

控释尿素不同施用条件下冬小麦产量和氮素利用效应

夏伟光^{1,3}, 武 际^{2,3}, 高凤梅⁴, 王允青², 郭熙盛^{2,3*}

(1.安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230031; 2.安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 安徽 合肥 230031; 3.安徽养分循环与资源环境省级实验室, 安徽 合肥 230031; 4.安徽农业大学理学院, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 采用田间试验方法研究了控释尿素不同施用条件对冬小麦产量、氮素利用和经济效益的影响。试验共设 7 个处理, 即 CK (空白处理, 不施氮肥)、100%PU₁₀₀ (普通尿素全量基施, N 240 kg·hm⁻²)、100%PU₆₄ (60%的普通尿素基施、40%的普通尿素于拔节期追施, N 240 kg·hm⁻²)、80%PU₆₄ (60%的普通尿素基施、40%的普通尿素于拔节期追施, N 192 kg·hm⁻²)、100%CRU (全量树脂包膜控释尿素基施, N 240 kg·hm⁻²)、80%CRU (80%树脂包膜控释尿素基施, N 192 kg·hm⁻²) 和 40%CRU+40%PU (40%树脂包膜控释尿素+40%的普通尿素基施, N 192 kg·hm⁻²)。结果表明, 无论是产量效应还是氮素利用效应, 树脂包膜控释尿素 (CRU) 处理总体优于普通尿素 (PU) 处理, 尤其树脂包膜控释尿素和普通尿素配施 (40%CRU+40%PU) 效果最佳, 以 7 709 kg·hm⁻² 的产量、36.44% 的氮肥吸收利用率、15 946 元·hm⁻² 的相对净收入达到处理间最高水平。该处理在减少氮素投入量的情况下, 不仅促进了冬小麦增产, 而且显著提高了肥料的利用率, 拥有较高的产投比。因此, 树脂包膜控释尿素和普通尿素的配施处理 (40%CRU+40%PU) 是本试验条件下最优的氮肥处理。

关键词: 包膜控释尿素; 产量; 氮素利用效应; 经济效益; 冬小麦

中图分类号: S145.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2014)01-0038-07

doi: 10.13254/j.jare.2013.0185

Effects of Controlled Release Urea on Wheat Yield and Nitrogen Utilization Efficiency Under Different Applied Conditions

XIA Wei-guang^{1,3}, WU Ji^{2,3}, GAO Feng-mei⁴, WANG Yun-qing², GUO Xi-sheng^{2,3*}

(1. College of Resource and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230031, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 3. Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment of Anhui, Hefei 230031, China; 4. College of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230031, China)

Abstract: The field trial was conducted to study the effects of different nitrogen fertilizer applications on winter wheat yield, nitrogen utilization efficiency and economic benefit. 7 treatments were designed as CK (no nitrogen fertilizer applied), 100%PU₁₀₀ (conventional urea applied before sowing, N rate was 240 kg·hm⁻²), 100%PU₆₄ (conventional urea applied before sowing and at jointing with the ratio of 6:4, N rate was 240 kg·hm⁻²), 80%PU₆₄ (conventional urea applied before sowing and at jointing with the ratio of 6:4, N rate was 192 kg·hm⁻²), 100%CRU (resin coated controlled release urea applied before sowing, N rate was 240 kg·hm⁻²), 80%CRU (resin coated controlled release urea applied before sowing, N rate was 192 kg·hm⁻²), and 40%CRU+40%PU (resin coated controlled release urea and conventional urea applied before sowing, N rate was 192 kg·hm⁻²). The results showed that no matter on the efficiency of yield or that of nitrogen, resin coated controlled-release urea (CRU) was better when compared with conventional urea (PU). Especially, the combined application treatment (40%CRU+40%PU) was the best with achieving the highest wheat yield of 7 709 kg·hm⁻², the highest N fertilizer utilization efficiency of

收稿日期: 2013-10-26

基金项目: 安徽省农业科学院学科建设项目 (13A1003); 公益性行业科研专项 (201203013); 国家“十二五”科技支撑计划重点项目 (2011BAD16B06)

作者简介: 夏伟光 (1989—), 男, 安徽郎溪人, 在读硕士, 主要从事植物营养与作物施肥技术研究。E-mail: 356171798@qq.com

* 通信作者: 郭熙盛 E-mail: 1078681598@qq.com

36.44% and the maximum net income of 15 946 yuan·hm⁻². And it could not only increase winter wheat yield with reducing the nitrogen fertilizer application, but also improve N fertilizer utilization efficiency and owe the highest ratio of output to input. Therefore, the combined application of the resin coated controlled-release urea and conventional urea (40%CRU+40%PU) was the optimal nitrogen fertilizer treatment under the conditions of this experiment.

