

# 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\*

衣文平<sup>1</sup> 孙哲<sup>2</sup> 武良<sup>1</sup> 史桂芳<sup>2</sup> 朱国梁<sup>2</sup> 李亚星<sup>1</sup> 谷佳林<sup>1</sup> 徐秋明<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup>北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; <sup>2</sup>泰安市农业科学研究院, 山东泰安 271000)

**摘要** 应用大田试验研究了不同用量的包膜控释尿素(PCU60, 释放期为 60 d) 与普通尿素(U) 配合基施(10% PCU60+90% U, PU<sub>1</sub>; 20% PCU60+80% U, PU<sub>2</sub>; 30% PCU60+70% U, PU<sub>3</sub>; 40% PCU60+60% U, PU<sub>4</sub>) 对冬小麦产量、氮肥利用率等生物学性状及土壤硝态氮累积的影响, 并对 PCU60 氮素田间溶出特征及 25 °C 静水溶出特征进行了比较分析. 结果表明: 在施氮量相等的条件下, 与习惯施肥处理相比, PU<sub>4</sub> 处理冬小麦各项指标均显著提高: 增产 5.6%、氮肥利用率提高 14.6%、氮素总累积量提高 7.2%、成熟期总茎数提高 2.6%、成熟期地上部总生物量提高 7.5%、经济效益增加 984.3 元·hm<sup>-2</sup>. 各处理 0~100 cm 土层硝态氮总累积量在 39.70~49.93 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中, PU<sub>4</sub> 处理总累积量最低, 为 39.70 kg·hm<sup>-2</sup>. 埋袋试验表明, 释放期为 60 d 的包膜控释尿素氮素释放规律与小麦氮素吸收特性基本吻合.

**关键词** 冬小麦 包膜控释尿素 生长发育 硝态氮

文章编号 1001-9332(2011)03-0687-07 中图分类号 S145.6, S512.1+1 文献标识码 A

**Effects of coated controlled release urea combined with conventional urea on winter wheat growth and soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N.** YI Wen-ping<sup>1</sup>, SUN Zhe<sup>2</sup>, WU Liang<sup>1</sup>, SHI Gui-fang<sup>2</sup>, ZHU Guo-liang<sup>2</sup>, LI Ya-xing<sup>1</sup>, GU Jia-lin<sup>1</sup>, XU Qiu-ming<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China*; <sup>2</sup>*Ta'an Academy of Agriculture Sciences, Tai'an 271000, Shandong, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(3): 687-693.

**Abstract:** Field experiments were conducted to study the effects of different dosages coated controlled release urea (PCU60, 60 d release duration) combined with conventional urea (U) used as basal on the winter wheat grain yield, nitrogen (N) recovery rate, and soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content, etc. Five treatments were installed, i. e., U (CK), 10% PCU60+90% U (PU<sub>1</sub>), 20% PCU60+80% U (PU<sub>2</sub>), 30% PCU60+70% U (PU<sub>3</sub>), and 40% PCU60+60% U (PU<sub>4</sub>). In the meantime, a comparative analysis was also carried out on the PCU60 N release characteristics under field condition and in 25 °C static water. At the same N dosage, all the test indices in treatment PU<sub>4</sub> were significantly higher, with the grain yield, N recovery rate, total N accumulation amount, total tiller number and aboveground biomass at ripening stage, and economic benefit increased by 5.6%, 14.6%, 7.2%, 2.6%, 7.5%, and 984.3 yuan·hm<sup>-2</sup>, respectively, compared with those in treatment U. The accumulation amount of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in 0-100 cm soil layer in all treatments ranged in 39.70-49.93 kg·hm<sup>-2</sup>, and was the lowest (39.70 kg·hm<sup>-2</sup>) in treatment PU<sub>4</sub>. The N release pattern of PCU60 under field condition better fitted the N absorption characteristics of winter wheat.

**Key words:** winter wheat; coated controlled release urea; growth and development; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N.

农业生产中氮肥利用率低而施用量越来越高导致环境污染问题日趋严重. 改变传统施肥方式, 提高

作物产量和氮肥利用率成为当务之急<sup>[1-3]</sup>. 控释肥料的出现为解决这一问题提供了可能, 因为控释肥料是传统化学肥料功能的延伸与改进, 具有养分释放与作物需求同步以及挥发、淋溶、固定少和减轻环境污染等优点<sup>[4]</sup>, 能够显著提高作物产量和氮肥利

\* 北京市科委项目(D0706004000091) 和国家科技支撑计划项目(2008BADA4B04) 资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: yingzkk@sina.com

2010-09-01 收稿, 2011-01-06 接受.

