素处理提高 54.1%、42.8%和 26.1%。到蜡熟期,各施氮处理的水稻功能叶 NR 活性均显著高于对照,但各控释尿素处理之间差异很小,与普通尿素处理之间差异也不显著。

2.2 不同处理对水稻叶片谷氨酰胺合成酶和转化酶活性的影响

从图 2 中可看出,从齐穗期至蜡熟期所有处理的谷氨酰胺合成酶(GS)活性呈下降趋势。3 个控释尿素处理能显著增强叶片中 GS 活性,且增强作用可持续到蜡熟期,其增强效果在齐穗期最为明显。齐穗期,3 个控释尿素处理的 GS 活性显著高于普通尿素处理和对照处理,且普通尿素处理与对照之间差异也较显著。3 个控释尿素处理中,处理 4 的 GS 活性最高,其次是处理 5,而两处理之间 GS 活性差异不显著,但处理 4 的 GS 活性均显著高于处理 3。处理 4、处理 5 和处理 3 的 GS 活性分别比对照处理的提高 125.6%、109.8%和 85.4%,比普通尿素处理分别提高 66.7%、55.0%和 36.9%。乳熟期,所有施氮处理的 GS 活性均显著高于对照处理,但 3 个控释尿素处理除处理 4 显著高于普通尿素处理外,其他处理均与普通尿素处理之间差异不显著。蜡熟期,除了处理 2,所有施氮处理的 GS 活性均显著高于对照处理,但 3 个控释尿素处理的 GS 活性与普通尿素处理之间的差异均不显著,且它们相互之间的差异也均不显著。

水稻功能叶片的谷氨酰胺转化酶(GT)活性的变化趋势与其谷氨酰胺合成酶活性的变化趋势相似,从齐穗期至蜡熟期各处理的 GT 活性也呈下降趋势(图 3)。齐穗期,处理 4、处理 5 和处理 3,3 个控释尿素处理的 GT 活性分别比对照处理提高 96.4%、76.4%和 41.8%,3 个控释尿素处理中,处理 4 和处理 5 的 GT 活性显著高于普通尿素处理,分别提高 56.5%和 40.6%。乳熟期,所有施氮处理的 GT 活性均显著高于对照处理,处理 4、处理 5 和处理 3 的 GT 活性分别比对照提高 85.4%、80.5%和 41.5%。3 个控释尿素处理中,只有处理 4 和处理 5 的 GT 活性显著高于普通尿素处理,分别提高 46.2%和 42.3%,而 3 个控释尿素处理之间的差异则不显著。蜡熟期,3 个控释尿素处理的 GT 活性显著高于对照处理和普通尿素处理,而

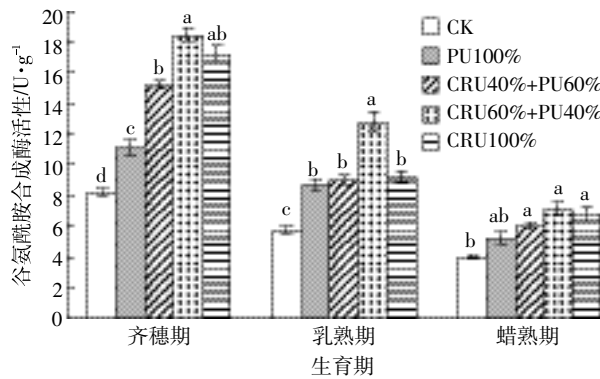


图 2 不同处理水稻叶片中的谷氨酰胺合成酶活性
Figure 2 GS activity in rice leaves of different treatments

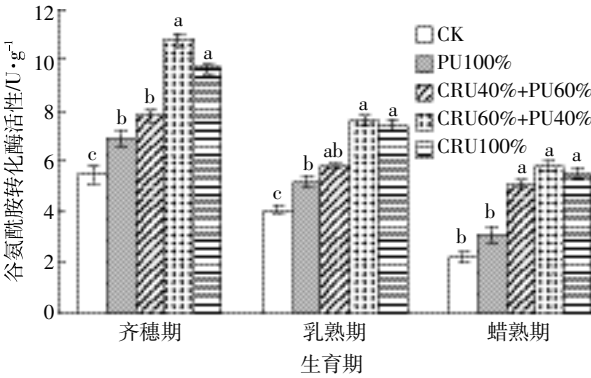


图 3 不同处理的水稻叶片中谷氨酰胺转化酶活性
Figure 3 GT activity in rice leaves of different treatments

