包膜尿素养分释放期的影响因素研究及工业化生产实践

任孟伟，杨星波，杨自超

（河南心连心化学工业集团股份有限公司，河南 新乡 453700）

［摘 要］采用热固性树脂包膜普通大颗粒尿素，通过单因素实验考察包膜量、圆度和粒径对热固性树脂包膜尿素养分释放期的影响，在单因素的基础上，采用响应面法进行条件优化并建立数学模型。结果表明，包膜量是影响包膜尿素养分释放期的最显著条件，随包膜量增加，尿素养分释放期延长；包膜量、圆度是交互作用影响最明显的条件；粒径对包膜尿素的养分释放期影响不大，可通过增加核心粒径降低比表面积，减少膜材使用量，达到降低生产成本的目的。建立的回归模型，具有较好的统计学意义，可实现在工艺条件一定的情况下预测包膜尿素养分释放期。对河南心连心化学工业集团股份有限公司5万t/a包膜尿素生产线改造后，包膜量为1 000、800 g/m²的包膜尿素养分释放期分别由60 d、49 d延长至75、62 d。

［关键词］包膜尿素；养分释放期；包膜量；圆度；粒径

［中图分类号］TQ441.4 ［文献标志码］A ［文章编号］ 2097-4566（2025）09-0053-05

Study on influence factors of nutrient release rate of coated urea and industrial production practice

REN Mengwei, YANG Xingbo, YANG Zichao

(*Henan Xinlianxin Chemicals Group Co., Ltd., Xinxiang* 453700, *China*)

Abstract: Using thermosetting resin coated ordinary large particle urea, the effects of envelope quantity, roundness and particle size on the nutrient release period of coated urea are investigated through single factor experiments. Based on the single factor, response surface methodology is used to optimize the conditions and establish a mathematical model. The results show that the envelope quantity is the most significant condition affecting the nutrient release period of coated urea, and as the envelope quantity increases, the nutrient release period of urea prolongs; The envelope quantity and roundness are the most significant conditions for the interaction effect; The particle size has little effect on the nutrient release period of coated urea, but the specific surface area can be reduced through increasing the core particle size, decreasing the amount of membrane material, and achieving the goal of reducing production costs. The established regression model has good statistical significance and can predict the nutrient release period of coated urea under certain process conditions. After the renovation of the 50 kt/a coated urea production line in Henan Xinlianxin Chemicals Group Co., Ltd., the nutrient release periods of coated urea with coating amounts of 1 000、800 g/m² have been extended from 60, 49 d to 75, 62 d.

Key words: coated urea; nutrient release period; envelope quantity; roundness; particle size

氮素是促进作物生长所需的大量营养元素之一，尿素作为应用最广泛的氮肥，在增加作物产量、发展农业方面起到至关重要的作用[1]。我国农业生产中氮肥施用量逐年增多，给生态环境也带来严重的负面影响[2-3]。据统计，发达国家肥料利用率为50%～60%，我国氮肥和钾肥利用率仅为30%～40%，而磷肥利用率仅为10%～20%[4-6]。现在国家大力提倡减肥增效，因此提升肥料利用率是

［收稿日期］2024-05-21； ［修回日期］2025-06-16

［作者简介］任孟伟(1990-)，男，河南新乡人，工程师，主要从事新产品研发及生产工作。

［通信作者］杨自超(1990-)，男，农艺师，主要从事新型肥料研发工作。

［基金项目］农业农村部农田智慧施肥项目(NK2022180503)

促进农业生产可持续发展的必经之路[7]。

缓释肥可通过各种调控机制使其养分缓慢释放，延长作物对其有效养分吸收利用有效期，是提高肥料利用率的有效途径之一。包膜尿素作为缓控释肥料的一种，其养分释放规律与农作物不同生长阶段的养分吸收相一致，从而大幅度提升养分利用率[8-9]。