用率. 由于控释肥料的价格比普通肥料高 2.5 ~ 8 倍<sup>[5-6]</sup>, 世界上控释肥的用量仅占化肥用量的 0.15%<sup>[7]</sup>, 主要用于经济价值较高的花卉、蔬菜、水果和草坪等. 在九五、十五期间, 国内较早研发了溶剂型再生树脂包衣技术<sup>[8]</sup>, 所生产的包膜控释尿素价格是普通尿素的 1.5 ~ 1.6 倍, 为大田应用提供了物质基础<sup>[9]</sup>. 另外, 从应用效果来看, 单一的控释肥料很难满足不同作物各生育期的需肥要求, 所以应根据不同作物各生育期的需肥规律, 将不同养分释放速率的肥料配合施用, 才能有效调节养分供应速率<sup>[7]</sup>. 国内推出的适于大田作物施用的控释肥料实际上也是以尿素为控释氮源, 掺混普通化肥而成的控释 BB 肥<sup>[8]</sup>.

目前, 全量或减量施用包膜控释氮肥对冬小麦的增产效果及其环境效应已有报道<sup>[10-13]</sup>, 但肥料投入成本太高, 农民不易接受, 难以在生产上大面积推广应用. 现在市场上推广应用的控释 BB 肥, 控释氮素占总养分的 15% ~ 30%<sup>[8]</sup>, 成本相对较低, 农民易于接受, 但对其应用效果及环境效应尚缺乏系统研究. 为此, 本文依据冬小麦的吸氮动态<sup>[14]</sup>, 在大田生产中选择不同比例的包膜控释尿素与普通尿素配合基施, 综合分析了冬小麦产量、效益、氮肥利用率、土壤硝态氮累积及包膜控释尿素田间溶出特征, 为企业配方及冬小麦生产中应用包膜控释尿素提供理论依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

试验于 2008 年 10 月在山东省泰安市农业科学研究院试验基地进行. 供试的包膜控释尿素由北京首创新型肥料有限公司于 2008 年 2 月生产, 释放期为 60 d, 包膜控释尿素的包膜率是 8.3%, 含氮量是 42.2%. 供试作物为冬小麦泰山 23, 前茬作物为夏玉米. 供试土壤为轻壤土, 0 ~ 20 cm 土壤有机质 12.27 g · kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 82.40 mg · kg<sup>-1</sup>, 有效磷 29.40 mg · kg<sup>-1</sup>, 速效钾 111.70 mg · kg<sup>-1</sup>, pH 6.9.

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 小区面积 4.0 m × 6.0 m, 小麦种植畦宽 1.5 m, 每畦人工播种 6 行, 行距 0.25 m, 每个处理种 4 畦, 3 次重复. 设 6 个处理: 1) CK<sub>1</sub>, 不施氮肥; 2) CK<sub>2</sub>, 习惯施肥, 60% 普通尿素 (U) 基施, 40% U 拔节期追施; 3) PU<sub>1</sub>, 10% 释放期为 60 d 的包膜控释尿素 (PCU60) + 90% U; 4) PU<sub>2</sub>, 20% PCU60 + 80% U; 5) PU<sub>3</sub>, 30% PCU60 + 70% U;

表 1 各处理施肥方案

Table 1 Fertilizer application scheme in different treatments

处理 Treat- ment	施氮量 N application (kg · hm <sup>-2</sup> )		施磷量 P application (kg · hm <sup>-2</sup> )	施钾量 K application (kg · hm <sup>-2</sup> )
	基肥 Basal application	追肥 Dressing application		
	CK <sub>1</sub>	0	0	196.5
CK <sub>2</sub>	173.7	115.8	196.5	220.5
PU <sub>1</sub>	289.5	0	196.5	220.5
PU <sub>2</sub>	289.5	0	196.5	220.5
PU <sub>3</sub>	289.5	0	196.5	220.5
PU <sub>4</sub>	289.5	0	196.5	220.5

6) PU<sub>4</sub>, 40% PCU60 + 60% U. 具体施肥量见表 1. 包膜控释尿素埋袋处理: 称取包膜控释尿素各 5 g, 装入 1 mm 的塑料网袋中封口, 定位埋在保护行土壤中, 深度 10 ~ 20 cm, 插牌标示, 共 21 袋, 每个生育时期取 3 袋.

供试冬小麦于 2008 年 10 月 12 日播种, 基本苗 150 万株 · hm<sup>-2</sup>. 各处理施纯氮 289.5 kg · hm<sup>-2</sup> (CK<sub>1</sub> 不施氮肥), 纯磷 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 196.5 kg · hm<sup>-2</sup>, 纯钾 (K<sub>2</sub>O) 220.5 kg · hm<sup>-2</sup>. 磷、钾肥在播种前作基肥一次施入. 除氮肥外, 冬前和返青期各漫灌浇水 1 次, 生育期内按冬小麦高产栽培技术规程进行管理.