Keywords: coated controlled-release urea (CRU); yield; Nitrogen utilization; economic benefit; winter wheat

农业生产中为追求高产而大量施用氮肥,不仅造成了资源浪费,还带来了环境负效应。我国氮肥当季利用率仅为30%~50%,低于发达国家15~20个百分点^[1];无法被吸收的氮素以各种途径损失掉,例如向下淋失污染地下水,部分地区甚至出现季节性的地下水硝态氮污染^[2]。随着人们生活水平的提高,现代农业朝着高产、优质和高效的方面发展,树脂包膜控释尿素的出现顺应了这一潮流,其使得肥料氮素释放缓慢可控化,最大限度吻合作物养分需求规律。前人大量试验证明,树脂包膜控释尿素可以有效减少土壤氮素的淋失,提高氮肥利用率,从而提高作物的产量和品质^[3-7]。

冬小麦是我国主要的粮食作物之一,树脂包膜控释尿素在冬小麦增产和氮肥效应方面的作用得到了较多的研究。卢艳平等^[8]报道了华北小麦-玉米轮作体系施用树脂包膜控释尿素的效果,研究显示,和常规用量分次施肥(100%UD)处理相比,减少20%用量的缓控释肥处理(80%SCR)在小麦季产量上差异不显著,但是在玉米季增产显著,增幅达18.3%,同时获得最高产量;王丽英等^[9]研究表明,在褐土上,包膜尿素和普通尿素配施处理下小麦产量最高达7 839.39 kg·hm⁻²,极显著高于普通尿素分次施肥处理,增产幅度达7.15%。树脂包膜控释尿素在作物增产方面有着稳定的促进作用,但是施用肥料的最终目的并不仅是为了获得高产,更是为了增加收入。因此,考虑到树脂包膜控释尿素价格较高,等量替代常规氮肥农民难以接受,普通尿素的增产效果不理想,如何找到中间平衡点既能获得高产又能降低成本才是关键。因此,我们通过对不同的氮肥施用配比模式下冬小麦产量和氮肥效应的研究,来探求更加经济合适的施肥措施,从而在保证产量的同时,提高肥料利用率,增加农民收入,为促进农业高产、高效和倡导环境友好型农业提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验位于安徽省淮北市濉溪县五铺农场,该地属

于暖温带半湿润气候的平原地带,年平均气温14.5℃,降雨量852.4 mm,日照充足,四季分明。供试土壤为砂姜黑土,质地为轻粘土。土壤0~20 cm各项指标如下:有机质20.53 g·kg⁻¹,全氮0.96 g·kg⁻¹,碱解氮71.13 mg·kg⁻¹,速效磷14.07 mg·kg⁻¹,全磷0.76 g·kg⁻¹,速效钾240.44 mg·kg⁻¹,pH值8.23。

小麦供试品种为大地98。供试肥料:氮肥为普通尿素和树脂包膜控释尿素。普通尿素为中盐安徽红四方股份责任有限公司生产的颗粒尿素(含氮46%);树脂包膜控释尿素(含氮42%)由山东金正大生态工程有限公司生产,控释期为90 d。磷肥为铜陵市金磷复合肥有限责任公司生产粉末状过磷酸钙(P₂O₅ 12%);钾肥为俄罗斯产红色粉末状氯化钾(K₂O 60%)。

