

# 天然木粉在包裹控释尿素上的应用

王恩飞<sup>1,2</sup>, 莫海涛<sup>1,2</sup>, 崔智多<sup>1,2</sup>, 张小勇<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 为探究木质纤维素类有机物在缓/控释肥上的应用效果, 采用静水浸泡法, 研究了 3 种天然木粉包裹控释尿素 (CRU<sub>20</sub>、CRU<sub>25</sub>、CRU<sub>30</sub>) 在常温条件下的养分释放规律, 以及不同温度、pH 值和水肥比对控释尿素养分释放规律的影响。结果表明: 1) 包裹控释尿素的缓释期随着包裹量的增大而变长, CRU<sub>20</sub>、CRU<sub>25</sub>、CRU<sub>30</sub> 的理论缓释期分别为 36、54、121 d, 不同的包裹量表现出不同的释放曲线模式。2) 氮素释放速率受温度和 pH 值的影响较大, 不同水肥比的差异不明显。3) 包裹控释尿素释放机理为“崩溃”机制。天然木粉包裹控释尿素具有很好的推广应用价值。

**关键词:** 肥料, 尿素, 应用, 木粉, 水浸泡法, 释放机理

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.12.042

中图分类号: S145.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-12-0264-05

王恩飞, 莫海涛, 张小勇, 等. 天然木粉在包裹控释尿素上的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 264-268.

Wang Enfei, Mo Haitao, Zhang Xiaoyong, et al. Application of natural wood flour on controlled-release urea[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 264-268. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

化肥是农业重要的生产资料, 但肥料利用率低。大量营养元素流失, 不仅是巨大的能源浪费和经济损失, 而且造成湖泊富营养化、水源硝态氮污染、土壤板结等环境问题<sup>[1-2]</sup>。缓/控释肥利用各种调控机制使养分释放与作物的养分吸收规律相匹配, 能够减少肥料的损失, 显著提高肥料的利用率, 增加作物产量, 符合低碳经济时代要求, 是当今化肥研究的热点<sup>[3-5]</sup>。

包膜缓/控释肥从材料上大致可以分为无机材料、人工合成有机材料和天然有机材料。无机包膜材料如硫磺、硅藻土、磷酸盐等, 这些无机材料成本低, 对环境和土壤无污染, 缺点是控释效果不佳。人工合成有机材料, 如聚烯烃类、聚氨酯类和树脂类材料。这类包膜肥料是控释肥的主流产品, 养分释放期长, 控释效果好, 技术工艺比较成熟。同时这类肥料存在一些缺点, 主要是包膜时需要使用有毒的芳香烃类溶剂, 对设备要求高、耗能大, 产品成本高, 并且包膜材料难降解, 会对环境和土壤造成二次污染。因此这类肥料主要用在高附加值如草坪、花卉和林地上, 欧洲和美国严禁在耕地上使用。天

然有机材料有淀粉、腐植酸、壳聚糖、木质素、松香等。天然有机料来源广, 能够被生物降解利用, 环境友好。天然材料在缓/控释肥中的应用是包膜材料发展的趋势之一<sup>[6-9]</sup>。

目前包膜控/缓释肥料生产工艺复杂, 价格是普通肥的 3~8 倍、有些包膜材料存在对环境不友好等方面的不足, 难以在大田作物上广泛应用。为此, 寻找有效、廉价的天然材料是研制缓/控释肥料的关键之一<sup>[10-13]</sup>。

本研究以环境友好的天然木粉为主要包裹材料, 使用黏合剂和封闭剂制得廉价的包裹控释尿素, 研究其在水中的缓释性能和影响因素, 分析了释放机制, 以期为天然有机物料在新型包膜肥料的研制提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 包裹控释尿素的制备

包裹肥料的核心颗粒是大颗粒尿素 (2~4 mm), 以天然杨木木粉 ( $\leq 0.025$  mm) 作为包裹材料, 聚丙烯酰胺作为黏结剂, 石蜡作为封闭剂, 采用流化床工艺进行包裹。木粉由杨木木料粉碎后过 60 目标准筛得到, 包裹层的质量分数用量设置 3 个梯度 20%、25%、30%, 制得 3 种包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub>、CRU<sub>25</sub>、CRU<sub>30</sub>, 用 10 目和 4 目标准筛得到 2.00~4.75 mm 的成品。

