

包膜控释掺混尿素对双季稻生长及氮素利用率的影响

刘秀梅^{1,3}, 冯兆滨¹, 侯红乾¹, 黄永兰¹, 冀建华¹, 杨成春¹, 刘光荣¹, 邹绍文²,
李祖章¹, 张夫道³

(1.江西省农业科学院土肥所, 南昌 330200; 2.江西省农业厅土肥站, 南昌 330000; 3.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:为了比较常规分次施肥和包膜控释掺混尿素对双季稻生长及氮素利用率的影响,在田间条件下,研究了不同施肥处理对双季稻分蘖数、叶绿素含量、各个生育期植株含氮量、稻草稻谷产量及氮素利用率等因素的影响。结果表明:(1)在早稻上,控释掺混尿素处理的以上各测试指标均高于常规分次施氮肥处理,各指标两处理之间差异均不显著($P<0.05$)。控释掺混尿素的氮肥利用率为40.08%,显著高于常规分次施氮肥的32.47%,而一次基施氮肥的利用率只有19.50%。(2)在晚稻上,常规分次施氮肥处理的稻谷产量高于控释掺混尿素处理,差异不显著($P<0.05$),其他各项测试指标均低于控释掺混尿素处理。控释掺混尿素和常规分次施氮肥的氮素利用率分别为39.91%、39.58%,二者显著高于一次基施氮肥的28.14%。由此可见,科学合理的施用包膜控释掺混尿素可以提高双季稻生产的经济效益,提高氮素利用率,减少资源的浪费,保护土壤生态环境。

关键词:包膜控释;尿素;双季稻;氮素利用率

中图分类号:X145.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)09-1737-07

Effects of the Controlled-Release Compound Urea on the Growth of Rice and the Utilizing Rate of Nitrogen

LIU Xiu-mei^{1,3}, FENG Zhao-bin¹, HOU Hong-qian¹, HUANG Yong-lan¹, JI Jian-hua¹, YANG Cheng-chun¹, LIU Guang-rong¹, ZOU Shao-wen², LI Zu-zhang¹, ZHANAG Fu-dao³

(1.Soil and Fertilizer Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Science, Nanchang 330200, China; 2.Soil and Fertilizer Station, Jiangxi Department of Agricultural, Nanchang 330200, China; 3.Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: To compare the effects of the conventional splitting fertilization and the controlled-release compound urea on the growth of double cropping rice and the utilizing rate of nitrogen, the experiment was carried out in the field, and the testing items were the stem numbers per hill, the SPAD value, the nitrogen content of plant and grain, the yield of grain and straw. The major findings were summarized as following: (1) As for the early rice, the stem numbers per hill, the SPAD value, the nitrogen content of plant and grain, the yield of grain and straw of the treatment of the controlled-release compound urea were higher than those of the treatment of the conventional splitting fertilization under the equal amount of nitrogen application. But there was no statistically significant difference between the two treatments ($P<0.05$). Besides, the nitrogen utilizing rate of the controlled-release compound urea was the highest in the early rice, which was 40.08%, and the nitrogen utilizing rate of the conventional splitting fertilization took second place, which was 32.47%. But that of only one time application as basal fertilization was 19.50%. (2) As for the later rice, there was no significant difference in all the testing items between the controlled-release compound urea and the conventional splitting fertilization under the equal rate of nitrogen application ($P<0.05$). But the grain yield of later rice was higher than that of the controlled-release compound urea. The nitrogen utilizing rates of the controlled-release compound urea and the conventional splitting fertilization were 39.91%, 39.58% respectively in the later rice, and both were significantly higher than that of the only one time basal fertilization, which was 28.14%. It suggested that an appropriate application of the controlled-release compound urea could increase the economic interest of the double cropping rice and improve nitrogen nutrient use efficiency, which benefit to save the resource and protect the soil environment.