1.2 试验设计

试验共设7个处理:(1)CK:不施氮肥;(2)100%PU₁₀₀:100%普通尿素(N 240 kg·hm⁻²),全部基施;(3)100%PU₆₄:100%普通尿素(N 240 kg·hm⁻²),60%的氮肥基施、40%的氮肥于拔节期追施;(4)80%PU₆₄:80%普通尿素(N 192 kg·hm⁻²),60%的氮肥基施、40%的氮肥于拔节期追施;(5)100%CRU:100%树脂包膜控释尿素(N 240 kg·hm⁻²),全部基施;(6)80%CRU:80%树脂包膜控释尿素(N 192 kg·hm⁻²),全部基施;(7)40%CRU+40%PU:40%的树脂包膜控释尿素+40%的普通尿素(N 192 kg·hm⁻²),全部基施。所有处理磷肥、钾肥用量及施用方法相同,其中,磷肥用量为P₂O₅ 90 kg·hm⁻²,钾肥用量为K₂O 120 kg·hm⁻²。磷、钾肥全部基施。4次重复,小区面积4 m×5 m=20 m²,随机区组设计。试验于2011年10月15日播种冬小麦,于2012年6月3日收获,播种量为11 kg·667 m⁻²。在整个生育期内,小麦共灌水3次,分别于返青前、拔节期和灌浆期各灌水1次,每次灌水量约为500 m³·hm⁻²;除施肥外其他管理措施完全相同。小麦成熟时每小区实收计产,同时取样进行室内考种。

1.3 测定项目与方法

于小麦成熟期分别采集小麦植株样品,每小区随机取生长一致的单茎40个,3次重复。植株样品按茎

秆和籽粒分开,杀青、烘干、称重、粉碎混匀后备分析用。用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮,凯氏定氮法测定小麦茎秆和籽粒含氮量。

1.4 数据计算方法

氮肥利用率(%)=(施氮条件下作物吸氮量-不施氮条件下作物吸氮量) $\times 100$ /施氮量;

氮肥农学效率($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=(施氮区小麦产量-无氮区小麦产量)/施氮量;

氮肥偏生产力($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=单位面积作物产量/单位面积施氮量;

氮收获指数=籽粒氮吸收量/(籽粒氮吸收量+秸秆氮吸收量);

1.5 数据分析方法

本文数据均采用 SAS9.0 软件和 Excel2010 软件进行统计分析。采用 LSD 法对试验数据进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥处理对冬小麦产量及其构成因素的影响

由表 1 我们可以看出,CK 的小麦产量最低,为 $6\,625\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施用氮肥后小麦产量均显著增加,增产幅度达到了 $9.87\%\sim 16.36\%$ 。和普通尿素全部基施处理 $100\%\text{PU}_{100}$ 相比,分施处理 $100\%\text{PU}_{64}$ 增产 $142\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增幅为 1.95% 。同时,在氮肥用量减少 20% 的条件下,分次施肥仍可以表现出一定的增产效应:处理 $80\%\text{PU}_{64}$ 比处理 $100\%\text{PU}_{100}$ 产量增加了 $183\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增幅达到了 2.51% ,其效果还要优于处理 $100\%\text{PU}_{64}$,但二者差异不显著。另外,表 1 明显显示,施用树脂包膜控释尿素处理 $100\%\text{CRU}$ 、 $80\%\text{CRU}$ 的产量均高于施用普通尿素(PU)处理。其中处理 $80\%\text{CRU}$ 产量较高,且与 $100\%\text{PU}_{100}$ 相比,增产 $342\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,

表 1 不同施肥处理对冬小麦的产量以及产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different treatments on grain yield and its components of winter wheat

处理 Treatment	产量 Yield/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	有效穗数 Spike No./ $\text{万}\cdot\text{hm}^{-2}$	千粒重 1 000-grain weight/g	穗粒数 Grains per spike/ 个·穗 ⁻¹
CK	6 625c	625.5a	34.4b	32.0c
$100\%\text{PU}_{100}$	7 279b	642.0a	35.9ab	32.8bc
$100\%\text{PU}_{64}$	7 421ab	649.0a	36.1ab	33.5ab
$80\%\text{PU}_{64}$	7 462ab	650.0a	36.1ab	33.8ab
$100\%\text{CRU}$	7 537ab	633.5a	36.5a	34.5ab
$80\%\text{CRU}$	7 621ab	637.5a	36.6a	34.6a
$40\%\text{CRU}+40\%\text{PU}$	7 709a	640.5a	36.6a	35.1a