### 1.2 包裹控释尿素养分释放规律的试验设计

#### 1.2.1 不同包裹控释尿素养分释放速率的测定

称取包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub>、CRU<sub>25</sub>、CRU<sub>30</sub> 10.00 g (精确至 0.01 g) 各 3 份, 放入 100 目的网袋中, 置于 250 mL 塑料瓶中, 加 200 mL 蒸馏水, 加盖密闭, 在 25℃ 恒温箱中静置浸泡。取样时间为 1、3、5、7、9、11、14、21、28、35 d。取样时, 将瓶中溶液摇匀, 转入 250 mL 容量瓶中冷却定容, 用于氮素的测定。然后再向塑料瓶中重新加入 200 mL 蒸馏水, 加盖密封后放入恒温箱继续浸泡, 直至养分累积溶出率达到 80% 以上。

收稿日期: 2011-12-19 修订日期: 2012-04-27

基金项目: 农业科技成果转化项目资金“木质素包裹型缓释肥料生产技术中试与示范”(2011GB24910009); 国家科技支撑计划项目资金“5 万吨/年麦草碱法漂白化学浆制浆过程污染减排集成技术及示范”(2011BAC11B01); 湖北省中国科学院科技合作项目“木质素包裹型缓释肥料生产技术工程研究和产业化示范”

作者简介: 王恩飞 (1987-), 男, 山东东明人, 研究方向为新型肥料的研制。北京 中国科学院过程工程研究所, 100190。

Email: efwang@home.ipe.ac.cn

\*通信作者: 张小勇 (1962-), 男, 河北燕郊人, 研究员, 博士, 研究方向为农业生化工程。北京 中国科学院过程工程研究所, 100190。

Tel: 010-62568173. Email: xyzhang@home.ipe.ac.cn

1.2.2 不同温度条件下 CRU<sub>20</sub> 养分释放速率的测定

称取 CRU<sub>20</sub> 包裹控释尿素 10.00 g (精确至 0.01 g) 9 份, 放入 100 目的尼龙网袋中, 再分别放入盛有 200 mL 蒸馏水的塑料瓶中, 加盖后将肥料置于不同温度的恒温箱中培养, 15、25、35℃ 各 3 份, 其他步骤同 1.2.1。

1.2.3 不同 pH 值对 CRU<sub>20</sub> 养分溶出率的影响

称取 CRU<sub>20</sub> 包裹控释尿素 10.00 g (精确至 0.01 g) 12 份, 各放入 100 目的尼龙网袋中, 置于 250 mL 塑料瓶中, 加入 200 mL 的 pH 值 5、7、8 的 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>-Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 的缓冲液, 以及蒸馏水 (pH 值 7), 每个处理设置 3 个重复, 于在 25℃ 恒温箱中静置浸泡, 其他步骤同 1.2.1。

1.2.4 不同肥水比对 CRU<sub>20</sub> 养分溶出率的影响

按照水肥比 10:1、20:1、40:1 分别称取 CRU<sub>20</sub> 包裹控释尿素 20.00、10.00、5.00 g (精确至 0.01 g) 各 3 份, 放入 100 目的尼龙网袋中, 置于 250 mL 塑料瓶中, 加入 200 mL 的蒸馏水, 在 25℃ 恒温箱中静置浸泡, 其他步骤同 1.2.1。

本文中用到的主要公式

$$\text{初期养分释放率}(\%) = \frac{\text{初期养分溶出量}(\text{g})}{\text{总养分含量}(\text{g})} \times 100(\%)$$

$$\text{养分完全释放的理论时间}(\text{d}) = \frac{100 - \text{初级溶出率}(\%)}{\text{微分溶出率}(\%)} + 1$$

$$\text{微分溶出率}(\%) = \frac{\text{累积养分释放率}(\%) - \text{初级溶出率}(\%)}{\text{放置天数} - 1}(\%)$$