### 1.3 样品采集及测定方法

在生育期内于三叶、封冻前、返青、拔节、扬花、灌浆和成熟期取植株样品, 采用开氏法测定全氮; 采用蒸馏法测定包膜控释尿素在 25 °C 静水中和埋在田间的氮素溶出率. 包膜控释尿素氮素养分累积溶出率一般可用一级动力学反应方程  $N_t = N_0 [1 - \exp(-kt)]$ <sup>[15]</sup> 来进行描述, 其中,  $N_0$  为溶质最大溶出率, 此处,  $N_0 = 100%$ , 由于包膜控释肥料中养分是可以 100% 释放的, 但实际测定时未能测到 100%, 因此, 氮素养分累积溶出率一级动力学反应方程可表示为:  $N_t = 100 [1 - \exp(-kt)]$ . 式中:  $k$  为氮素溶出速率常数;  $t$  为时间 (d).

每小区在取样区用土钻取 3 钻, 取后立即放入封口袋中, 取样深度为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm, 共 5 层, 不同层次的土壤样品共计 270 个. 土壤硝态氮含量采用连续流动分析仪 (TRAAS-2000/CFA, 德国) 测定<sup>[16]</sup>. 在收获前的 1 ~ 2 d 每个处理调查 3 个点 (共 1.5 m<sup>2</sup>) 测定冬小麦穗数. 在成熟期, 取未采样的两畦收获计产; 并随机选取 30 穗植株进行室内考种, 测定穗粒数和千粒重等. 氮肥利用率采用差值法计算, 其公式为: 氮肥

利用率=(施氮区吸氮量-无氮区吸氮量)/施肥量 $\times$ 100%<sup>[17]</sup>;土壤氮的依存率指土壤氮对作物营养氮的贡献率,其计算公式为:土壤氮依存率=无氮区吸氮量/施氮区吸氮量 $\times$ 100%<sup>[18]</sup>.

#### 1.4 数据处理

数据统计分析应用 SPSS 17.0 软件进行. 采用 LSD 方法进行差异显著性检验.

## 2 结果与分析

### 2.1 包膜控释尿素与普通尿素配合基施对冬小麦氮素积累量、氮肥利用率和土壤氮依存率的影响

施用氮肥后冬小麦氮素总积累量显著增加. 在施氮量相等的情况下,与 CK<sub>2</sub> 相比,包膜控释尿素与普通尿素配合基施处理氮素总积累量、籽粒氮素积累量表现为:PU<sub>1</sub> 显著减少;PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 显著增加. 各处理氮素总积累量、籽粒氮素积累量随着包膜控释尿素用量的增加而增加. PU<sub>1</sub>、PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 处理间籽粒氮素积累量差异显著,其中 PU<sub>1</sub> 最低,PU<sub>4</sub> 最高. 从营养器官氮素积累量来看,PU<sub>2</sub> 最高,为 61.5 kg $\cdot$ hm<sup>-2</sup>,显著高于包膜控释尿素其他各处理,但与 CK<sub>2</sub> 处理无显著性差异. 说明在同一施肥水平下,随着包膜控释尿素用量的增加,成熟期籽粒中的氮素分配量增加,而营养器官中的氮素残留量

降低,氮素向籽粒中的分配量增加.

与 CK<sub>2</sub> 相比,PU<sub>1</sub> 的氮肥利用率显著降低 6.5%,而 PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 分别显著增加 3.3%、4.8% 和 8.1%;PU<sub>1</sub> 的土壤氮依存率显著提高 6.5%,而 PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 分别显著降低 3.3%、4.8% 和 8.1% (表 2). 各处理随着包膜控释尿素用量的增加,氮肥利用率逐渐增加,而土壤氮依存率逐渐降低.

### 2.2 包膜控释尿素与普通尿素配合基施对冬小麦不同生育时期总茎数的影响

从表 3 可以看出,总体上,随着包膜控释尿素用量的增加,冬小麦返青起身-收获期总茎数呈逐渐增加趋势. 冬前,PU<sub>1</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 与 CK<sub>2</sub> 间无显著差异;返青起身期:PU<sub>1</sub>、PU<sub>2</sub> 与 CK<sub>2</sub> 间无显著差异,PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 比 CK<sub>2</sub> 显著增加,PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 比 PU<sub>1</sub>、PU<sub>2</sub> 显著增加;拔节期,PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 间无显著差异,三者分别比 PU<sub>1</sub>、CK<sub>2</sub> 显著增加,PU<sub>1</sub> 与 CK<sub>2</sub> 间无显著差异;扬花期,PU<sub>1</sub> 比 CK<sub>2</sub> 显著减少,PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 与 CK<sub>2</sub> 无显著差异,PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 比 PU<sub>1</sub> 显著增加,PU<sub>4</sub> 比 PU<sub>2</sub> 显著增加;灌浆期,PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub>、CK<sub>2</sub> 间无显著差异,但均显著高于 PU<sub>1</sub>;收获期,PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、CK<sub>2</sub> 间无显著差异,但均显著高于 PU<sub>1</sub>,显著低于 PU<sub>4</sub>.