Keywords: coating controlled-releasing; urea; the double cropping rice; the nitrogen utilizing rate

收稿日期:2010-04-15

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划(2006BAD25B08);江西省科技支撑计划课题(2009BNA08800);农业部作物营养与施肥重点实验室开放基金

作者简介:刘秀梅(1974—),女,山东泰安人,博士,主要从事新型肥料的研究和开发工作。E-mail:lxm3392@163.com

通讯作者:刘光荣 E-mail:lgrtfs@vip.sina.com.cn

提高化肥利用率、减轻或免除肥料损失带来的污染对于当今农业的可持续发展至关重要。而世界肥料的发展方向是控释化、精准化、环境友好化,其中缓控释肥料较早地引起了研究人员的注意,并且近年来成为肥料创新研究和技术革新的热点^[1-3]。包膜型缓控释肥料是近年来发展迅速的一种缓控释肥,包膜材料具有灵活多变的选择和配方,通过调节膜的厚度、渗透压等性质调控内核肥料养分的溶解释放,以适应不同作物对养分的需求特点^[4-5]。包膜肥料被认为是提高化肥利用率有效途径之一,其实际应用受到世界各国的普遍重视。美国、日本、德国、英国等对缓控释肥料的研发较早,我国起步较晚。Stutterheim对欧洲5个国家在1981—1991年的10 a间35个直播水稻点控释肥料与传统肥料氮素利用率进行了总结比较,结果发现控释肥料的氮素利用率高达58%,而普通肥料氮素利用率只有21%~32%^[6]。国内一些学者研究表明,在水稻田施用控释肥料氮素利用率高达70%多,比尿素高出30%多,早稻施用控释氮肥,氮素利用率更是高达72.6%~86.9%,比等氮量尿素处理平均高出41.7%^[7],证明了控释氮肥的显著效果。

就水稻而言,其大田生育期有3个需肥时期,分别为:返青期、分蘖期、孕穗灌浆期,因此科学施肥的方法是基施1次,追施2次^[8]。就控释材料而言,每种控释材料有一个养分释放高峰,无机材料和有机材料的控释时间不同。本研究采用无机矿物、有机高分子物质2种控释材料分别对尿素包膜,制备出2种养分释放时间的控释尿素,控释时间分别是32、65 d,和不包膜尿素掺混在一起,三者的比例分别为50%、25%、25%,组合成包膜控释掺混尿素,开展了双季稻大田试验,查看水稻的生长发育情况以及对产量和氮素养分利用率的影响,为今后水稻控释掺混专用肥的生产、施用和推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验地点设在江西农科院南昌县试验基地,位于南昌县广福镇广福村,28°41' N,115°13' E,海拔23.5 m,年平均温度17.1℃,1月份均温5.2℃,7月份均温28.8℃。≥10℃积温5343.8℃,无霜期为260 d,年降水量1800 mm。供试土壤为水稻土,其主要农化性质为:有机质20.93 g·kg⁻¹,碱解氮115.3 mg·kg⁻¹,速效磷32.31 mg·kg⁻¹,速效钾97.61 mg·kg⁻¹,pH值(H₂O)6.02。

供试控释掺混尿素为江西农科院土肥所新型肥

料试验室自行研制,含氮45.7%,控释氮占75%。供试早稻品种为金优458(杂交稻),2009年4月26日移栽,7月15日收获;晚稻品种为926(杂交稻),7月21日移栽,10月14日收获。

1.2 试验设计

小区试验设5个处理,分别为:(1)不施氮肥(N0);(2)分次施氮肥(当地常规施肥方法)(CN);(3)一次性基施氮肥(BU);(4)一次性基施控释掺混尿素(控释氮占75%)(CRU);(5)一次性基施80%控释掺混尿素(80%CRU)。早稻以施10 kg 氮·667 m⁻²为基础,晚稻以施12 kg 氮·667 m⁻²为基础。氮肥选用尿素,处理(2)分次施用,基施1次,追施2次,其他处理均一次基施;磷肥选用钙镁磷肥,各处理均一次基施磷肥35 kg·667 m⁻²;钾肥为氯化钾,处理(1)、(2)分次施用,基施1次,追施2次,其余处理均一次基施18 kg·667 m⁻²。基肥在栽禾前1 d施用,分蘖肥在栽禾后7~10 d施用,穗肥早稻在栽禾后25 d左右施用、晚稻在栽禾后30 d左右施用。