2 结果与分析

2.1 不同包裹控释尿素养分释放特征

以肥料在水中的溶出率来评价缓/控释肥料缓释性的方法, 操作简单, 条件易控制, 具有一定的可比性, 被广泛采用。初期溶出率能够反映包膜不完整肥料颗粒的数量, 缓释性能通过微分溶出率和养分缓释期来衡量<sup>[14]</sup>。

由表 1 可知, 研究中制得这 3 个系列的包裹控释尿素, 在 25℃ 的水中表现出良好的缓释效果, CRU<sub>20</sub>、CRU<sub>25</sub>、CRU<sub>30</sub> 的 1 d 释放率分别是 6.8%、4.2%、3.1%, 28 d 的累积释放率分别是 77.60%、58.44%、34.68%, 理论的缓释期分别为 36、54、121 d, 达到了缓释肥料国家标准 (GBT 23348-2009) 第 1 天初期溶出率不超过 15%, 28d 累积溶出率不超过 80% 的要求。

表 1 包裹控释尿素在水中的养分溶出率

种类肥料	溶出率/%			28天微分溶出率/%	养分完全释放的理论时间/d
	第1天	第7天	第28天		
CRU <sub>20</sub>	6.83b	26.90c	77.60c	2.62c	36a
CRU <sub>25</sub>	4.20a	12.10b	58.44b	1.81b	54b
CRU <sub>30</sub>	3.13a	7.24a	34.68a	0.80a	121c

注: CRU<sub>20</sub>、CRU<sub>25</sub>、CRU<sub>30</sub> 分别表示包裹层的质量分数为 20%、25%、30% 的处理, 下同。

由图 1, 较低的包裹量, 包裹控释尿素养分的释放规律为“S”型, 接近植物生长对养分的需求规律。随着包裹量的增加, 膜中的黏结剂含量增加, 包裹层的缓释作用效果提高, 缓释曲线逐渐平缓。包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub>、CRU<sub>25</sub> 缓释期分别为 36、54 d, 比较适合生育期短的蔬菜、玉米等农田作物的养料供应。

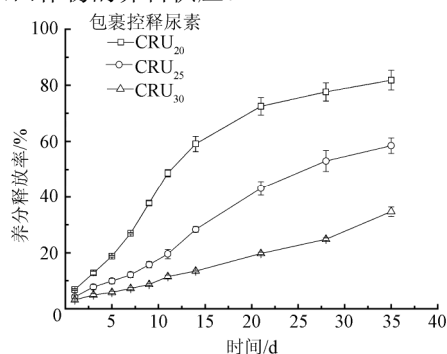


图 1 不同包裹控释尿素在水中的养分释放曲线

Fig.1 Curve of nitrogen-release from different controlled release urea in water

控释尿素氮素释放过程是肥料颗粒在水溶液中浸泡后发生溶胀, 在养分浓度梯度的作用下, 养分通过膜上微小空洞释放。

根据表 2, 对不同系列肥料的尿素累积释放率进行曲线拟合, 分析比较结果得到的最佳拟合方程。CRU<sub>20</sub> 养分释放曲线为“S”型, 能用 sigmoidal 函数  $M=A_2+(A_1-A_2)/(1+(T/T_0)^p)$  很好的拟合 ( $R=0.997$ ); CRU<sub>25</sub> 养分释放曲线能用一元三次方程  $M=A+B_1xT+B_2xT^2+B_3xT^3$  很好的拟合 ( $R=0.999$ ); CRU<sub>30</sub> 的养分释放曲线用直线方程  $M=A+BxT$  能很好的拟合 ( $R=0.995$ )。