注:同列内不同小写字母表示处理间差异显著, $P<0.05$ 。下同。

增幅为 4.70% 。在全部处理中, $40\%\text{CRU}+40\%\text{PU}$ 获得最高产量 $7\,709\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较 CK 增产 16.36% ,较普通尿素全部基施处理 $100\%\text{PU}_{100}$ 增产 5.91% ,产量差异均达到显著水平,说明树脂包膜控释尿素与普通尿素配施有助小麦增产。

从产量结构来看,施用树脂包膜控释尿素处理的冬小麦有效穗数要低于普通尿素处理,千粒重略高于普通尿素处理,但 2 项指标处理间差异均未达到显著水平。对于穗粒数来说,处理 $40\%\text{CRU}+40\%\text{PU}$ 和 $80\%\text{CRU}$ 比普通尿素全部基施处理 $100\%\text{PU}_{100}$ 分别增加了 7.01% 和 5.49% ,差异均达到了显著水平。据此推测,普通尿素与树脂包膜控释尿素配合施用,一方面可解决单施树脂包膜控释尿素前期氮素释放过慢^[10-11]供氮不足的问题,另一方面又可确保中后期氮素充足供应,这应该是小麦增产的原因所在。

2.2 不同氮肥处理对冬小麦籽粒吸氮量以及肥料利用率的影响

由表 2 可以看出,施用氮肥可以显著提高植株籽

表 2 不同施肥处理对冬小麦籽粒、秸秆的氮素吸收以及肥料利用率的影响

Table 2 Effect of different fertilization treatments on the N uptake of the grain and straw and the fertilizer use efficiency of winter wheat

处 理 Treatment	氮吸收量 N uptake/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$		氮收获指数 NHI	氮肥吸收利用率 NRE/%	农学利用率 NAE / $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	氮肥偏生产力 NPFP / $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
	籽粒	秸秆				
CK	90.10d	36.20c	0.71b	—	—	—
$100\%\text{PU}_{100}$	109.18c	53.20a	0.67c	19.08d	2.72f	30.33b
$100\%\text{PU}_{64}$	128.58b	52.66a	0.71b	22.90c	3.31e	30.92b
$80\%\text{PU}_{64}$	115.88c	53.91a	0.68bc	22.66c	4.36c	31.40b
$100\%\text{CRU}$	146.21a	47.19b	0.76a	27.96b	3.80d	38.86a
$80\%\text{CRU}$	128.70b	51.46a	0.71b	28.06b	5.19b	39.69a
$40\%\text{CRU}+40\%\text{PU}$	151.09a	45.16b	0.77a	36.44a	5.64a	40.15a

粒的氮素吸收,树脂包膜控释尿素相比于普通尿素有更大的优势。一方面,普通尿素分次施用显著提高了小麦籽粒的氮吸收量。处理 100%PU₆₄、80%PU₆₄ 与 100%PU₁₀₀ 相比,籽粒的氮吸收量分别提高了 17.77% 和 6.14%,差异均达到显著水平。另一方面,相同氮肥施用量下,施用树脂包膜控释尿素的处理籽粒的氮吸收量明显高于施用普通尿素的处理。处理 100%CRU 与 100%PU₁₀₀、100%PU₆₄ 相比,籽粒氮吸收量分别提高了 33.92%、13.71%, 处理 80%CRU 比 80%PU₆₄ 也提高了 11.06%。于此同时,各个处理的氮收获指数,也遵循相同的趋势,说明施用树脂包膜控释尿素有利于促进氮素向小麦籽粒中转运^[12-13]。

同时,施用树脂包膜控释尿素还可以显著改善小麦的氮素利用状况,包括氮肥吸收利用率、农学利用率和氮肥的偏生产力。全部处理中以 40%CRU+40%PU 的氮肥吸收利用率、农学利用率和氮肥的偏生产力最高。并且,在相同氮肥施用量下,相比于普通尿素处理(80%PU₆₄)和树脂包膜控释尿素处理(80%CRU),其氮肥吸收利用率分别提高了 60.81%和 29.86%,农学利用率分别提高了 29.36%和 8.67%, 氮肥偏生产力分别提高了 27.87%和 1.16%。这说明,树脂包膜控释尿素和普通尿素配施,在一定程度上,有利于小麦吸收利用氮素^[14-15]。