表 2 不同处理冬小麦成熟期氮素积累量、氮肥利用率及土壤氮依存率

Table 2 N accumulation, recovery rate and soil dependent rate of different treatments at maturity stage

处理 Treat- ment	氮素总积累量 Total N accumulation (kg $\cdot$ hm <sup>-2</sup> )	籽粒氮素积累量 N accumulation in kernel		营养器官氮素积累量 N accumulation in vegetative organs		氮肥利用率 N recovery rate (%)	土壤氮依存率 Soil N dependent rate (%)
		积累量 Accumulation (kg $\cdot$ hm <sup>-2</sup> )	占总氮的百分比 Percentage to total N	积累量 Accumulation (kg $\cdot$ hm <sup>-2</sup> )	占总氮的百分比 Percentage to total N		
CK <sub>1</sub>	216.5e	178.7f	82.5	37.8e	17.5	-	-
CK <sub>2</sub>	323.4c	264.6d	77.0	58.8ab	23.0	36.9c	63.1c
PU <sub>1</sub>	304.4d	253.1e	77.1	51.4d	22.9	30.4d	69.6d
PU <sub>2</sub>	332.9b	271.4c	76.6	61.5a	23.4	40.2b	59.8b
PU <sub>3</sub>	337.4b	279.8b	78.0	57.6bc	22.0	41.7b	58.3b
PU <sub>4</sub>	346.7a	292.2a	79.0	54.5c	21.0	45.0a	55.0a

同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3 不同处理冬小麦在不同生育时期的总茎数

Table 3 Total tillers of winter wheat at different growing stages under different treatments ( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )

处理 Treatment	冬前期 Before winter stage	返青起身期 Reviving stage	拔节期 Booting stage	扬花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	收获期 Ripening stage
CK <sub>1</sub>	581.5c	921.0c	912.0c	509.0d	480.0c	467.5d
CK <sub>2</sub>	803.5a	1454.0b	1359.5b	632.0ab	612.5a	584.0b
PU <sub>1</sub>	800.0a	1443.5b	1352.0b	583.5c	558.0b	545.0c
PU <sub>2</sub>	789.5b	1466.5b	1407.5a	622.5b	596.0a	582.0b
PU <sub>3</sub>	814.5a	1501.0a	1428.0a	630.5ab	603.5a	588.5b
PU <sub>4</sub>	809.5a	1520.5a	1438.0a	643.5a	611.5a	599.0a

### 2.3 包膜控释尿素与普通尿素配合基施对冬小麦不同生育时期地上部总生物量的影响

由表4可以看出,总体上,随着包膜控释尿素用量的增加,地上部总生物量呈逐渐增加趋势.与CK<sub>2</sub>相比,PU<sub>1</sub>地上部总生物量在三叶-扬花期较高,但无显著差异,灌浆期-收获期显著降低;PU<sub>2</sub>地上部总生物量在封冻前较高,但无显著差异,返青起身-拔节期显著提高,扬花-收获期无显著差异;PU<sub>3</sub>地上部总生物量在封冻-拔节期显著提高,扬花-灌浆期较高,但无显著差异,收获期显著提高;PU<sub>4</sub>地上部总生物量在封冻-拔节期显著提高,扬花-灌浆期无显著差异,收获期显著提高.

从表3、表4可以看出,PU<sub>4</sub>处理收获期穗数为 $599 \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,地上部总生物量为 $17746 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,显著高于其他各处理;而PU<sub>1</sub>处理收获期穗数为 $545 \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,地上部总生物量为 $15838 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,显著低于其他各施肥处理.可见,基施氮肥过多容易造成冬小麦早春旺长,消耗过多的养分,不利于生长后期的分蘖成穗<sup>[19]</sup>.因此,通过合理施肥培肥地力,提高冬小麦单位面积有效穗数是提高其产量的有效措施之一.