包膜尿素是一种通过物理或化学方法在尿素颗粒表面包覆一层或多层缓释材料，以控制氮素释放速率的新型肥料。缓释机制以多级扩散模型的“扩散机理”最为广泛接受，其养分释放期受多种因素影响，包括包膜材料性质、环境条件、土壤特性及作物需求等。由于包膜尿素养分释放情况影响因素众多，无法完全进行统一研究[10]。

笔者拟从核心粒径、核心圆度及包膜量3方面进行分析，为包膜尿素的生产、降本提供理论依据[11]。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试肥料采用河南心连心化学工业集团股份有限公司（简称心连心）生产的普通大颗粒尿素，包膜材料采用热固性树脂，包膜过程在心连心5万t/a包膜滚筒中进行。

1.2 试验设计

包膜材料用量设3个水平，分别为500、1 000、1 500 g/m^2；肥料核心粒径设3个水平，分别为2.5、3.0、4.0 mm；核心圆度设3个水平，分别为8.5、9.0、9.5。

试验方法：采用心连心公司现有包膜线进行线上生产，除设计因素和水平外，其他生产工艺指标及包膜材料全部与正常生产时一致。

1.3 测定方法

参照国家标准方法，采用水溶出率法测定包膜尿素养分释放速率：称取未粉碎供试材料放入孔径150 μm的尼龙沙袋中，封口后放在250 mL玻璃瓶中，加入200 mL水，置于25 ℃的生化恒温培养箱中，取样时间为1、3、5、7、10、14、28、42、56 d，直至累积养分溶出率达到80%以上为止。浸提液中总氮含量采用分光光度法测定。

1.4 数据处理

数据统计分析采用Design-Expert软件，以Box-Benhnken Design（BBD）响应面实验设计法对工艺条件进行优化并建立数学模型，采用Orign软件作图。

2 结果与分析

2.1 单因素分析

2.1.1 包膜量对养分释放期的影响

在肥料圆度为9.0、核心粒径为3.0 mm条件下，包膜量对累积养分释放率的影响如图1所示。

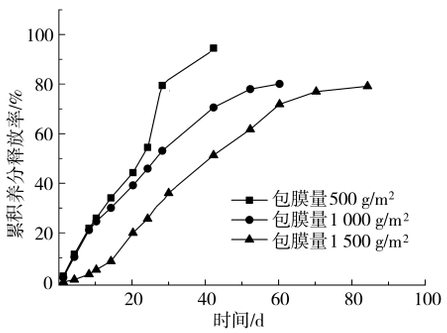


图1 包膜量对累积养分释放率的影响

Fig. 1 Effect of envelope amount on cumulative nutrient release rate

包膜尿素养分释放率为80%的时间称为养分释放期，随包膜量增加，膜材反应后，膜层更加致密，膜材间空隙变小，水分子进入膜内的阻力变大，养分释放至膜外的阻力也增大，使得养分释放期变长。由图1可知，当包膜量从500 g/m^{2}提升至1 500 g/m^{2}时，包膜尿素养分释放期从30 d延长至90 d。

2.1.2 核心圆度对养分释放期的影响

在包膜量1 000 g/m^2、核心粒径3.0 mm情况下，核心圆度对累积养分释放率的影响如图2所示。

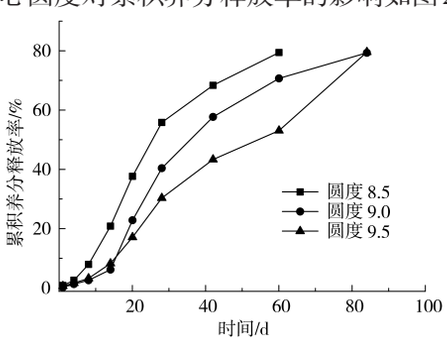


图2 圆度对累积养分释放率的影响

Fig. 2 Effect of roundness on cumulative nutrient release rate

颗粒圆度指颗粒完全符合球形形状的程度。在实际包膜过程中，包膜核心的圆度大，可减少包膜材料对坑洼处的填补，在同样包膜量的情况下，膜材在颗粒表面的厚度均一，避免出现膜材薄弱处，影响包膜尿素养分释放期。由图2可知，圆度小于9.0时，包膜尿素养分释放累积至80%的时间约为60 d；当圆度大于9.0时，前期样品的养分释放率基本相同，中期由于圆度低的包膜尿素表面存在膜