3 个控释尿素处理之间的差异则不显著。

2.3 不同处理对水稻叶片蛋白水解酶活性的影响

图 4 显示,除对照处理外,其他各处理水稻功能叶的蛋白水解酶活性呈先上升后下降的趋势。齐穗期,对照处理叶片蛋白水解酶活性显著高于普通尿素和 3 个控释尿素处理,而且各施氮处理之间差异不显著。控释尿素能显著提高乳熟期和蜡熟期叶片中的蛋

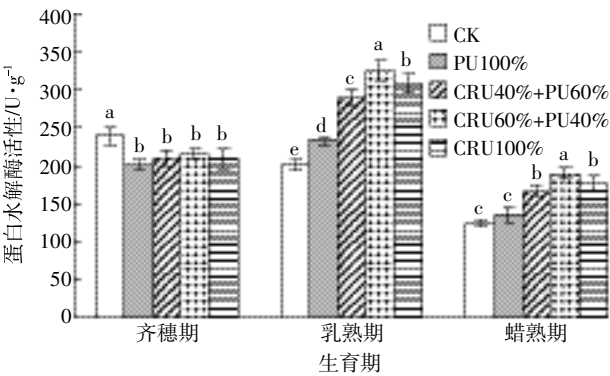


图 4 不同处理水稻叶片中的蛋白水解酶活性
Figure 4 Protease activity in rice leaves of different treatments

白水解酶活性。

乳熟期,3 个控释尿素处理的蛋白水解酶活性显著高于对照和普通尿素处理,且 3 个控释尿素处理相互之间的差异也较显著,处理 4、处理 5 和处理 3 的蛋白水解酶活性分别比对照提高 62.0%、53.4% 和 44.8%,比普通尿素处理提高 39.3%、31.9% 和 24.5%,其中,处理 4 最高,处理 5 次之。蜡熟期,3 个控释尿素处理的蛋白水解酶活性也显著高于对照处理和普通尿素处理,其中,处理 4 最高,显著高于处理 5 和处理 3,处理 4、处理 5 和处理 3 的蛋白水解酶活性分别比对照处理提高 53.4%、41.9% 和 35.1%,比普通尿素处理提高 40.5%、30.0% 和 23.8%。

2.4 不同处理对水稻籽粒谷氨酰胺合成酶和转化酶活性的影响

图 5 表明,水稻籽粒中 GS 活性与水稻叶片中的 GS 活性趋势相似,从乳熟前期至蜡熟期所有处理的 GS 活性也呈下降趋势。3 个控释尿素处理能显著增强籽粒中的 GS 活性,且增强作用可持续到蜡熟期,其增强效果在乳熟前期和乳熟后期较为明显。

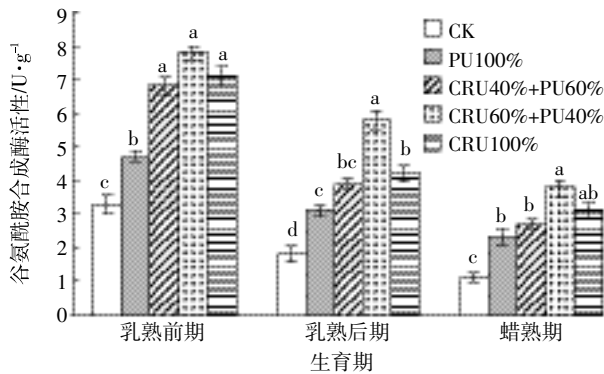


图 5 不同处理的水稻籽粒中谷氨酰胺合成酶活性
Figure 5 GS activity in brown rice of different treatments

在乳熟前期,3 个控释尿素处理水稻籽粒的 GS 活性均显著高于对照和普通尿素处理,但 3 个控释尿素处理之间的差异不显著。处理 4、处理 5 和处理 3 中籽粒的 GS 活性分别比对照处理提高 136.4%、115.2% 和 106.1%,分别比普通尿素处理提高 66.0%、51.1% 和 44.7%。乳熟后期,所有施氮处理籽粒的 GS 活性均显著高于对照处理,但 3 个控释尿素处理中,只有处理 4 和处理 5 的 GS 活性显著高于普通尿素处理,且处理 4 籽粒中的 GS 活性也显著高于处理 5 的。其中,处理 4 和处理 5 籽粒中 GS 活性分别比普通尿素处理提高 87.1% 和 35.5%。蜡熟期,3 个控释尿素处理中只有处理 4 与普通尿素处理相比,仍保持较