2.3 不同氮肥处理对冬小麦经济效益的影响

从表 3 可以看出,与 CK 相比,施用氮肥的处理小麦经济效益提高了 3.07%~9.41%。值得注意的是,减量 20%的氮肥处理,要明显好于 100%的氮肥处理。其中,80%PU₆₄ 比 100%PU₁₀₀、100%PU₆₄ 分别增加 2.00%、1.92%;处理 80%CRU 比 100%CRU 增加3.28%。其中,40%CRU+40%PU 获得最高经济效益,相对净收入 15 946 元·hm⁻², 其次为 80%CRU 和 80%PU₆₄, 分别为 15 532、15 323 元·hm⁻²。

产投比方面,也有着同样的趋势。在普通尿素做氮肥的处理中,80%PU₆₄ 比 100%PU₆₄ 产投比高 31.07%,处于该处理中最高水平;此外,40%CRU+40%PU 分别比 100%CRU、80%CRU 产投比高 80.77%、32.02%,处于全部处理间最高水平。40%CRU+40%PU 的产投比要略微大于 80%PU₆₄,主要是由于 80%PU₆₄ 产量上的不足和追肥成本的增加。如此说来,40%CRU+40%PU 是比较适宜和方便的施肥措施。

3 讨论

3.1 不同氮肥处理对冬小麦产量及其构成因素的影响

小麦产量构成因素是产量的来源,包括小麦的有效穗数、穗粒数和千粒重,增加构成因素是增加产量的有效途径^[16]。王新民等^[17]研究表明,在相同的灌水条件下,控释氮肥处理的产量及产量构成因素要明显高于普通尿素处理,其中在灌水 2 次(越冬、拔节水)的条件下,2 种控释肥(CRNF 和 LUXECOTE)处理分别较普通尿素处理单位穗数增加 4.5 万个·hm⁻² 和 25.5 万个·hm⁻²,穗粒数分别增加 2.4 个和 2.6 个,千粒重分别增加 1.91 g 和 3.93 g。说明由于控释氮肥养分缓慢释放且肥效期长,能满足冬小麦对 N 素需求,对冬小麦产量及其结构有显著影响。本研究中,在产量、千粒重和穗粒数上树脂包膜控释尿素处理(100%CRU、80%CRU)相对于普通尿素处理(100%PU₁₀₀、100%PU₆₄、80%PU₆₄)虽然也均表现出一定促进效应,却并未达到显著水平。但值得注意的是,树脂包膜控释尿素和普通尿素的配施处理 40%CRU+40%PU 获得了处理间最高的产量和穗粒数,分别为 7 709 kg·hm⁻²、35.1 个·穗⁻¹,相比普通尿素全部基施的处理 100%PU₁₀₀ 分别增加 5.91%、7.01%。这和王丽英等^[9]研究结果相似,他们发现控释尿素与普通尿素配施有利于增

表 3 不同氮肥处理对冬小麦经济效益的影响

Table 3 Effect of different fertilization treatments on the economic benefit of winter wheat

处理 Treatment	产量 Yield/ kg·hm ⁻²	产值 Yield value/ 元·hm ⁻²	成本 Cost/ 元·hm ⁻²	劳动力成本 Labor cost /元·hm ⁻²	相对净收入 Relative net income/元·hm ⁻²	产投比 Output/input
CK	6 625	14 575	—	—	14 575	—
100%PU ₁₀₀	7 279	16 014	991	—	15 022	1.45
100%PU ₆₄	7 421	16 326	991	300	15 035	1.77
80%PU ₆₄	7 462	16 416	793	300	15 323	2.32
100%CRU	7 537	16 581	1 543	—	15 039	1.30
80%CRU	7 621	16 766	1 234	—	15 532	1.78
40%CRU+40%PU	7 709	16 960	1 014	—	15 946	2.35

注:表内数据根据当时的市场价,小麦 2 200 元·t⁻¹,追肥劳动力 300 元·hm⁻²,普通尿素 1 900 元·t⁻¹,控释尿素 2 700 元·t⁻¹。