薄弱处，导致养分释放率较快，但随包膜尿素养分不断释放，膜内外养分浓度差成为养分释放的主导因素，整体养分释放期基本相同。

2.1.3　粒径对养分释放期的影响

在包膜量1 000 g/m^2、圆度9.0情况下，粒径对累积养分释放率的影响，如图3所示。

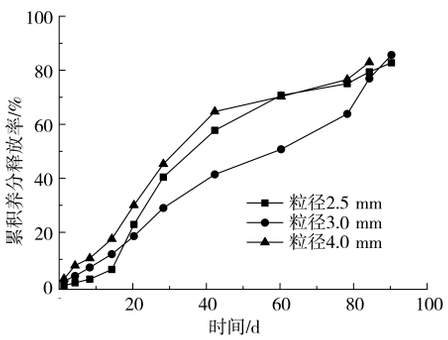


图3　粒径对累积养分释放率影响

Fig. 3　Effect of particle size on cumulative nutrient release rate

从图3可以看出，在同一包膜量和圆度情况下，粒径对包膜尿素养分释放期的影响较小。但从整个包膜尿素养分释放率来看，包膜核心粒径越大，前中期养分释放速率越快，主要原因是核心粒径越大，膜内外养分浓度差越大，前期养分向膜外移动的推动力越大；随着养分的释放，粒径较大的包膜尿素颗粒的推动力逐渐与小粒径平衡，累积养分释放率逐渐接近。

2.2　响应面实验

2.2.1　响应面实验设计

选择包膜量、粒径及圆度3个影响因素进行响应面实验，以养分释放期为响应值，BBD响应面因素水平如表1所示。

表1　BBD响应面因素水平表

Table 1　BBD response surface factor level

水平	X_1（包膜量/(g·m^{-2})）	X_2（粒径/mm）	X_3（圆度）
−1	500	2.5	8.5
0	1 000	3.3	9.0
1	1 500	4.0	9.5

采用三因素三水平的BBD拟合响应面设计，共设计17个实验，其中5次重复实验为零点，另有12个分析实验，响应值Y为样品养分释放期，实验结果如表2所示。

利用Design Expert对表2中数据进行分析，采用二次拟合得到多元二次回归模型，如式（1）所示。其中X_1、X_2、X_3是自变量，Y为响应值。

$$Y=65.22+20.25X_1-3.07X_2+7.25X_3+3.0X_1X_2+1.5X_1X_3-9.0X_2X_3+2.8X_1^2+1.8X_2^2+0.2X_3^2。\quad(1)$$

表2　BBD响应面实验方案与结果

Table 2　Scheme and results of BBD response surface experiment

序号	包膜量/(g·m^{-2})	粒径/mm	圆度	养分释放期/d
1	1 000	3.3	9.0	62
2	1 500	3.3	9.5	93
3	500	3.3	8.5	44
4	1 500	4.0	9.0	90
5	1 000	4.0	9.5	63
6	1 000	3.3	9.0	65
7	1 500	2.5	9.0	87
8	1 000	3.3	9.0	65
9	1 000	4.0	8.5	63
10	1 000	2.5	8.5	55
11	1 000	3.3	9.0	63
12	500	3.3	9.5	46
13	1 000	3.3	9.0	67
14	500	4.0	9.0	45
15	1 000	2.5	9.5	79
16	500	2.5	9.0	50
17	1 500	3.3	8.5	85