试验采用3次重复,随机区组排列,小区面积25 m²。小区间用田埂分隔开,单独设立排灌水沟,其他均采用最优的水分调控技术进行生产管理,各小区管理措施一致。

1.3 取样和分析方法

在水稻移栽前取试验田土壤分析pH、有机质、氮、磷、钾含量;水稻各主要生育期测定分蘖数、叶片叶绿素含量(SPAD502 叶绿素仪法)、全氮含量;收获期每小区中间8行取样,测定穗粒数、结实率、千粒重等;实测各小区产量;试验后分析各处理稻草及稻谷中N养分含量,计算氮肥利用率[(施氮处理水稻吸收氮量-不施氮处理水稻吸收氮量)÷氮肥施用量]。

土壤和植株中的各项指标测定均采用土壤农化常规分析方法^[9],数据的统计分析采用国际通用的SAS软件。

2 结果与分析

2.1 控释掺混尿素对双季稻生长发育的影响

早晚稻不同施肥处理分蘖情况变化动态如图1所示。对早稻来说,分蘖初期各处理之间没有明显差异,每穴平均茎数为6~8枝。移栽20 d后,各处理分蘖迅速增加,在35~40 d达到高峰,每穴平均茎数在16~18枝范围内。其中,控释掺混尿素处理的每穴茎数最多,达到18.1枝·穴⁻¹;其次是常规分次施氮、80%控释掺混尿素、一次施氮肥和不施氮肥处理,最

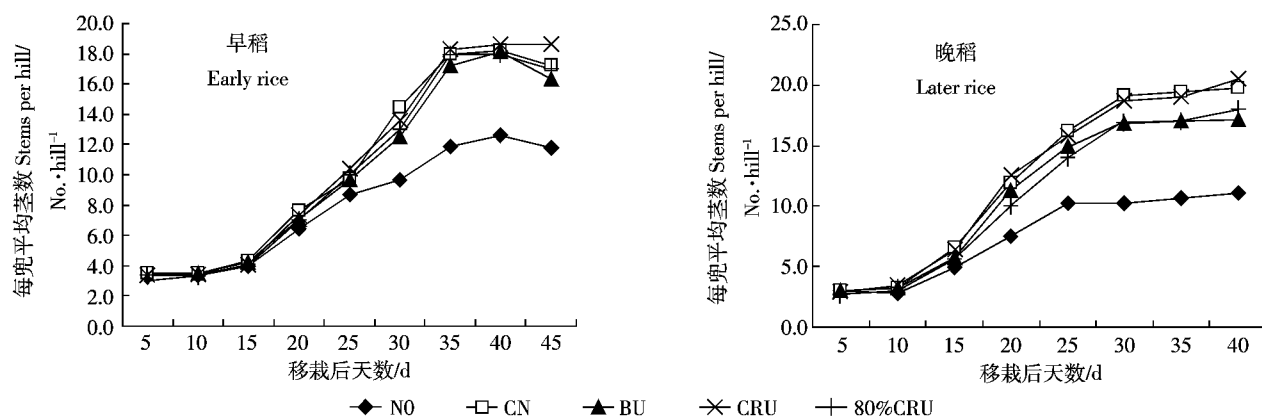


图1 不同施肥处理早晚稻的总茎数变化动态

Figure 1 The dynamics of stem numbers per hill in different fertilizing treatments

高分蘖数分别为 17.5 枝·穴⁻¹、17.2 枝·穴⁻¹、16.0 枝·穴⁻¹、12.6 枝·穴⁻¹。各施氮处理分蘖数显著高于不施氮处理,而各施氮处理之间差异不显著。