高的 GS 活性,比普通尿素处理提高 65.2%。

图 6 表明,水稻籽粒中 GT 活性与水稻叶片中 GT 活性变化趋势相似,从乳熟前期至蜡熟期各处理的 GT 活性也呈下降趋势。

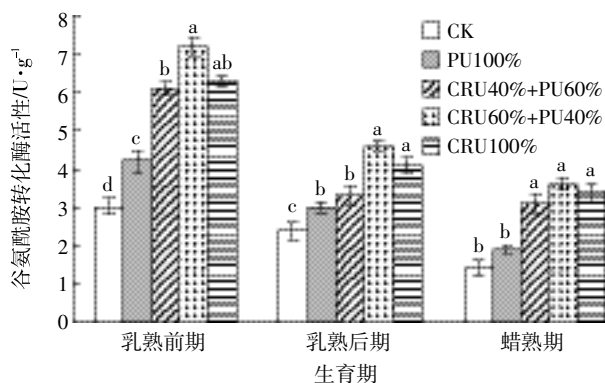


图 6 不同处理的水稻籽粒中谷氨酰胺转化酶活性

Figure 6 GT activity in brown rice of different treatments

乳熟前期,与对照处理和普通尿素处理相比,3个控释尿素处理籽粒中的 GT 活性均显著提高,而 3 个控释尿素处理中,处理 4 和处理 5 籽粒的 GT 活性显著高于普通尿素处理,但处理 4 和处理 5 之间的差异不显著。处理 4、处理 5 和处理 3 籽粒的 GT 活性分别比对照提高 94.6%、70.3%和 64.9%,比普通尿素处理提高 75.6%、53.7%和 48.8%。乳熟后期,所有施氮处理的 GT 活性均显著高于对照处理,3 个控释尿素处理中,处理 4 和处理 5 籽粒中的 GT 活性显著高于普通尿素处理,而处理 4 和处理 5 之间的差异不显著,处理 4 和处理 5 籽粒的 GT 活性分别比普通尿素处理提高 53.3%和 36.7%。蜡熟期,3 个控释尿素处理的 GT 活性显著高于普通尿素处理和对照处理,而 3 个控释尿素处理之间的差异则不显著,处理 4、处理 5 和处理 3 籽粒中的 GT 活性分别比普通尿素处理提高 89.5%、80.0%和 78.9%。这也说明控释尿素对籽粒中 GT 活性的增强作用一直持续到蜡熟期。

2.5 不同处理对水稻产量蛋白质含量及氮肥利用率的影响

与普通尿素相比,控释尿素能显著提高水稻的产量,其中,处理 4 的产量最高,处理 5 次之;处理 4、处理 5 和处理 3 分别比普通尿素处理的产量提高 21.4%、19.0%和 16.0%(表 1)。同时,3 个控释尿素处理的氮素利用率也显著高于普通尿素处理,处理 4 最高,达 55.1%,处理 4、处理 5 和处理 3 的氮素利用率分别比普通尿素处理提高 18.0、13.7、11.4 个百分点。另外,控释尿素显著增加了蛋白质的含量,尤其是处

表 1 不同处理的水稻产量、蛋白质含量及氮肥利用率

Table 1 Rice yield, protein content and nitrogen use efficiency of different treatments

处理	籽粒含氮量/%	秸秆含氮量/%	地上部吸氮量/ kg·hm ⁻²	氮肥利用率/%	实际产量/ kg·hm ⁻²	蛋白质含量/%
CK	1.02c	0.47b	74.5c	—	5 766.5d	7.81d
PU100%	1.20b	0.52a	141.2b	37.1c	8 210.2c	8.15c
CRU40%+PU60%	1.23b	0.54a	161.8a	48.5b	9 527.5b	8.52b
CRU60%+PU40%	1.42a	0.57a	173.6a	55.1a	9 965.1a	8.73a
CRU100%	1.31ab	0.56a	165.9a	50.8ab	9 766.3ab	8.61ab