表 2 包裹控释尿素水中养分释放的拟合曲线

Table 2 Curve fitting of nitrogen-release from controlled release urea in water

种类肥料	$M=A+BxT$			$M=A+B_1xT+B_2xT^2+B_3xT^3$					$M=A_2+(A_1-A_2)/(1+(T/T_0)^p)$				
	A	B	R	a	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	R	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	X <sub>0</sub>	P	R
CRU <sub>20</sub>	12.94	2.34	0.946	-1.54	5.13	-0.074	$-1.52 \times 10^{-4}$	0.995	6.73	92.36	12.06	2.11	0.997
CRU <sub>25</sub>	1.97	1.73	0.991	3.84	0.69	0.099	-0.002	0.999	4.74	81.49	21.75	1.92	0.996
CRU <sub>30</sub>	1.37	0.90	0.995	2.02	0.88	-0.01	$3.37 \times 10^{-4}$	0.861	2.83	126.91	91.47	1.27	0.752

注: 式中 M 表示包裹控释尿素氮累积释放率, %; T 表示释放时间, d; A、B、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、p 为方程的拟合系数; R 表示拟合曲线的相关系数。

2.2 不同温度下包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub> 的水溶释放结果

包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub> 的缓释曲线是“S”型, 更符合大田作物的营养需求规律, 选其做进一步的试验

分析。

由图 2, 温度是影响缓释的一个很重要的因素, 15℃ 下, 养分释放曲线接近直线; 25℃ 时为“S”的

曲线；当温度升高为 35℃时，养分释放曲线成为倒“L”型。

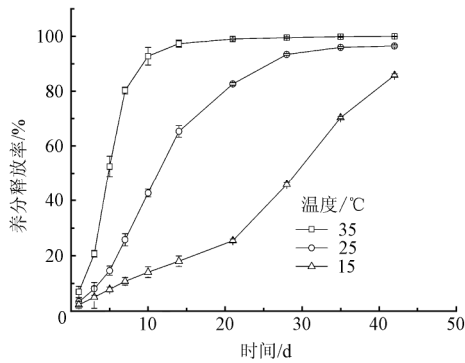


图2 不同温度下 CRU<sub>20</sub> 的氮素释放曲线

Fig.2 Curve of nitrogen-release from CRU<sub>20</sub> at different temperature

由表 3, 25℃时缓释期为 26.8 d。35℃时, 养分释放的滞后期缩短, 缓释期为 8.6 d, 相对 25℃减少了 18.2 d, 缩短 68%; 在 15℃下, 缓释期为 49.8 d, 缓释期相对 25℃增加了 23 d, 提高 85%。温度每提高 5℃, 养分释放的速率提高约 2 倍。

表 3 不同温度下包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub> 的氮素释放溶出率

Table 3 Nitrogen-release rate of CRU<sub>20</sub> at different temperature

温度/℃	溶出率/%		7天微分溶出率/%	养分完全释放的理论时间/d
	第1天	第7天		
35	6.94a	80.22a	12.21a	8.6a
25	3.27b	25.75b	3.75b	26.8b
15	2.26c	10.76c	1.42c	49.8c

注: 小写字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

温度主要通过对膜材料结构和膜两侧的水蒸气压差 2 个途径对缓释性能产生影响。包膜材料的微孔大小直接受温度的影响。温度升高, 膜材料发生膨胀, 孔径增大, 养分释放速率加快。同时, 温度升高, 导致膜内外的水蒸气压差增大, 促进了养分的释放<sup>[15-16]</sup>。

### 2.3 不同 pH 值下 CRU<sub>20</sub> 的养分释放结果

土壤是一个复杂的生态系统, 含有各种大量的土壤生物以及其他物质。pH 值是土壤重要的理化指标, 有必要探究其对养分释放的影响。

由表 4 的分析可知, pH 值对包裹尿素的缓释期有着显著的影响。pH 值为 5、7、8 时, 缓释期分别为 55、35、14 d, 与蒸馏水中缓释期 32 d 相比, 分别增加了 23 d、增加了 3 d、减少了 18 d, 即比蒸馏水缓释期增加了 72% 和 9%、减少 56%。

包裹尿素的缓释期随着 pH 值的增加而降低, 碱性缓解能加速养分的释放; 同时, pH 值为 7 的缓冲液体系中的缓释期要比蒸馏水的缓释期长, 推测其原因是缓冲液的水蒸气压差小, 包裹控释尿素的释放速率变小。