2.2.2　回归模型方差分析

回归模型方差分析见表3。由表3可知，所建立的回归模型P<0.000 1，说明Y回归方程是极显著的，建立的模型统计学意义较好。失拟项P=0.162 4>0.05，不显著，即方程拟合效果较好，说明该回归方程可以代替实验结果进行分析。对于响应值Y，X_1、X_3、X_2X_3项的P<0.01，均为极显著项。根据3个一次项的回归方程系数绝对值大小可以看出：对响应值Y的影响从大到小依次为包膜量、圆度、粒径。

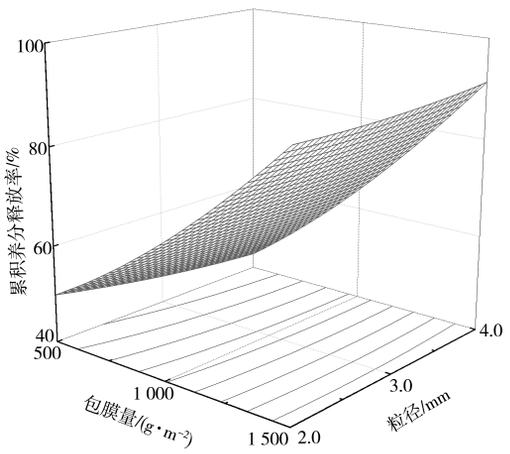
表3　回归模型方差分析

Table 3　Variance analysis of quadratic regression model

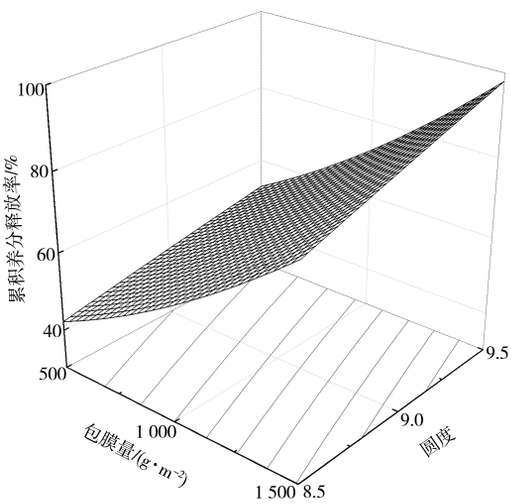
来源	F值	P值	来源	F值	P值
模型	63.490	<0.000 1	X_2X_3	20.700	0.002 6
X_1	314.350	<0.000 1	X_1^2	4.740	0.065 8
X_2	1.670	0.237 7	X_2^2	0.390	0.553 4
X_3	40.290	0.000 4	X_3^2	0.024	0.880 7
X_1X_2	2.300	0.173 2	失拟项	2.940	0.162 4
X_1X_3	1.290	0.292 8			

2.2.3　交互作用

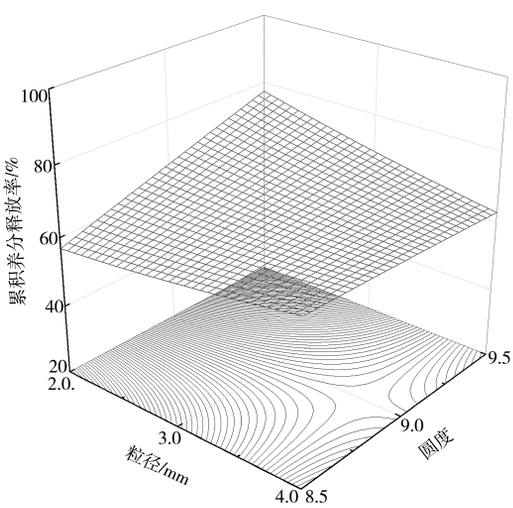
各因素交互作用对平均聚合度影响的3D曲面图及等高线如图4所示。由图4等高线的形状能够反映交互作用的大小，等高线越接近圆，交互作用



a. 包膜量与粒径交互作用



b. 包膜量与圆度交互作用



c. 粒径与圆度交互作用

图 4　交互作用对累积养分释放率影响的 3D 曲面图

Fig. 4　3D surface diagram of the interaction effect on the cumulative nutrient release rate