注:同列数据后标注有相同字母的表示差异不显著($P<0.05$)。

理 4 效果最为明显,其次是处理 5,这是控释尿素促进水稻氮代谢的结果。

2.6 不同处理对稻田土壤硝态氮含量的影响

各施氮肥处理在 0~100 cm 土壤剖面各土层土壤硝态氮含量均明显高于对照处理,除处理 2 和处理 5 外,各土层的土壤硝态氮含量基本上以 0~20 cm 耕作层最高(图 7)。随着土层深度的增加,处理 2 和处理 5 土壤的硝态氮含量先增加后降低,其他处理随着土层深度的增加,其硝态氮含量呈降低趋势。其中,0~60 cm 土层的硝态氮含量降低幅度较低,60~100 cm 土层降低趋势平缓。各土层深度的硝态氮含量除 CK 外均以处理 4 最低,处理 2 最高,可见,控释尿素有明显降低土壤硝态氮含量的作用,而且还减少硝态氮向土壤深层渗漏,从而起到降低地下水硝态氮含量的作用。

3 讨论

NR 是植物氮代谢的关键酶,而且是催化 NO_3^- 转化氨基酸的第一步反应,同时也是植物体内氮素同化

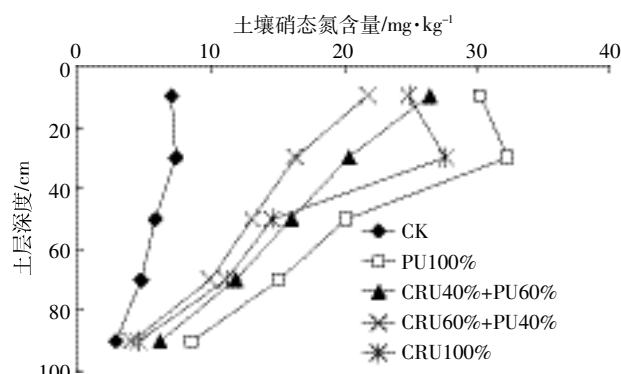


图 7 不同处理的水稻土壤硝态氮含量及其剖面分布

Figure 7 NO_3^- -N contents and distribution on the paddy soil profile with different treatments

中的限速酶,而GS是处于氮代谢中心的多功能酶,参与植物中各种氮代谢的调节^[23]。本研究结果表明,施用控释尿素能显著提高水稻中、后期功能叶片的NR活性,特别是在乳熟期。从齐穗期至蜡熟期所有施氮处理的GS活性呈下降趋势,而3个控释尿素处理均能显著增强叶片中GS活性,且增强作用可持续到蜡熟期,这也与聂军等^[24]研究的结果相一致。控释尿素对水稻生育中、后期功能叶片中NR和GS活性的提高,主要是由于控释尿素的氮释放速度与水稻不同生育期的对氮素的吸收速度基本达到同步^[25],同时也说明了控释尿素促进了孕穗后水稻体内的氮素吸收与氮同化能力,这对水稻产量及氮素利用率的提高具有重要作用。本研究结果也表明,控释尿素能显著提高水稻的产量,其中,处理4的产量最高。

已有研究^[26-27]表明,水稻籽粒中的氮素大部分来自开花前植株贮存氮素的再运转,其中,蛋白质的降解起着重要作用,而蛋白质的降解是与蛋白质水解酶的活性相关的。本研究结果也表明,控释氮肥还能增强籽粒中的NR和GS活性,且增强作用可持续到蜡熟期,其增强效果在乳熟前期和乳熟后期较为明显,从而可促进水稻籽粒中的氮素同化能力。控释尿素通过对氮素释放的调控,可提高水稻生育后期功能叶片中的蛋白水解酶活性,从而促进水稻蛋白质的水解,以便向水稻籽粒进行再运转,有利于水稻籽粒中蛋白质的积累。本研究的结果也显示,控释尿素可增强水稻生育后期(本研究中乳熟期和蜡熟期)叶片的蛋白水解酶活性,说明控释尿素有利于水稻生育后期叶片中蛋白质的降解。同时,控释尿素显著增加了籽粒的蛋白质含量,尤其是处理4效果最为明显,其次是处理5,这是控释尿素促进水稻氮代谢的结果,从而在一定程度上改善了稻米的品质,这也与以前的研究结果^[28-31]基本一致。