对晚稻来说,移栽 15 d 后,各处理之间分蘖情况没有明显差异。移栽 25 d 后,不施氮处理分蘖基本达到高峰,为 11.2 枝·穴⁻¹;其他各施氮处理分蘖仍然稳定增加,在移栽 30~35 d 左右,常规分次施氮、控释掺混尿素、80%控释掺混尿素和一次施氮肥处理先后达到高峰,4 处理分蘖数在 16.5~18.9 枝·穴⁻¹ 之间。其中,常规分次施氮和控释掺混尿素处理分蘖数明显高于 80%控释掺混尿素和一次施氮肥处理;而常规分次施氮和控释掺混尿素处理之间分蘖数差异不显著,说明掺混尿素基本可以满足水稻整个分蘖期对养分的需求,与常规分次施肥处理相比较,效果相当。

叶绿素含量是表征水稻植株健康生长的关键指标,也是影响水稻生物学产量的主要因子之一,会直接影响干物质的转化和积累乃至最终经济产量^[10]。分别在早稻移栽 36 d、晚稻移栽 45 d 后的 1 个月内,对

水稻叶片的 SPAD 值进行了测定,其变化情况如图 2 所示。

对早稻来说,80%控释掺混尿素除外,其余各处理的 SPAD 值均有 2 个高峰,分别是移栽 48、66 d 左右,SPAD 值分别达到 33.25~40.43、34.41~41.07。其中,控释掺混尿素处理 SPAD 值在 2 次高峰中均最高,达到 41.07;其次是常规分次施氮肥,SPAD 值达到 40.43,两处理之间没有明显差异,此结果同于早稻的分蘖情况。在测定的 1 个月内,SPAD 值的高低顺序是:控释掺混尿素>常规分次施肥>80%控释掺混尿素>一次施氮肥>不施氮肥处理。

对晚稻来说,各处理的 SPAD 值亦有 2 个高峰,分别是移栽 57、69 d 后,即孕穗期、抽穗期。与早稻不同之处是:常规分次施氮肥处理其 SPAD 值在 2 次高峰中均最高,达到 40 以上,而控释掺混尿素处理次之。说明控释掺混尿素在晚稻上的效果不如常规分次施氮肥,可能是田间温度过高,致使有机包膜材料承受不住水压,过早释放养分,造成水稻后期氮素营养