### 2.4 包膜控释尿素与普通尿素配合基施对冬小麦产量及产量构成因子的影响

由表5可以看出,各处理的冬小麦产量表现为:

表4 不同处理冬小麦在不同生育时期地上部总生物量

Table 4 Aboveground biomass of winter wheat at different growing stages under different treatments ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

处理 Treatment	三叶期 Trefoil stage	冬前期 Before winter stage	起身期 Reviving stage	拔节期 Booting stage	扬花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	收获期 Ripening stage
CK <sub>1</sub>	510b	630d	750c	2940d	5104c	7859c	11111e
CK <sub>2</sub>	570ab	795c	945b	3390c	7369ab	13040a	16509c
PU <sub>1</sub>	615a	885bc	945b	3450c	7172b	11345b	15838d
PU <sub>2</sub>	610ab	900bc	1170a	3765b	7222ab	12885a	16798bc
PU <sub>3</sub>	630a	930b	1155a	3900ab	7565a	12911a	17262ab
PU <sub>4</sub>	660a	1080a	1125a	3955a	7539a	12860a	17746a

表5 不同处理对冬小麦产量及其构成因子的影响

Table 5 Effects of different treatments on yield and yield components of winter wheat

处理 Treatment	穗数 Number of ears ( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 Number of grains per ear	千粒重 Mass per 1000 grains (g)	平均产量 Average yield ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	增产率 Increased rate (%)	
					比CK <sub>1</sub> 增产率 Increased yield to CK <sub>1</sub>	比CK <sub>2</sub> 增产率 Increased yield to CK <sub>2</sub>
CK <sub>1</sub>	467.5d	30.9e	49.8d	6716.7d	0	-
CK <sub>2</sub>	584.0b	35.9bc	52.5c	8285.2b	23.4	0
PU <sub>1</sub>	545.0c	34.6d	54.1a	7385.2c	10.0	-10.9
PU <sub>2</sub>	582.0b	35.0cd	53.5ab	8396.3ab	25.0	1.3
PU <sub>3</sub>	588.5b	36.5ab	52.8bc	8618.5ab	28.3	4.0
PU <sub>4</sub>	599.0a	37.2a	53.0bc	8748.1a	30.2	5.6

PU<sub>4</sub>>PU<sub>3</sub>>PU<sub>2</sub>>CK<sub>2</sub>>PU<sub>1</sub>>CK<sub>1</sub>. PU<sub>4</sub>处理每公顷穗数599万,显著高于其他处理;各包膜控释尿素处理穗粒重随着其用量的增加而增加;各包膜控释尿素处理千粒重均高于CK<sub>2</sub>处理,其中以PU<sub>1</sub>处理最高,为54.1g.可见,PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub>处理每公顷穗数和穗粒数的增加保证了其产量的增加,其中PU<sub>4</sub>处理的冬小麦产量( $8748.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )显著高于CK<sub>2</sub>处理.

### 2.5 包膜控释尿素氮素溶出特征

实验室静水25℃溶出法和田间埋袋法的方程拟合度 $r^2$ 分别为0.995和0.977(图1).实验室静水溶出法测定的包膜控释尿素初期养分溶出率为

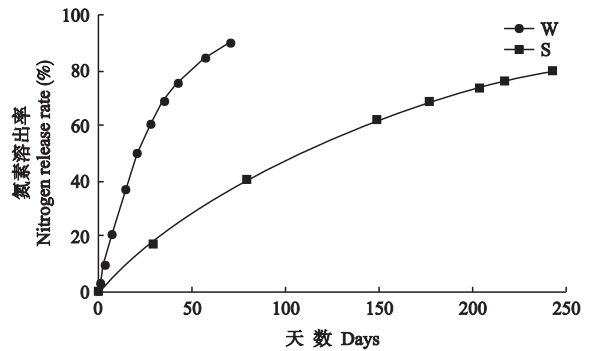


图1 包膜控释尿素氮素累积溶出率的一级动力学方程曲线

Fig. 1 The first-order kinetic equation curves of accumulated nitrogen release rate from controlled release coated urea.

S: 大田 Field; W: 静水 State water.



表 6 不同处理冬小麦的经济效益

Table 6 Economic benefits of winter wheat under different treatments

处理 Treat- ment	产量 Yield (kg · hm <sup>-2</sup> )	产值 Yield value (yuan · hm <sup>-2</sup> )	氮肥用量 N application (kg · hm <sup>-2</sup> )		氮肥成本 Cost of N fertilizer (yuan · hm <sup>-2</sup> )	追肥劳动力投入 Labor input (yuan · hm <sup>-2</sup> )	净收入 Net income (yuan · hm <sup>-2</sup> )
			普通尿素 Urea	包膜控释尿素 Controlled-release urea			
CK <sub>1</sub>	6051.9	10288.2	0	0	0	0	10288.2
CK <sub>2</sub>	8285.2	14084.8	629.4	0	1258.7	300	12226.1
PU <sub>1</sub>	7385.2	12554.8	566.4	68.7	1359.4	0	11195.5
PU <sub>2</sub>	8396.3	14273.7	503.5	137.3	1460.0	0	12813.7
PU <sub>3</sub>	8618.5	14651.5	440.6	205.9	1560.7	0	13090.8
PU <sub>4</sub>	8748.1	14871.8	377.6	274.6	1661.4	0	13210.4