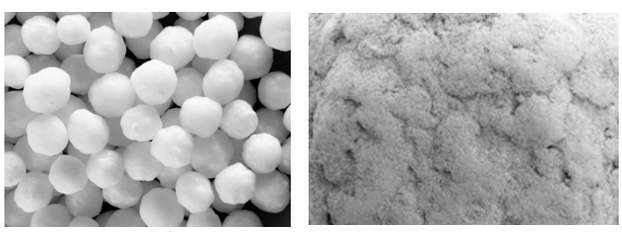
越小，越接近椭圆，交互作用越大。因此可以得出：包膜量、圆度之间的交互作用最明显，体现为 3D 响应面图中曲面的弯曲程度较大、曲线较陡，等高线呈椭圆形；而包膜量、粒径交互作用次之；粒径、圆度交互作用最差。

3　工业化生产

利用前期研究结果，对心连心年产 5 万 t 包膜尿素生产线进行改造，并进行工业化生产。

3.1　包膜尿素生产线改造

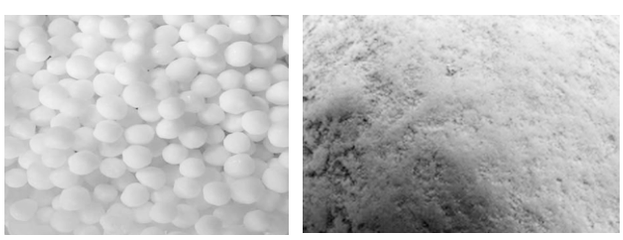
新增抛光设备并优化工艺流程，在新增抛光设备内通过热风将颗粒尿素表面加热至 70 ~ 80 ℃，并将热水喷涂至颗粒尿素表面使其软化，进而在持续通入热风情况下，在抛光设备内取不同抛光时间样品进行检测，改造前后尿素颗粒照片及 SEM 图见图 5、图 6，抛光时间对圆度的影响见表 4。由表 4 可以看出，抛光 20 min 以上颗粒尿素表面光滑，颗粒圆度达到 9.5 以上。



a. 照片　　b. SEM 图

图 5　改造前颗粒尿素

Fig. 5　Granular urea before transformation



a. 照片　　b. SEM 图

图 6　改造后颗粒尿素

Fig. 6　Granular urea after transformation

表 4　抛光时间对圆度的影响

Table 4　Effect of polishing time on roundness

样品编号	抛光时间/min	圆度
1#	0	7.3
2#	5	7.9
3#	10	8.4
4#	15	9.1
5#	20	9.5
6#	25	9.6
7#	30	9.6
8#	35	9.6
9#	40	9.6
10#	45	9.6

在投料区域新增筛网，筛网孔径为 3.0 mm，降

低颗粒尿素＜3.0 mm占比，改造前后颗粒尿素粒径对比见表5。

表5　改造前后颗粒尿素粒径对比

Table 5　Comparison of particle size of granular urea before and after transformation

粒径区间/mm	占比/%	
	改造前	改造后
≥4.75	1.11	1.29
3.80~＜4.75	32.50	37.97
3.35~＜3.8	21.68	25.33
2.80~＜3.35	34.30	35.41
2.00~＜2.80	10.00	0
＜2.00	0.41	0

3.2　工业化生产

利用心连心5万t/a改造后包膜尿素生产线进行工业化生产，并进行养分释放期的测定，养分释放期如表6所示。由表6可知，改造后养分释放期延长。

表6　改造前后包膜尿素养分释放期对比

Table 6　Comparison of nutrient release periods of coated urea before and after transformation