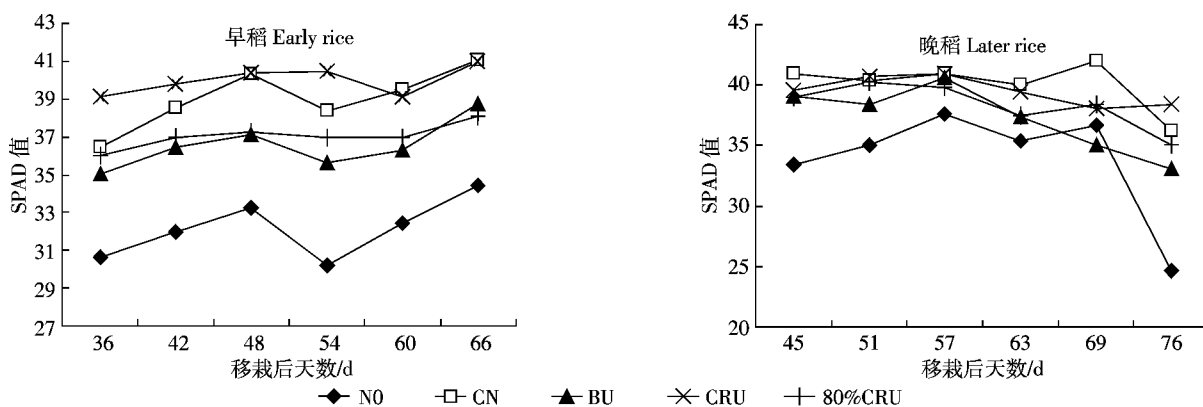


图2 不同施肥处理早晚稻的 SPAD 变化动态

Figure 2 The dynamics of SPAD in different fertilizing treatments

不足。但是,控释掺混尿素处理的 SPAD 值仍然高于一次施氮肥和不施氮肥处理。

2.2 控释掺混尿素对双季稻产量及产量形成因素的影响

不同的施肥方式对早稻产量及产量形成因素有影响(见表 1)。控释掺混尿素处理的稻谷和稻草产量均最高,分别达到 450.45、396.61 kg·667m⁻²;其次是常规分次施氮肥、80%控释掺混尿素处理,稻谷产量分别为 438.64、434.03 kg·667m⁻²。对于早稻的稻谷和稻草来说,常规分次施氮肥、控释掺混尿素、80%控释掺混尿素处理之间差异不显著,而以上处理均显著高于氮肥一次基施处理($P<0.05$)。对于各处理的产量形成因素来说,控释掺混尿素处理的穗粒数、千粒重均高于常规分次施氮肥,而常规分次施氮肥的结实率高于控释掺混尿素处理。在早稻上,各施肥处理对产量及其产量形成因素的影响其效果高低顺序是:控释掺混尿素>常规分次施氮肥>80%控释掺混尿素>一次施氮肥>不施氮肥处理。同早稻的 SPAD 值的结论相同。

不同施肥方式对晚稻产量及产量形成因素的影响见表 1。对于晚稻稻草产量来说,控释掺混尿素产量最高,为 378.47 kg·667m²,80%控释掺混尿素处理次之,为 344.87 kg·667m²;而常规分次施肥的稻谷产量最高,为 547.13 kg·667m²,控释掺混尿素处理的晚稻产量次之,为 530.87 kg·667m²;80%控释掺混尿素处理稻谷产量居第三,为 519.06 kg·667m²。3 个处理之间差异不显著,而 3 个处理均显著高于一次基施氮肥、不施氮肥处理($P<0.05$)。对于晚稻的穗粒数、结实率和千粒重来说,常规分次施氮肥处理均最高,其次

是控释掺混尿素、80%控释掺混尿素、一次基施氮肥处理,所有施氮肥的上述 4 个处理之间差异不显著,4 个处理均显著高于不施氮肥处理。

2.3 控释掺混尿素对双季稻全氮含量及氮素利用率的影响

水稻在不同的生育期植株全氮含量不同(表 2)。在水稻的整个生育期内,分蘖期其植株全氮含量最高,其次是孕穗期、成熟期。

不同施肥方式对水稻各个生育期植株全氮含量亦有影响(表 2)。对于早稻来说,控释掺混尿素处理在分蘖期、孕穗期和成熟期其植株和籽粒中全氮含量均最高,分别为 37.58、27.94、6.80、13.04 mg·kg⁻¹;其次是常规分次施氮肥处理和 80%控释掺混尿素处理,3 处理之间差异不显著。不施氮肥处理各生育期全氮含量最低,与其他处理相比,差异达显著水平($P<0.05$)。对于晚稻来说,常规分次施氮肥处理在水稻各个生育期其植株和籽粒中含氮量均最高,其次是控释掺混尿素处理,二者之间差异不显著。

不同施肥处理对双季稻吸收氮量及氮素利用率有显著影响(表 3)。对早稻来说,控释掺混尿素处理水稻吸收氮量最高,达到 8.56 kg·667m⁻²;常规分次施氮肥次之,水稻吸收氮量为 7.80 kg·667m⁻²。在同样施氮量条件下,控释掺混尿素处理的氮肥利用率为 40.08%,显著高于常规分次施氮肥处理的 32.47%;而氮肥一次基施处理,早稻的氮肥利用率只用 19.50%。控释掺混尿素比氮肥一次基施肥料利用率提高 20 个百分点。对晚稻来说,控释掺混尿素和常规分次施肥

表 1 不同的施肥方式对双季稻产量及产量形成因素的影响
Table 1 Effects of different fertilizers on the yield and agronomic properties of rice