加冬小麦的有效分蘖,并通过增加成穗数、穗粒数来增加小麦的籽粒产量。同时栗丽等^[18]研究也表明,与单施尿素相比,控释尿素与普通尿素配施处理能显著增加冬小麦千粒重、穗粒数,产量提高 7.42%~13.12%。由此可以看出,在本研究结果中虽然减少了氮素投入,但配施处理(40%CRU+40%PU)获得了较高的产量构成,尤其是显著增加了穗粒数,从而获得了最高的产量,相比于单纯的施用树脂包膜控释尿素的处理(100%CRU、80%CRU)效果更优。

3.2 不同氮肥处理对冬小麦肥料利用率的影响

在冬小麦生育前期,一方面由于麦苗自身生物量有限,主动吸收的氮素相对较少;另一方面随着施氮量达到一定程度,氮吸收逐渐达到了饱和,多余的氮就残留在土壤当中,易导致土壤硝态氮^[19-23]和铵态氮的淋失^[24]。因此,普通尿素全部基施处理 100%PU₁₀₀ 一次性施用的尿素并未得到较好的利用,其氮肥吸收利用率、农学利用率和偏生产力都处于最低水平,分别为 19.08%、2.72 kg·kg⁻¹ 和 30.33 kg·kg⁻¹,说明“一炮轰”的施肥方式是对肥料的一种浪费。与此相比,其余各个处理在这 3 个方面都明显提高。在相同氮肥用量下,施用树脂包膜控释尿素处理的肥料利用率高于普通尿素处理。其中,80%CRU 比 80%PU₆₄ 氮肥利用率增加 23.83%,农学利用率增加 19.04%,偏生产力增加 26.40%;100%CRU 比 100%PU₆₄ 氮肥利用率增加 22.10%,农学利用率增加 14.80%,偏生产力增加 25.68%。

此外,在肥料利用率的 3 个指标中,40%CRU+40%PU 处于全部处理的最高水平,这可能是因为普通尿素的施用满足了冬小麦前期对氮素的需求,促进了花前地上部干物质的累积^[25],弥补了树脂包膜控释尿素氮素缓慢释放引起的苗期供肥不足;另外树脂包膜控释尿素,尤其是在大量需肥的抽穗期,弥补了普通尿素肥效不长的缺陷,有效地延缓或控制了肥料养分的释放,使肥料养分释放时间和强度与作物养分吸收规律相吻合^[26]。说明了树脂包膜控释尿素和普通尿素的配施是一种比较优化的施肥方式,在降低氮素总投入量的前提下,不仅实现了小麦的增产,还提高了肥料利用率,同时减少了施用普通尿素追肥的环节,节省了劳动力的投入^[27]。

3.3 不同氮肥处理对冬小麦经济效益的影响

对肥料运筹方式的探索,最终目的是为了增加产量,增加收入。本试验研究表明,40%CRU+40%PU 在获得最高产量的同时,用相对较低的成本,获得了最

大的经济效益。虽然 40%CRU+40%PU 和 80%PU₆₄ 有相近的产投比,但比 80%PU₆₄ 处理增加相对净收入 623 元·hm⁻²,并且省去了拔节期追肥的人力物力。因此,处理 40%CRU+40%PU“一次施肥,终生受用”,无疑是本试验中最佳的施肥处理。但是,是不是这个配比就一定能带来最好的收益,这其中的限制因素很多,可变的因素也很多,最适宜的配施比例还有待于进一步的研究发现。

4 结论

(1)树脂包膜控释尿素与普通尿素配施处理 40%CRU+40%PU 冬小麦产量最高,为 7 709 kg·hm⁻²,显著高于普通尿素处理 100%PU₁₀₀。40%CRU+40%PU 处理增产的原因在于其显著促进了冬小麦穗粒数的增加。

(2)树脂包膜控释尿素与普通尿素配施有助于促进冬小麦氮素吸收利用。相对于其他处理,40%CRU+40%PU 处理的氮肥吸收利用率、农学利用率和氮收获指数均达最高水平。

(3)树脂包膜控释尿素和普通尿素的配施处理(40%CRU+40%PU)拥有最高的经济效益和产投比,分别为 15 946 元·hm⁻² 和 2.35。虽 80%PU₆₄ 处理(15 323 元·hm⁻² 和 2.32)与其相似,但 80%PU₆₄ 处理还需要额外的劳动力和追肥措施。因此,在本试验条件下,确定 40%CRU+40%PU 为最适宜的氮肥处理。