氮肥在土壤中的损失方式主要是硝态氮淋失和氨挥发,普通尿素属于速效氮肥,在土壤中极易淋溶与挥发,导致氮素的损失及利用率降低,而控释氮肥不仅能提高作物对氮的吸收,还能影响土壤中无机氮素的含量。薛高峰等^[32]研究表明,包膜控释尿素能显著增强冬小麦对氮、磷、钾养分的吸收,增加籽粒产量,同时,还能明显减少硝态氮向土壤深层渗漏数量。杨士红等^[33]研究表明,施用控释氮肥能明显减少土壤中的铵态氮质量比以及氨挥发损失。符建荣^[34]和郑圣先等^[35]的研究也表明,控释尿素能显著提高水稻氮素的吸收利用,减少氨的挥发,减少氮的径流、淋溶和硝

化-反硝化等途径的损失。本研究表明控释尿素相比普通尿素,能明显降低水稻土壤中硝态氮的含量,特别是控释尿素与化肥配施效果更为明显。可见,控释尿素不仅能明显降低土壤硝态氮含量,而且还减少硝态氮向土壤深层渗漏,以减轻对地下水污染风险。

4 结论

(1)与普通尿素相比,施用控释尿素能显著提高水稻中、后期功能叶片的硝酸还原酶(NR)活性,特别是在乳熟期。从齐穗期至蜡熟期所有施氮处理的谷氨酰胺合成酶(GS)活性呈下降趋势,而3个控释尿素处理均能显著增强叶片中GS活性,且增强作用可持续到蜡熟期,其增强效果在齐穗期最为明显。其中,以处理4(CRU60%+PU40%)最为明显。控释尿素还增强水稻生育后期(乳熟期和蜡熟期)叶片的蛋白水解酶活性,促使叶片中的氮素向籽粒再运转。

(2)控释尿素能增强籽粒中的NR和GS活性,且增强作用可持续到蜡熟期,其增强效果在乳熟前期和乳熟后期较为明显。控释尿素还能显著增加籽粒的蛋白质含量,尤其是处理4效果最为明显,其次是处理5。这是控释尿素促进水稻氮代谢的结果,从而在一定程度上改善了稻米的品质。

(3)控释尿素能显著提高水稻的产量,其中,处理4的产量最高,处理5次之。同时,3个控释尿素处理的氮肥利用率也显著高于普通尿素处理,以处理4最高。与普通尿素相比,控释尿素还能明显降低水稻土壤中硝态氮的含量,特别是控释尿素与化肥配施效果更为明显,其中,各土层深度的硝态氮含量均以处理4最低。控释尿素不仅能明显降低土壤硝态氮含量,还能减少硝态氮向土壤深层渗漏。

参考文献:

- [1] 马富亮,宋付朋,高 杨,等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 67-72.
MA Fu-liang, SONG Fu-peng, GAO Yang, et al. Effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea fertilizers on wheat yield and quality and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 67-72. (in Chinese)
- [2] 李静宇,张定一. 栽培措施和环境因素对强筋小麦品质的影响[J]. 山西农业科学, 2005, 33(1): 26-29.
LI Jing-yu, ZHANG Ding-yi. The effects of cultivation measures and environment factors on the quality of high-gluten wheat[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2005, 33(1): 26-29. (in Chinese)
- [3] 任翠莲,马银丽,董嫻嫻,等. 控释尿素对夏玉米产量、氮肥利用效率及土壤硝态氮的影响[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(2): 12-17.