表内尿素价格以 2008 年 10 月的市场价格计算,冬小麦价格以 2009 年 7 月的市场价格计算,普通尿素 2000 元 · t<sup>-1</sup>,60 d 释放期的包膜尿素 3500 元 · t<sup>-1</sup>,追肥劳动力投入 300 元 · hm<sup>-2</sup>,冬小麦 1700 元 · t<sup>-1</sup> Data in the table were calculated basing on average market price with conventional urea 2000 yuan · t<sup>-1</sup>, release duration of 60 days controlled-release urea 3500 yuan · t<sup>-1</sup>, labor input 300 yuan · hm<sup>-2</sup>, winter wheat 1700 yuan · t<sup>-1</sup>.

3.3%,28 d 为 60.4%,48.6 d 为 80.0%;田间埋袋法测定的包膜控释尿素初期养分溶出率为 1.6%,28 d 为 16.1%,243.2 d 为 80.0%。表明包膜控释尿素在田间 243 d 氮素累积溶出了 80%,释放期远大于实验室测定的 48.6 d。其中,播种-三叶期(30 d)氮素累积溶出 17.4%;三叶期-封冻前(50 d),氮素累积溶出 23.2%;封冻前-返青期(70 d),氮素累积溶出 21.7%;返青期-拔节期(29 d),氮素累积溶出 6.6%;拔节期-扬花期(26 d),氮素累积溶出 4.9%;扬花期-灌浆期(14 d),氮素累积溶出 2.3%;灌浆期-收获期(25 d),氮素累积溶出 3.7%。

## 2.6 不同处理冬小麦的经济效益

从表 6 可以看出,与 CK<sub>2</sub> 相比,PU<sub>1</sub>、PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub> 和 PU<sub>4</sub> 氮肥成本分别提高 100.7、201.3、302.0 和 402.7 元 · hm<sup>-2</sup>;净收入 PU<sub>1</sub> 减少 1030.7 元 · hm<sup>-2</sup>,PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub> 和 PU<sub>4</sub> 分别增加 587.5、864.6 和 984.2 元 · hm<sup>-2</sup>。其中,PU<sub>1</sub> 净收入远低于 CK<sub>2</sub>,PU<sub>4</sub> 经济效益最高,且随包膜控释尿素用量的增加,氮肥投入成本依次增加,经济效益也依次提高。控释肥料的价格一般比普通肥料高 2.5~8 倍<sup>[5-6]</sup>,即使用再生塑料的包膜控释尿素,每吨价格也比普通尿素高 1000~1500 元,冬小麦全量或减量施用包膜控释尿素成本太高,效果不理想<sup>[10,13]</sup>,而包膜控释尿素与普通尿素配合基施既能满足冬小麦对氮素的需求,又能减少用工、提高产量,经济效益因产量提高和劳动力投入减少而明显增加。

## 2.7 包膜控释尿素与普通尿素配合基施对不同土层土壤硝态氮含量的影响

从表 7 和图 2 可以看出,每个土层各施肥处理硝态氮累积量和含量都比 CK<sub>1</sub> 显著增加,比 CK<sub>2</sub> 显

著降低;在 0~100 cm 土层,各处理硝态氮累积量比 CK<sub>1</sub> 显著增加,且随包膜控释尿素用量的增加依次递减。在 40~80 cm 土层,CK<sub>2</sub>、PU<sub>1</sub>、PU<sub>2</sub>、PU<sub>3</sub>、PU<sub>4</sub> 的硝态氮有一积累峰值,分别为 26.95、24.62、23.80、22.43 和 22.54 kg · hm<sup>-2</sup>,分别占 0~100 cm 土层中硝态氮总积累量的 54.0%、57.3%、55.8%、54.7% 和 56.8%。

表 7 不同土壤深度硝态氮累积量

Table 7 Accumulation amount of nitrate N at different soil depths (kg · hm<sup>-2</sup>)

处理 Treat- ment	土层深度 Soil depth (cm)					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	0~100
CK <sub>1</sub>	4.4f	4.1d	6.9e	4.1e	2.3cd	21.7e
CK <sub>2</sub>	9.2a	9.9a	14.8a	12.1b	3.9a	49.9a
PU <sub>1</sub>	7.3d	8.5b	12.0c	12.6a	2.5c	43.0b
PU <sub>2</sub>	8.2b	7.5c	14.3b	9.6d	3.2b	42.6b
PU <sub>3</sub>	7.1e	8.2b	10.6d	11.8b	3.4b	41.0c
PU <sub>4</sub>	7.5c	7.6c	11.7c	10.9c	2.0d	39.7d