从图 3 可以看出, pH 值改变了肥料的溶出特征。碱性条件下, 包裹尿素的养分释放直接进入了线性释放期。

可能的原因是 pH 值对黏结剂的影响较大, 加快了包裹层崩解, 导致养分快速释放, 其机理需要进一步研究。针对不同土壤的理化性质要考虑黏结剂的选择, 制备专用的控释肥。

表 4 不同 pH 值条件下 CRU<sub>20</sub> 氮素溶出率

Table 4 Nitrogen-release rate of CRU<sub>20</sub> at different pH

处理	溶出率/%		12 d 微分溶出率/%	养分完全释放的理论时间/d
	第1天	第12天		
pH值=5	4.62a	23.99a	1.76a	55c
pH值=7	4.50a	35.14b	2.78b	35b
pH值=8	9.56b	85.05c	6.86c	14a
蒸馏水	8.19b	40.56b	2.94b	32b

注: 蒸馏水 pH 值为 7, 非缓冲液体系。

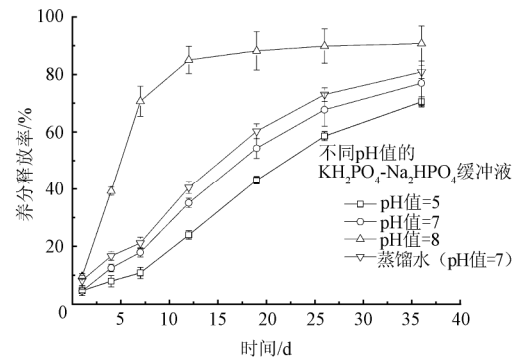


图3 不同 pH 值条件下 CRU<sub>20</sub> 的氮素释放曲线

Fig.3 Nitrogen-release curve of CRU<sub>20</sub> at different pH value

### 2.4 不同水肥比条件下包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub> 的水溶释放结果

包膜尿素的养分释放机制主要有 2 种: “崩溃”机制和“扩散”机制。包膜尿素释放过程中, 水分首先通过包膜的渗透进入膜内并溶解肥料, 在包膜壳内部产生了内压。此时, 如果膜层的内外侧压差超过了膜层所能承受的张力, 则膜破裂, 膜里面的尿素迅速释放, 即“崩溃”机制 (failure mechanism); 如果膜层的强度足以抵抗膜内外压差, 则尿素在浓度梯度的推动下, 通过膜层中的孔隙扩散到膜外土壤中, 即“扩散”机制 (diffusion mechanism)<sup>[17]</sup>。

由表 5, 随着水比例的增加, 水肥比 10:1、20:1、40:1 缓释期分别为 30.08、29.97、29.21 d, 略微的降低, 差异不明显; 每个时间短测定的养分释放率差异也不明显。

水肥比对此种包裹控释尿素的缓释性能影响不大, 以养分的浓度差为主要释放动力的“扩散”形式不是此包裹肥料养分释放的主要模式。结合 pH 值试验的结果分析, 肥料的释放行为是颗粒群体“崩溃”释放的结果。由于每个包膜肥料颗粒的性质, 如形状、大小以及膜层的厚度等不可能相同, 单个颗粒是达到一定的时间, 包裹层出现孔隙或者破裂, 养分迅速释放; 而颗粒群体的释放表现为不同的模式。

表 5 不同水肥比下 CRU<sub>20</sub> 的氮素溶出率  
Table 5 Nitrogen-release rate of CRU<sub>20</sub> in water at different water-fertilizer ratio

肥水比	养分释放量/%									28天微分 溶出率/%	养分完全 释放的理 论时间/d
	第1天	第3天	第5天	第7天	第9天	第11天	第14天	第21天	第28天		
10:1	2.32a	3.39a	4.89a	8.56a	9.30a	12.09a	16.71a	16.05a	19.73a	3.36a	30.08a
20:1	2.26a	1.82a	4.57a	7.84a	9.31a	12.40a	17.28a	20.73a	17.20a	3.38a	29.97a
40:1	3.29a	2.43a	4.54a	7.59a	11.20a	14.55a	19.52a	19.82a	12.93a	3.43a	29.21a