- REN Cui-lian, MA Yin-li, DONG Xian-xian, et al. Effects of applying controlled-release urea on the yield, nitrogen use efficiency and soil $\text{NO}_3\text{-N}$ of summer maize[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2012, 35(2):12-17.(in Chinese)
- [4] JU Xiao-tang, XING Guang-xi, CHEN Xin-ping, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106:3041-3046.
- [5] 张 民, 杨越超, 宋付朋, 等. 包膜控释肥料研究与产业化开发[J]. 化肥工业, 2005, 32(2):7-13.
ZHANG Min, YANG Yue-chao, SONG Fu-peng, et al. Study and industrialized development of coated controlled release fertilizers[J]. *Chemical Industry*, 2005, 32(2):7-13.(in Chinese)
- [6] 郑圣先, 聂 军, 熊金英, 等. 控释肥料提高氮素利用率的作用及对水稻效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1):11-16.
ZHENG Sheng-xian, NIE Jun, XIONG Jin-ying, et al. Study on role of controlled release fertilizer in increasing the efficiency of nitrogen utilization and rice yield[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1):11-16.(in Chinese)
- [7] 于淑芳, 杨 力, 张 民, 等. 控释尿素对小麦-玉米产量及土壤氮素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1744-1749.
YU Shu-fang, YANG Li, ZHANG Min, et al. Effects of controlled-release urea on wheat-corn's yield and soil nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1744-1749.(in Chinese)
- [8] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1):1-6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):1-6.(in Chinese)
- [9] Mosier A R, Zhu Z L. Changes in patterns of fertilizer nitrogen use in Asia and its consequences for N_2O emissions from agricultural systems[J]. *Nutr Cyc in Agroecosystems*, 2000, 57(1):107-117.
- [10] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):915-924.(in Chinese)
- [11] 卫 丽, 马 超, 黄晓书, 等. 控释肥对土壤全氮含量及夏玉米产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4):176-179.
WEI Li, MA Chao, HUANG Xiao-shu, et al. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on total N of soil and yield and quality of summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4):176-179.(in Chinese)
- [12] 宗晓庆, 张 民, 张庆富, 等. 硫包膜尿素对土壤性质和夏玉米生长的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2):227-231.
ZONG Xiao-qing, ZHANG Min, ZHANG Qing-fu, et al. Effects of sulfur coated urea on properties of soil and growth of maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2):227-231.(in Chinese)
- [13] 卢艳艳, 宋付朋, 赵 杰, 等. 控释尿素对土壤氮挥发和无机氮含量及玉米氮素利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6):79-82.
LU Yan-yan, SONG Fu-peng, ZHAO Jie, et al. Effects of controlled-release urea on ammonia volatilization and inorganic nitrogen of soil and nitrogen use efficiency in maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6):79-82.(in Chinese)
- [14] 杨雯玉, 贺明荣, 王远军, 等. 控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5):627-633.
YANG Wen-yu, HE Ming-rong, WANG Yuan-jun, et al. Effect of controlled-release urea combined application with urea on nitrogen utilization efficiency of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5):627-633.(in Chinese)
- [15] 李云春, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 控释尿素对水稻产量、养分吸收及氮肥利用率的影响[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3):46-51.
LI Yun-chun, LI Xiao-kun, LU Jian-wei, et al. Effects of controlled-release urea on yield, nutrient uptaking and nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33(3):46-51.(in Chinese)
- [16] 陈贤友, 吴良欢, 韩科峰, 等. 包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对水稻产量与氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4):918-923.
CHEN Xian-you, WU Liang-huan, HAN Ke-feng, et al. Effects of different mixture rates of coated urea and prilled urea on rice grain yield and nitrogen use efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4):918-923.(in Chinese)
- [17] 陈贤友, 吴良欢, 李金先, 等. 新型包膜控释尿素对水稻产量与氮肥利用率的影响[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(6):829-833.
CHEN Xian-you, WU Liang-huan, LI Jin-xian, et al. Effects of new controlled-release coated urea on rice grain yield and nitrogen use efficiency[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2010, 22(6):829-833.(in Chinese)
- [18] 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(增 1):83-87.
YUAN Man-man, YE Shu-ya, LIU Feng, et al. Effects of application of controlled-release polyolefin-coated urea on yield and nitrogen utilization rate of rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(suppl 1):83-87.(in Chinese)
- [19] 王小娟, 宋海星, 刘 强, 等. 纳米剂包膜氮肥对早稻养分吸收和产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2011(11):66-68.
WANG Xiao-juan, SONG Hai-xing, LIU Qiang, et al. Effects of nano-preparation coated nitrogen fertilizer on nutrient absorption and yield of early-rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011(11):66-68.(in Chinese)
- [20] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Shanghai Institute of Plant Physiology Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Plant Physiology. Experimental guide for modern plant physiology[M]. Beijing: Science Press, 1999.(in Chinese)
- [21] 韩雅珊. 食品化学试验指导[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1995.
HAN Ya-shan. Food chemistry experiment instruction[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1995.(in Chinese)
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.(in Chinese)