处理 Treatment		穗粒数 Spike No.per panicle/No.·穗 ⁻¹	结实率 Filled grain percent/%	千粒重 1 000 grain weight/g	稻谷产量 Yield of grain/kg·667m ⁻²	稻草产量 Yield of straw/kg·667m ⁻²
早稻 Early rice	N0	71.92b	76.13c	23.84b	355.15c	237.01b
	CN	88.46a	89.60a	24.68ab	438.64ab	356.98ab
	BU	89.27a	83.49b	25.05ab	410.55b	323.07b
	CRU	89.41a	88.34a	26.19a	450.45a	396.61a
	80%CRU	86.83a	88.07a	24.93ab	434.03ab	380.33a
晚稻 Later rice	N0	108.21b	79.09b	24.43a	370.5c	217.56c
	CN	123.10a	91.22a	25.10a	547.13a	337.81ab
	BU	119.85a	87.65a	24.96a	498.11b	321.65b
	CRU	121.42a	90.17a	25.07a	530.87a	378.47a
	80%CRU	121.01a	90.40a	24.78a	519.06ab	344.87ab

注:分别对早稻、晚稻的同一列数据进行邓肯多重比较,凡尾部标有不同字母的数据表示它们之间有显著差异($P<0.05$),下同。
Note: Same letters within each vertical column indicate no significant difference at 5% level, according to Duncan's Multiple Range Test, the same as follows.

表 2 不同施肥处理对水稻不同生育期植株全氮含量的影响(mg·kg⁻¹)
Table 2 Effects of different fertilizers on the nitrogen content of rice plant(mg·kg⁻¹)

	处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	成熟期 Mature stage	
				稻草 Straw	籽粒 Grain
早稻 Early rice	N0	20.99b	15.65c	4.05b	10.13b
	CN	37.46a	27.41a	6.67a	12.38a
	BU	36.72a	25.39b	6.05a	12.09a
	CRU	37.58a	27.94a	6.80a	13.04a
	80%CRU	36.3a	26.22ab	6.55a	12.05a
晚稻 Later rice	N0	18.72b	13.28c	4.77b	9.38b
	CN	24.54a	20.93a	6.30a	13.04a
	BU	22.52a	17.73b	5.76a	12.12a
	CRU	24.43a	19.84a	6.41a	12.96a
	80%CRU	23.38a	17.55b	6.12a	12.46a

水稻吸收氮量相当，分别是 9.30、9.26 kg·667m⁻²；相应地，二者的氮肥利用率也相差甚微，依次是39.91%、39.58%。在晚稻的所有处理中，80%控释掺混尿素处理的氮肥利用率最高，达到 42.34%。

由此可见，水稻施用控释掺混尿素，有利于氮肥的供应和吸收，提高氮素利用率，减少了氮肥的损失。

3 讨论

包膜控释肥料即在肥料表层喷涂一层或者几层惰性物质，形成致密的低渗透性膜，因而能控制水进入肥料核心以及养分溶液从膜内向外部扩散的速度，进而延缓肥料中养分的释放速度，对养分的释放具有可控性^[11-13]。其养分的释放过程首先是水分透过膜，水蒸汽凝结在固体肥料核心上，并溶解部分肥料核心，引起内部压力的累积。如果膜能承受住内部压力，肥料核心的养分就能通过扩散而释放^[14-15]。

在水田这种特殊的条件下，包膜肥料的控释材料的选择尤显得重要，如果该材料对养分控制过于严密，养分释放不出，会导致初期分蘖不足，成穗数减少，导致减产^[16-17]；如果控释材料强度不够或者透水性强，易受外界温度和水环境条件的影响，导致膜层破裂，则又不能起到控释效果，造成后期营养供应不足，出现早衰减产现象^[18-19]。本研究选用无机矿物、有机高分子材料分别包被大颗粒尿素，制备出 2 种养分释放时间不同的控释尿素，在水田中养分释放时间分别是 32、65 d，和不包膜尿素掺混在一起，三者的比例分别为 50%、25%、25%组合成包膜控释掺混尿素，保证水稻在返青、分蘖、抽穗几个关键生育期均有养分供应。从试验结果来看，控释掺混尿素在早稻上的效果较好，其分蘖情况、叶绿素含量、早稻产量和氮肥利用率均比常规分次施氮肥处理高。在晚稻条件下，控释掺混尿素处理的稻谷产量为 530.87 kg·667m⁻²，而常规分