注:小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

### 3 结 论

采用天然的杨木木粉作为主要包裹材料,调节包裹层的厚度与黏结剂和密封剂的使用量,能够生产出不同释放模式的控释肥,满足不同作物对营养的需求规律。此研究中制得的3个系列包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub>、CRU<sub>25</sub>、CRU<sub>30</sub> 的 1 d 初期释放率和缓释期都达到了缓释肥料国家标准(GBT 23348-2009)的要求。其中包裹控释尿素 CRU<sub>20</sub> 释放曲线为“S”型的包裹控释尿素,养分的释放规律接近植物生长对养分的需求规律,适合农田作物的养料供应。

包裹控释尿素对养分有很好的控释效果,释放的模式是“崩溃”机制。温度和 pH 值是影响缓释性能的主要因素,水肥比的影响不明显。包裹控释尿素氮素释放率随着温度的升高而增大,随着 pH 值的升高而增大。温度和 pH 值主要是通过控制包裹膜层的通透性和膜内外的水蒸气压差来影响养分的释放。

天然木粉是重要的可再生资源,来源广泛,主要有果壳、锯末、秸秆等,成本低,环境友好。同时木粉包裹控释尿素工艺对设备要求低、工艺简单,具有很好的推广应用价值,也为农林废弃物的利用开辟高附加值的利用途径。

#### [参 考 文 献]

- [1] 刘宁,孙振涛,韩晓日,等.缓/控释肥料的研究进展及存在问题[J].土壤通报,2010,41(4):1005-1009.  
Liu Ning, Sun Zhentao, Han Xiaori, et al. Research progress and existing problems on slow/controlled release fertilizers[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 1005-1009. (in Chinese with English abstract)
- [2] Fan J, Hao M D, Malhi S S. Accumulation of nitrate-N in the soil profile and its implications for the environment under dry land agriculture in northern China: A review[J]. Canadian Journal of Soil Science. 2010, 90(3): 429-440.
- [3] 许秀成.减排、低碳时代的肥料:从低碳经济出发,构建我国肥料新体系[J].磷肥与复肥,2010,25(3):1-3.  
Xu Xiucheng. Fertilizer of the CO<sub>2</sub> emission reduction and low carbon age: Starting from low carbon economy, constructing a new system of China's fertilizer[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2010, 25(3): 1-3. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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):47-50.  
Wang Qiang, Li Shuangling, Han Yanlai. Effect of slow/controlled release fertilizers on yield and fertilizer-nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(4): 47-50. (in Chinese with English abstract)
- [5] Shaviv A. Controlled Release Fertilizers[Z]. Frankfurt, Germany: 2005.
- [6] 肖强,王甲辰,左强,等.有机-无机复合材料胶结包膜肥料的研制及评价[J].应用生态学报,2010,21(1):115-120.  
Xiao Qiang, Wang Jiachen, Zuo Qiang, et al. Development and evaluation of fertilizers cemented and coated with organic-inorganic materials[J]. Chin J Appl Ecol, 2010, 21(1): 115-120. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郝世雄,刘兴勇,余祖孝,等.磷酸氢钙包膜尿素的研制及其释放特性[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):426-430.  
Hao Shixiong, Liu Xingyong, Yu Zuxiao, et al. Development of calcium hydrogen phosphate coated urea and its release characteristics[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3): 426-430. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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(4):1-4.  
Zhang Fudao, Wang Yujun. Current situation and development trend of slow/controlled-release fertilizer in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008, 4(4): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [9] 郭会仙,唐辉,王亚明,等.天然产物在缓/控释肥料中的应用[J].化工科技,2006,14(6):40-43.  
Guo Huixian, Tang Hui, Wang Yaming, et al. Application of natural product in slow/controlled-release fertilizer[J]. Science and Technology in Chemical Industry, 2006, 14(6): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- [10] 苗晓杰,蒋恩臣.包膜型控释肥包膜材料的研究与展望[J].广东农业科学,2009,7(7):112-115.  
Miao Xiaojie, Jiang Enchen. Research and Prospect of the capsule-type controlled release fertilizer coating materials[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009, 7(7): 112-115. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周涌.缓释肥离行业本质有多远[J].中国农资,2010,11(11):42-43.  
Zhou Yong. How far is slow-release fertilizer from the nature of the industry[J]. China Agricultural Means of Production. 2010, 11(11): 42-43. (in Chinese with English abstract)
- [12] Ni B, Liu M, Lu S, et al. Environmentally Friendly Slow-Release Nitrogen Fertilizer[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2011, 59(18): 10169-10175.