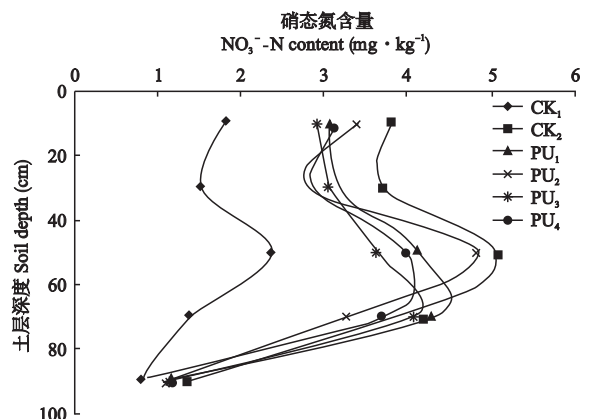


图 2 各处理 0~100 cm 土层土壤硝态氮分布

Fig. 2 Distribution of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in 0-100 cm soil layers under different treatments.

### 3 讨 论

关于包膜控释尿素控释性能的评价,已有较多报道<sup>[20-24]</sup>.近年来,一些学者<sup>[22-24]</sup>对控释肥料的养分释放速率进行了系统研究,并建立了一些养分释放速率模型. Cabrera<sup>[23]</sup>认为,所测定的控释肥料在水中的养分释放速率与一级动力学方程吻合性很好,相关系数达极显著水平.

包膜控释尿素养分释放主要受温度和水分的影响,但在土壤含水量高于田间持水量 40% 时,养分释放仅受温度的影响<sup>[21-22]</sup>.本试验中,冬小麦整个生育期内,天然降雨总量为 195.2 mm,且冬前和返青期各漫灌浇水一次,雨水和灌水总量能够满足冬小麦对水分的需求,因此,土壤水分条件不是影响包膜控释尿素养分释放的主要因素.另外,据 2008-2009 年泰安市气象资料,冬小麦生长期间日平均气温 8.5 ℃,远低于实验室恒温 25 ℃,田间埋袋法测定的包膜控释尿素养分溶出速率与 25 ℃ 静水溶出法测定结果相比,前者显著低于后者,说明温度是影响本试验包膜控释尿素养分释放的主要因素.土壤低温条件下,包膜控释尿素养分释放速率显著下降,这与 Cabrera<sup>[23]</sup>的研究结果一致.

本试验从产量、包膜控释尿素养分溶出特征、经济效益等方面综合分析了 10% ~ 40% 用量的包膜控释尿素(释放期 60 d)与普通尿素配合基施在冬小麦上的应用效果,结果表明,随着包膜控释尿素用量的增加,包膜控释尿素处理产量和经济效益均增加,但没有对 40% 以上的包膜控释尿素与普通尿素配比对冬小麦产量和经济效益的影响进行研究.杨雯玉等<sup>[24]</sup>研究了 50% 包膜控释氮素与 50% 普通尿素配合基施对冬小麦的影响,结果表明,与普通习惯施肥相比,冬小麦产量显著增加,经济效益提高 566.4 元·hm<sup>-2</sup>.本试验中,包膜控释尿素在总氮量 40% 的条件下,经济效益就提高 984.3 元·hm<sup>-2</sup>.孙克刚等<sup>[13]</sup>研究了 70%、50%、30% 控释氮素分别与 30%、50%、70% 普通氮素配合基施对冬小麦的影响,结果表明,与 100% 普通尿素相比,冬小麦产量显著增加,但没有进行经济效益评价.因此,从目前研究结果来看,冬小麦氮素最佳配施比例还很难确定,还需对占总氮量 40% 以上的包膜控释氮素的经济效益进行评价.

#### 参考文献

[1] Zhu Z-L (朱兆良), Wen Q-X (文启孝). Soil Nitro-

gen in China. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992 (in Chinese)