- [23] Dortch Q, Ahmed S I, Packard T T. Nitrate reductase and glutamate dehydrogenase activities in *Skeletonema costatum* as measures of nitrogen assimilation rates[J]. *Journal of Plankton Research*, 1979, 1:169-186.
- [24] 聂 军,肖 剑,戴平安,等.控释氮肥对水稻氮代谢关键酶活性及糙米蛋白质含量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2003,29(4):318-321.
NIE Jun, XIAO Jian, DAI Ping-an, et al. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on key enzymes activities of nitrogen metabolism and protein contents in brown rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2003, 29(4):318-321.(in Chinese)
- [25] 郑圣先,聂 军,戴平安,等.控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征和衰老的影响[J].植物营养与肥科学报,2006,12(2):188-194.
ZHENG Sheng-xian, NIE Jun, DAI Ping-an, et al. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on the morphological and physiological characteristics and senescence of root system during late growth stages of hybrid rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2):188-194.(in Chinese)
- [26] 徐克章,黑田荣喜,平野贡.水稻开花后叶片含氮量与光合作用的动态变化及其关系[J].作物学报,1995,21(2):171-175.
XU Ke-zhang, Eiki Kuroda, Mitsugu Hirano. The dynamic changes of nitrogen content and photosynthesis and their correlations in pot rice leaves after anthesis[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(2):171-175.(in Chinese)
- [27] Dalling M J, Boland G, Willson J H. Relation between acid proteinase activity and redistribution of nitrogen during grain development in wheat[J]. *Aust J Plant Physiol*, 1976, 3:721-730.
- [28] 罗兰芳,郑圣先,廖育林,等.控释氮肥对杂交水稻糙米蛋白质品质和氮代谢关键酶活性的影响[J].中国水稻科学,2007,21(4):403-410.
LUO Lan-fang, ZHENG Sheng-xian, LIAO Yu-lin, et al. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on protein quality of brown rice and key enzyme activity involved in nitrogen metabolism in hybrid rice[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2007, 21(4):403-410.(in Chinese)
- [29] 伍少福,韩科峰,吴良欢,等.控释掺混尿素对水稻产量、品质和氮肥利用率的影响[J].浙江农业学报,2011,23(5):983-987.
WU Shao-fu, HAN Ke-feng, WU Liang-huan, et al. Effects of application of controlled-releasing bulk blending urea on yield, quality and nitrogen utilization efficiency of rice[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, 23(5):983-987.(in Chinese)
- [30] 居 静,吴海波,陈永林,等.日本产包膜控释氮肥对稻米品质的影响[J].江苏农业科学,2015,43(2):67-70.
JU Jing, WU Hai-bo, CHEN Yong-lin, et al. Effect of Japanese coated controlled-release nitrogen fertilizer on quality of rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(2):67-70.(in Chinese)
- [31] 桂云波,张 瑛,吴敬德.肥料种类对优质稻产量、品质及稻米食用安全性的影响[J].安徽农业科学,2014,42(23):7860-7862.
GUI Yun-bo, ZHANG Ying, WU Jing-de, et al. Effects of fertilizer variety on yield, quality and diet safety in grains of high quality rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(23):7860-7862.(in Chinese)
- [32] 薛高峰,张贵龙,孙炎鑫,等.包膜控释尿素(追施)对冬小麦生长发育及土壤硝态氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(2):377-384.
XUE Gao-feng, ZHANG Gui-long, SUN Yan-xin, et al. Influences of topdressing controlled-release coated urea on plant growth and soil NO_3^- -N content of winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2):377-384.(in Chinese)
- [33] 杨士红,彭世彰,徐俊增,等.不同水肥处理对稻田土壤中氮素剖面分布与氨挥发损失的影响[J].水利水电科技进展,2010,30(1):40-44.
YANG Shi-hong, PENG Shi-zhang, XU Jun-zeng, et al. Influences of different water and fertilizer treatments on distribution of nitrogen profiles and loss of ammonia volatilization in soils of paddy fields[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30(1):40-44.(in Chinese)
- [34] 符建荣.控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J].植物营养与肥科学报,2001,7(2):145-152.
FU Jian-rong. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and recovery[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2):145-152.(in Chinese)
- [35] 郑圣先,刘德林,聂 军,等.控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J].植物营养与肥科学报,2004,10(2):137-142.
ZHENG Sheng-xian, LIU De-lin, NIE Jun, et al. Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2):137-142.(in Chinese)