- [13] 赵秉强, 许秀成. 加快建设有中国特色缓释肥料技术体系, 推动缓释肥料产业健康发展[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(4): 11—13.  
Zhao Bingqiang, Xu Xiucheng. Speeding up construction of a slow release fertilizer technology system with Chinese characteristics in promoting its healthy industrial development in China[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2010, 25(4): 11—13. (in Chinese with English abstract)
- [14] 许秀成, 李荫萍, 王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(3): 1—6.  
Xu Xiucheng, Li Diping, Wang Haobin. A special report on coated slow/controlled release fertilizer[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2000, 15(3): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [15] 林海涛, 江丽华, 刘兆辉, 等. 生物可降解型自控缓释尿素养分释放规律的研究[J]. 山东农业科学, 2009, 11(11): 69—72.  
Lin Haitao, Jiang Lihua, Liu Zhaohui, et al. Study on nutrient release rule of biodegradable controlled-release urea[J]. 2009, 11: 69—72. (in Chinese with English abstract)
- [16] 段路路, 张民, 刘刚, 等. 包膜尿素氮素释放机理及其对油菜生长效应研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 73—78.  
Duan Lulu, Zhang Min, Liu Gang, et al. Nitrogen release mechanism of coated urea and biological activity of cole[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 73—78. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郝世雄. 包膜型缓释/控释尿素的研制[D]. 四川大学, 2004.
- [18] 董勤各, 冯浩, 杜健. 秸秆粉碎还田与化肥配施对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 156—162.  
Dong Qinge, Feng Hao, Du Jian. Effects of chemical fertilizer combined crushed straw application on yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.2): 156—162. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李存弟, 张皓, 严红. 有机物料对土壤有机碳含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(22): 13463—13465.  
Li Cundi, Zhang Hao, Yan Hong. Influence of organic material on soil organic carbon[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2011, 39(22): 13463—13465. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张晓文, 赵改宾, 杨仁全, 等. 农作物秸秆在循环经济中的综合利用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 107—109.  
Zhang Xiaowen, Zhao Gaibin, Yang Renquan, et al. Comprehensive utilization of agricultural straws in recycle economy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(Supp 1): 107—109. (in Chinese with English abstract)

## Application of natural wood flour on controlled-release urea

Wang Enfei<sup>1,2</sup>, Mo Haitao<sup>1,2</sup>, Cui Zhiduo<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaoyong<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To explore the applied effects of lignocelluloses organic compounds on controlled-release fertilizer, three kinds of controlled-release urea coated with natural wood flour (CRU<sub>20</sub>, CRU<sub>25</sub>, CRU<sub>30</sub>) was examined by water-extraction method. The effects of temperature, pH and water-fertilizer ratio on the nutrient release characteristics of controlled-release urea were studied. The results showed that: 1) Controlled-release urea exhibited slow releasing performance, and the theoretical slow-release period of CRU<sub>20</sub>, CRU<sub>25</sub>, and CRU<sub>30</sub> was 36, 54, and 121 days respectively, and the nitrogen-release model changed with the amount of coated materials; 2) Temperature and pH affected the nitrogen release rate greatly, while the impact of water-fertilizer ratio on nitrogen release rate was not obvious; 3) The release pattern of controlled-released urea coated with natural wood flour was failure mechanism. Controlled-release urea coated with natural wood flour provides a reference for applications.

**Key words:** fertilizers, urea, application, wood flour, water-extraction method, release mechanism