参考文献:

- [1] 杜昌文,周健民. 控释肥料的研制及其进展[J]. 土壤,2002(3):127-133.
DU Chang-wen, ZHOU Jian-min. Development and progress of controlled release fertilizer [J]. *Soil*, 2002(3): 127-133. (in Chinese)
- [2] 刘光栋. 区域农业生产环境影响的价值评估方法及应用[D]. 北京:中国农业大学,2004.
LIU Guang-dong. Methods and applications to evaluate the environmental impacts of regional agriculture [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [3] 王鑫,刘建新,徐秋明,等. 包膜控释尿素对大棚黄瓜的增产与品质提高效应[J]. 土壤通报,2006,37(5):1037-1040.
WANG Xin, LIU Jian-xin, XU Qiu-ming, et al. Effects of a controlled release urea on yield and quality of cucumber in greenhouse [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 1037-1040. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 焦晓光, 罗盛国, 闻大中. 控释尿素施用对水稻吸氮量及产量的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 525-528.
- JIAO Xiao-guang, LUO Sheng-guo, WEN Da-zhong. Effect of controlled-release urea application on N uptake and rice yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 525-528. (in Chinese)
- [6] 龙锦林. 控释尿素对蔬菜生长和品质的影响及其肥效评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- LONG Jin-lin. Effect of controlled release urea on the growth and quality of vegetable and evaluation of fertilizer efficiency [D]. Taian: Shandong Agriculture University, 2003. (in Chinese)
- [7] 龙继锐, 马国辉, 周 静, 等. 中国缓/控释肥料的研发现状及展望[J]. 作物研究, 2006(5): 514-518.
- LONG Ji-rui, MA Guo-hui, ZHOU Jing, et al. Research and development status and prospect of Chinese slow / controlled release fertilizer [J]. *Crop Research*, 2006(5): 514-518. (in Chinese)
- [8] 卢艳丽, 白由路, 王 磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 209-215.
- LU Yan-li, BAI You-lu, WANG Lei, et al. Efficiency analysis of slow / controlled release fertilizer on wheat-maize in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 209-215. (in Chinese)
- [9] 王丽英, 张彦才, 王凯辉, 等. 包膜控释尿素对冬小麦产量和氮肥利用率的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(增刊): 197-200.
- WANG Li-ying, ZHANG Yan-cai, WANG Kai-hui, et al. Effect of the controlled release coated urea on the yield and nitrogen efficiency of winter wheat [J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2008, 23(Suppl): 197-200. (in Chinese)
- [10] 粟晓万, 杜建军, 贾振宇, 等. 缓/控释肥的研究应用现状[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 234-238.
- SU Xiao-wan, DU Jian-jun, JIA Zhen-yu, et al. Progress in the application of slow/controlled release fertilizers[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 234-238. (in Chinese)
- [11] 董 燕, 王正银. 缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6707-6714.
- DONG Yan, WANG Zheng-yin. Effects of slow /controlled release compound fertilizers on the form s of soil nitrogen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6707-6714. (in Chinese)
- [12] 李若楠, 王丽英, 张彦才, 等. 氮肥追施时期及包膜控释氮肥对冬小麦产量和氮素吸收的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 277-280.
- LI Ruo-nan, WANG Li-ying, ZHANG Yan-cai, et al. Effect of top-dressing time of nitrogen fertilizer and controlled-release coated urea on winter wheat yield and apparent nitrogen recovery rate [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 277-280. (in Chinese)
- [13] 党建友, 杨 峰, 屈会选, 等. 复合包裹控释肥对小麦生长发育及土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1365-1370.
- DANG Jian-you, YANG Feng, QU Hui-xuan, et al. Effect of combined coated control-released fertilizer on winter wheat growth and soil available nutrient[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1365-1370. (in Chinese)
- [14] 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 controlled release fertilizers on the biological properties of wheat and corn and soil nitrate accumulation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1): 128-133. (in Chinese)
- [15] 衣文平, 孙 哲, 武 良, 等. 包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 687-693.
- YI Wen-ping, SUN Zhe, WU Liang, et al. Effects of coated controlled release urea combined with conventional urea on winter wheat growth and soil NO_3^- -N[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 687-693. (in Chinese)
- [16] 郑建敏, 李 浦, 廖晓红, 等. 四川冬小麦产量构成因子初步分析 [J]. 作物杂志, 2012(1): 105-108.
- ZHENG Jian-min, LI Pu, LIAO Xiao-hong, et al. Preliminary study on yield component factors of Sichuan winter wheat [J]. *Crops*, 2012(1): 105-108. (in Chinese)
- [17] 王新民, 侯彦林, 介晓磊, 等. 冬小麦施用控释氮肥增产效应研究初报[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 98-101.
- WANG Xin-min, HOU Yan-lin, JIE Xiao-lei, et al. Effect of applying controlled release nitrogen fertilizer on yield enhancement of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2): 98-101. (in Chinese)
- [18] 栗 丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 控释肥料配施对冬小麦产量和氮肥利用的影响[J]. 山西农业大学学报, 2012, 32(6): 492-497.
- LI Li, HONG Jian-ping, WANG Hong-ting, et al. Effects of controlled release urea combined with conventional urea on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *J Shanxi Agric Univ*, 2012, 32(6): 492-497. (in Chinese)
- [19] 徐 钰, 刘兆辉, 江丽华, 等. 不同氮肥运筹对冬小麦氮肥利用率和土壤硝态氮含量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(10): 90-98.