表 3 不同施肥处理双季稻吸收氮量及氮肥利用率
Table 3 The nitrogen content of the double cropping rice and utilization of different fertilizer

	处理 Treatment	稻谷氮量 Grain N/	稻草氮量 Straw N/	水稻共吸收氮 Total	氮肥施用量 N	氮肥利用率 N
		kg·667m ⁻²	kg·667m ⁻²	absorb N/kg·667m ⁻²	fertilizing/kg·667m ⁻²	utilizing rate/%
早稻 Early rice	N0	3.59b	0.96b	4.55c	0	—
	CN	5.43a	2.37a	7.80ab	10	32.47b
	BU	4.55a	1.95a	6.51b	10	19.50c
	CRU	5.87a	2.69a	8.56a	10	40.08a
	80%CRU	5.23a	2.49a	7.72ab	8	31.64b
晚稻 Later rice	N0	3.47b	1.04a	4.51c	0	—
	CN	7.13a	2.13a	9.26a	12	39.58a
	BU	6.04a	1.85a	7.89b	12	28.14b
	CRU	6.88a	2.42a	9.30a	12	39.91a
	80%CRU	6.47a	2.11a	8.58ab	9.6	42.34a

次施氮肥处理稻谷产量为 $547.13 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$, 二者之间差异不显著。说明在晚稻条件下, 控释掺混尿素和常规分次施肥效果相当。另外, 在晚稻试验中, 控释掺混尿素的稻草产量、氮肥利用率均高于常规分次施氮肥处理。控释掺混尿素和常规分次施氮肥二者的各项测试指标均显著高于氮肥一次基施处理。

关于晚稻的稻谷产量, 控释掺混尿素比常规分次施氮肥低的原因可能是: 晚稻移栽时田间温度过高, 有机包膜材料耐受不了高温和水压, 养分提前释放, 在水稻灌浆成熟期氮素不足所致。今后在包膜技术上需要进一步探讨膜材、膜层控释养分性能与温度的关系。

4 结论

(1) 在相同的施氮水平下, 对于早稻来说, 控释掺混尿素处理其水稻的分蘖数、叶绿素含量、各生育期的全氮含量、稻谷和稻草产量均高于常规分次施氮肥处理, 二者之间差异均不显著。控释掺混尿素的氮肥利用率为 40.08%, 显著高于常规分次施氮肥的 32.47%, 而一次基施氮肥的利用率只有 19.50%。

(2) 在相同的施氮水平下, 对于晚稻来说, 常规分次施氮处理的分蘖数、叶绿素含量、各生育期的全氮含量、稻谷产量均高于控释掺混尿素处理, 二者之间差异均不显著。但是, 释掺混尿素处理的稻草产量、氮肥利用率均高于常规分次施氮肥处理。常规分次施氮肥和控释掺混尿素的养分利用率分别为 39.58%、39.91%, 二者显著高于一次基施氮肥的 28.140%。

(3) 80%控释掺混尿素处理的水稻各项测试指标均高于一次基施氮肥处理, 说明采用肥料控释技术在水稻上减掉 20%的施氮量是可行的。

(4) 控释掺混尿素一次基施, 不仅节约了劳动力、提高了收益, 而且减少资源的浪费, 保护土壤生态环境, 推广应用前景广阔。

参考文献:

- [1] Paramasivam S, Alva A K. Leaching of nitrogen forms from controlled-release nitrogen fertilizers[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1997, 28(17/18): 1663–1674.
- [2] Paramasivam S, Alva A K. Nitrogen recovery from controlled-release fertilizers under intermittent leaching and dry cycles[J]. *Soil Science*, 1997, 162: 447–453.
- [3] Chatzoudis G K, Rigas F. Macroreticular hydrogel effects on dissolution rate of controlled-release fertilizers[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, 46: 2830–2833.
- [4] Shaviv A, Mikkelsen R L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation: A review[J]. *Fertilizer Research*, 1993, 35: 1–12.
- [5] Tomaszewska M, Jarosiewicz A. Use of poly sulfone in controlled-release NPK fertilizer formulations[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50: 4634–4639.
- [6] 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.
XU Ming-gang, SUN Xiao-feng, ZOU Chang-ming, et al. Effects and rational application of controlled-release nitrogen fertilizer in paddy field of southern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(4): 487–493.
- [7] 陈宝成, 张民, 马丽, 等. 稻田控释掺混专用肥对水稻生长的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2009, 40(2): 173–178.
CHEN Bao-cheng, ZHANG Min, MA Li, et al. Effect of controlled-release compound fertilizer on growth of paddy rice in field[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science)*, 2009, 40(2): 173–178.
- [8] 王海, 石庆华. 水稻丰产技术[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2005: 46.
- [9] 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, 2000.
LU Ru-kun. Soil analytical methods of agricultural chemistry[M]. Beijing: Publishing Company of Chinese Agricultural Science and Technology, 2000.
- [10] 李春俭. 高级植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 17.
LI Chun-jian. Nutrition of higher plant[M]. Beijing: Publishing Company of Chinese Agricultural University, 2008: 17.
- [11] 刘保存, 徐秋明, 邹国元, 等. 缓控释肥料理论与实践[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2009: 8.
LIU Bao-cun, XU Qiu-ming, ZOU Guo-yuan, et al. The theory and practice of the slow/controlled release fertilizer[M]. Beijing: Publishing Company of Chinese Agricultural Science and Technology, 2009: 8.
- [12] 张夫道, 王玉军. 我国缓控释肥料的现状和发展方向[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(4): 1–4.
ZHANG Fu-dao, WANG Yu-jun. Current situation and development trend of slow/controlled-release fertilizer in China[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2008(4): 1–4.
- [13] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 536–545.
ZHAO Bing-qiang, ZHANG Fu-suo, LIAO Zong-wen, et al. Research on development strategies of fertilizer in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(5): 536–545.
- [14] 张民, 史衍玺, 杨守祥, 等. 控释和缓释肥的研究现状和进展[J]. *化肥工业*, 2001, 28(5): 27–30, 63.
ZHANG Min, SHI Yan-xi, YANG Shou-xiang, et al. Research achievement and development of controlled and slowed release fertilizer[J]. *Journal of the Chemical Fertilizer Industry*, 2001, 28(5): 27–30, 63.
- [15] 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]. *植物营养与肥料学报*, 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.
- [16] 唐拴虎, 杨少海, 陈建生, 等. 水稻一次性施用控释肥料增产机理探讨[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12):2511-2520.
- TANG Shuan-hu, YANG Shao-hai, CHEN Jian-sheng, et al. Studies on the mechanism of single basal application of controlled-release fertilizers for increasing yields of rice(*Oryza sativa* L.)[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(12):2511-2520.
- [17] 赵秀芬, 房增国, 赵 钢. 温度对几种有机高聚物包膜控释肥磷素释放特性的影响[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2007, 20(1):29-32.
- ZHAO Xiu-fen, FANG Zeng-guo, ZHAO Gang. Effects of temperature on phosphorus releasing characteristics of organic polymer coating controlled-release fertilizers[J]. *Journal of Zhongkai Agrotechnical College*, 2007, 20(1):29-32.
- [18] 秦道珠, 黄平娜, 徐明岗, 等. 施用控释肥对粳稻生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8):283-286.
- QIN Dao-zhu, HUANG Ping-na, XU Ming-gang, et al. Application of controlled-release fertilizer on the growth and yield of japonica rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(8):283-286.
- [19] 于淑芳, 杨 力, 张 民, 等. 控释肥对小麦玉米生物学性状和土壤硝酸盐积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):128-133.
- YU Shu-fang, YANG Li, ZHANG Min, et al. Effect of the controlled-release fertilizer on the biology character of wheat/maize and the nitrate accumulation in the soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):128-133.