项目	不同包膜量(g/m²)下养分释放期/d	
	1 000	800
改造前	60	49
改造后	75	62

4　结论

本研究在单因素的基础上，通过响应面法对影响包膜尿素养分释放期的条件进行了分析，并进行工业化生产，主要结论如下：

（1）包膜量对养分释放期的影响是最显著的，其次是颗粒圆度，粒径对养分释放期的影响最小；

（2）包膜量、圆度交互作用对养分释放期的影响最明显，包膜量、粒径之间的交互作用次之，粒径、圆度交互作用的影响最小；

（3）核心粒径对养分释放期的影响较小，在实际生产过程中可通过增加核心粒径降低比表面积，实现膜材的降本；

（4）笔者所建立的回归模型，具有较好的统计学意义，可实现在工艺条件一定的情况下预测不同条件下包膜尿素养分释放期。

［参考文献］

［1］ 巨晓棠，张翀.论合理施氮的原则和指标[J].土壤学报，2021，58(1)：1-13.
JU X T，ZHANG C. The Principles and Indicators of Rational N Fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica，2021，58(1)：1-13.

［2］ 陆宇燕，李丕鹏.氮肥污染的危害[J].沈阳师范大学学报(自然科学版)，2014，32(1)：1-5.
LU Y Y，LI P P. Effects of application of nitrogen fertilizer on pollutions [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)，2014，32(1)：1-5.

［3］ 刘旭杰，严旖旎，单海勇，等.我国新型肥料产业现状与发展展望[J].磷肥与复肥，2024，39(2)：1-5.
LIU X J，YAN Y N ，SHAN H Y，et al. Current situation and development outlook of new type fertilizer industry in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2024，39(2)：1-5.

［4］ 靳义荣，刘金栋，刘彩云，等.普通小麦氮素利用效率相关性状全基因组关联分析[J].作物学报，2021，47(3)：394-404.
JIN Y R，LIU J D，LIU C Y，et al. Genome - wide association study of nitrogen use efficiency related traits in common wheat(Triticum aestivum L.)[J]. Acta Agronomica Sinica，2021，47(3)：394-404.

［5］ 李慧，陈少雄.包膜控释肥及其包膜材料研究进展[J].桉树科技，2012，29(4)：45-52.
LI H，CHEN S X. A Review of Controlled Release Fertilizer and Fertilizer Coating Materials[J]. Eucalypt Science & Technology，2012，29(4)：45-52.

［6］ 高璐阳，王怀利，王晓飞，等.我国发展缓控释肥的意义及前景[J].磷肥与复肥，2015，30(4)：14-17.
GAO L Y，WANG H L，WANG X F，et al. The significance and prospect of slow/controlled release fertilizer development in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2015，30(4)：14-17.

［7］ 付浩然，李婷玉，曹寒冰，等.我国化肥减量增效的驱动因素探究[J].植物营养与肥料学报，2020，26(3)：561-580.
FU H R，LI T Y，CAO H B，et al. Research on the driving factors of fertilizer reduction in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2020，26(3)：561-580.

［8］ TRENKEL M E. Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture [M]. [S.n.] : International Fertilizer Industry Association，1997.

［9］ 刘永红，郑文涛，张晋天，等.缓/控释肥研究进展及其应用[J].华中农业大学学报，2023，42(4)：167-176.
LIU Y H，ZHENG W T，ZHANG J T，et al. Progress and its application of slow/controlled release fertilizers in agricultural production[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2023，42(4)：167-176.

［10］ 王素萍.控释尿素养分释放特征及在油菜上施用效果研究[D].武汉：华中农业大学，2012.
WANG S P. Study on nutrient release characteristics of controlled release urea and its application effects on rapeseed[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2012.

［11］ 樊小林，王浩，喻建刚.粒径膜厚与控释肥料的氮素养分释放特性[J].植物营养与肥料学报，2005(3)：327-333.
FAN X L，WANG H，YU J G. Effect of granule size and coating thickness on nitrogen release characteristics of controlled release fertilizers(CRFs)[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2005(3)：327-333.