- XU Yu, LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, et al. Effects of different nitrogen regulation on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):90-98. (in Chinese)
- [20] 邵 蕾, 张 民, 王丽霞. 不同控释肥类型及施肥方式对肥料利用率和氮素平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6):115-119. SHAO Lei, ZHANG Min, WANG Li-xia. Effects of different controlled-release fertilizers and different applying methods on fertilizer use efficiency and nitrogen balance [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6):115-119. (in Chinese)
- [21] 王弘菲, 高志岭, 陈新平, 等. 不同控释尿素与普通尿素配比对冬小麦茎蘖、产量、土壤硝态氮和氮素平衡的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(2):196-201. WANG Hong-fei, GAO Zhi-ling, CHEN Xin-ping, et al. Effects of the combined application of control-released urea and urea on tillers, yield, soil NO_3^- -N and nitrogen balance of winter wheat [J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2012, 27(2):196-201. (in Chinese)
- [22] 孙世友, 刘孟朝, 王 凌, 等. 不同施氮措施对冬小麦氮肥利用率和土壤硝态氮积累的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(增刊):191-195. SUN Shi-you, LIU Meng-chao, WANG Ling, et al. Effect of fertilizer application on winter wheat yield and nitrate-N accumulation in soil [J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2010, 25(Suppl):191-195. (in Chinese)
- [23] 魏凤珍, 李金才, 王成雨, 等. 氮肥运筹模式对冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1):123-128. WEI Feng-zhen, LI Jin-cai, WANG Cheng-yu, et al. Effects of nitrogen application model on nitrogen absorption and utilization in winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1):123-128. (in Chinese)
- [24] 熊淑萍, 姬兴杰, 李春明, 等. 不同肥料处理对土壤铵态氮时空变化影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):978-983. XIONG Shu-ping, JI Xing-jie, LI Chun-ming, et al. Effect of different fertilizer treatments on spatial-temporal variations of soil ammonium nitrogen [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):978-983. (in Chinese)
- [25] 马迎辉, 王玲敏, 黄玉芳, 等. 氮肥运筹对冬小麦干物质累积、产量及氮素吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(1):187-192. MA Ying-hui, WANG Ling-min, HUANG Yu-fang, et al. Effect of nitrogen application on dry matter accumulation, yield and nitrogen utilization efficiency of winter wheat[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2013, 28(1):187-192. (in Chinese)
- [26] 何绪生, 李素霞, 李旭辉, 等. 控效肥料的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2):97-106. HE Xu-sheng, LI Su-xia, LI Xu-hui, et al. The progress of studies on controlled availability fertilizers[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2):97-106. (in Chinese)
- [27] 汪 强, 李双凌, 韩燕来, 等. 缓/控释肥对小麦增产与提高氮肥利用率的效果研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4):693-696. WANG Qiang, LI Shuang-ling, HAN Yan-lai, et al. Slow /controlled release fertilizer effect on wheat yield and fertilizer-nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4):693-696. (in Chinese)