- [2] Cui Z-L (崔振岭), Shi L-W (石立委), Xu J-F (徐久飞), et al. Effects of N fertilization on winter wheat grain yield and its crude protein content and apparent N losses. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2071-2075 (in Chinese)
- [3] Zhang W-L (张维理), Tian Z-X (田哲旭), Zhang N (张宁), et al. Investigation on NO<sub>3</sub><sup>-</sup> polluting ground water of nitrogen fertilizer in farmland of north China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 1995, **1**(2): 80-87 (in Chinese)
- [4] Fan X-L (樊小林), Liao Z-W (廖宗文). Increase fertilizer use efficiently by means of controlled-release fertilizer production according to theory and techniques of balance fertilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 1998, **4**(3): 219-223 (in Chinese)
- [5] Shoji S, Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions. *Fertilizer Research*, 1994, **39**: 147-152
- [6] Shaviv A, Mikkelsen RL. Slow release fertilizers for a safer environment maintaining high agronomic use efficiency. *Fertilizer Research*, 1993, **35**: 1-12
- [7] Zhai J-H (翟军海), Gao Y-J (高亚军), Zhou J-B (周建斌). The review of controlled/slow release fertilizer. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2002, **20**(1): 45-48 (in Chinese)
- [8] Fan X-L (樊小林), Liu F (刘芳), Liao Z-Y (廖照源), et al. The status and outlook for the study of controlled-release fertilizers in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(2): 463-473 (in Chinese)
- [9] Yi W-P (衣文平), Zhu G-L (朱国梁), Wu L (武良), et al. Applications of different release duration controlled-release coated urea combined with conventional urea on summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(6): 1497-1502 (in Chinese)
- [10] Zhang S-X (张淑香), Zhao L-P (赵林萍), Yagi K, et al. Biological and environmental effect of coated urea on maize and wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(6): 1086-1091 (in Chinese)
- [11] Wang Q (汪强), Li S-L (李双凌), Han Y-L (韩燕来), et al. Slow/controlled release fertilizer effect on wheat yield and fertilizer-nitrogen use efficiency. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2007, **38**(1): 47-50 (in Chinese)

- [12] Yu S-F (于淑芳), Yang L (杨力), Zhang M (张民), *et al.* Effect of controlled release fertilizers on the biological properties of wheat and corn and soil nitrate accumulation. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2010, **29**(1): 128–133 (in Chinese)
- [13] Sun K-G (孙克刚), He A-L (和爱玲), Li B-Q (李丙奇), *et al.* Effect of different blend ratios of controlled released urea and conventional urea on wheat yield and fertilizer-nitrogen use efficiency. *Journal of Henan Agricultural University* (河南农业大学学报), 2008, **42**(5): 550–552 (in Chinese)
- [14] Wang S-A (王树安). *Crop Cultivation in Northern China*. Beijing: China Agriculture Press, 1995 (in Chinese)
- [15] Wang Z-Y (王正银), Xu W-H (徐卫红), Zhang H (张浩). Study on kinetics of nitrogen release in some urea-based slow release compound fertilizer. *Phosphate & Compound Fertilizer* (磷肥与复肥), 2002, **17**(2): 13–18 (in Chinese)
- [16] Kimball BA, Morris CF, Jr Pinter PJ, *et al.* Wheat grain quality as affected by elevated CO<sub>2</sub>, drought, and soil nitrogen. *New Phytologist*, 2001, **150**: 295–303
- [17] Jie X-L (介晓磊), Han Y-L (韩燕来), Tan J-F (谭金芳), *et al.* Studies on use efficiency of N fertilizer in wheat field with different fertilities and soil textures. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1998, **24**(6): 884–888 (in Chinese)
- [18] Li Y (李云). Soil science and continuous agricultural development// Editorial Board of Chinese Soil Institute, ed. *Chinese Science and Continuous Agricultural Development*. Beijing: China Science and Technology Press, 1994: 219–223 (in Chinese)
- [19] Cui Z-L (崔振岭), Chen X-P (陈新平), Zhang F-S (张福锁), *et al.* Analysis on fertilizer applied and the central factors influencing grain yield of wheat in the Northern China Plain. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2008, **23**(suppl.): 2004–2009 (in Chinese)
- [20] Pang H-X (庞红喜), Song Z-M (宋哲民), Qu Y-M (屈益民). An analysis of the yield and yield components in some big spike wheat varieties. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis* (西北农业大学学报), 1997, **25**(4): 28–32 (in Chinese)
- [21] Shoji S. *Meister-Controlled Release Fertilizers*. Sendai, Japan: Konno Printing Co. Ltd, 1999
- [22] Fujisawa E, Kobayashi A, Hanyu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods. 5. Effect of soil moisture level on release rates from resin-coated fertilizer. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1998, **69**: 582–589
- [23] Cabrera RI. Comparative evaluation of nitrogen release patterns from controlled release fertilizers by nitrogen leaching analysis. *HortScience*, 1997, **32**: 669–673
- [24] Yang W-Y (杨雯玉), He M-R (贺明荣), Wang Y-J (王远军), *et al.* Effect of controlled-release urea combined application with urea on nitrogen utilization efficiency of winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(5): 627–633 (in Chinese)

---

作者简介 衣文平,男,1963年生,硕士,副研究员.主要从事缓控释肥料的应用与开发研究. E-mail: ywenping639@yahoo.com.cn

责任编辑 张凤丽

---