

# 氮素与抑制剂双控释尿素的制备及其对土壤供氮能力和小麦产量的影响

李玉<sup>1</sup>, 贺明荣<sup>2</sup>, 代兴龙<sup>2</sup>, 董元杰<sup>1\*</sup>

(1 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018)

**摘要:**【目的】包衣和添加抑制剂是常用的制备缓控释肥料的手段。尝试同时使用这两种方法, 制备更加可控氮素释放与转化的新型肥料, 并研究其在小麦上的应用效果。【方法】采用先在大颗粒尿素 (2.5~3.5 mm) 表面涂层, 再用树脂包膜的方法制备含不同抑制剂的树脂包膜尿素。依据不同抑制剂, 制备了无涂层 (CU)、脲酶抑制剂 HQ 涂层 (CRU1)、硝化抑制剂 DCD 涂层 (CRU2) 和 HQ + DCD 组合涂层 (CRU3) 4 种新型树脂包膜尿素。通过扫描电镜观测了 4 种包膜尿素的微观结构, 采用静水释放的方法测定了养分和抑制剂的缓释性能。在山东省潍坊和泰安两地布置冬小麦等氮磷钾施用量和相同施肥方法的田间试验, 以普通大颗粒尿素为对照, 在冬小麦苗期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期采集耕层土壤样品, 测定速效氮含量, 并于小麦成熟期测定产量及构成因素。【结果】1) 制备的 4 种包膜尿素成膜完整, 包膜厚度均匀, 表面光滑且膜层致密, 树脂包膜材料能完整地覆盖在肥核的表面, 膜表面有微孔, 成为尿素和抑制剂向膜外释放的通道; 尿素与抑制剂交接处结合严密, 无间隙产生, 抑制剂在包膜层的完全包围之中, 可实现对尿素和抑制剂释放的同时控制。2) 包膜与抑制剂结合可有效控制尿素溶出。静水释放条件下, 4 种包膜尿素的氮素初期溶出率分别为 7.59%、1.96%、2.12%、0.89%, 尿素控释期依次是 42、56、56、56 天; CRU1 的 HQ 释放期为 28 天, CRU2 的 DCD 释放期为 14 天, CRU3 中 HQ 和 DCD 的释放期分别为 42 和 14 天。相比较而言, CRU3 的氮素释放期长于 CRU1 和 CRU2, 抑制剂的释放期也长于 CRU1 和 CRU2, 因此缓释效果大于 CRU1 和 CRU2。3) 与大颗粒尿素对照 (U) 相比, 4 个包膜尿素处理在小麦苗期能维持土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的适宜浓度, 开花期后显著增加土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量, 保障了氮素的持续供应; 而在小麦整个生育期内均显著降低土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量, 从而减少氮素淋溶损失。含 HQ 涂层的 CRU1、CRU3 处理能在小麦生育期内维持土壤脲酶活性处于较低水平; 含 DCD 涂层的 CRU2、CRU3 处理能够抑制土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  向  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的转化, 显著降低土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  表现硝化率。与 CU 相比, CRU1、CRU2 和 CRU3 处理的小麦产量在潍坊试验点分别显著增加 23.38%、23.13% 和 38.79%, 在泰安试验点分别增加 6.36%、9.52% 和 28.57%。【结论】先在大颗粒尿素表面包裹抑制剂涂层, 再包裹树脂, 可在尿素表面形成完整且均匀的膜, 而且在膜表面仍有一定量的微孔, 实现尿素与抑制剂释放的同时控制。小麦整个生育期, 与施用单一抑制剂的包膜尿素处理相比, 施用含两种抑制剂 (CRU3) 的包膜尿素处理的土壤氮素持续供应能力更强, 小麦产量最高; 而且土壤硝态氮水平一直较低, 也减少了氮素淋溶损失的可能。

**关键词:** 包膜尿素; 氢醌; 双氰胺; 缓释性能; 土壤供氮能力; 小麦产量

## Preparation of dual controlled release urea with nitrogen inhibitor and resine coating and the effects on soil nitrogen supply capacity and wheat yield

LI Yu<sup>1</sup>, HE Ming-rong<sup>2</sup>, DAI Xing-long<sup>2</sup>, DONG Yuan-jie<sup>1\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2 College of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** 【Objectives】Coating and adding inhibitors are commonly used to prepare slow-release and controlled-release fertilizers. We tried to prepare new fertilizers with more controllable nitrogen release and

收稿日期: 2020-01-19 接受日期: 2020-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0201705); 山东省农业重大应用技术创新项目 (SD2019ZZ021)。

联系方式: 李玉 E-mail: 2392815362@qq.com; \* 通信作者 董元杰 E-mail: yuanjiedong@163.com

transformation by applying these two methods at the same time and study the application effect of dual controlled release urea with nitrogen inhibitor and resin coating on wheat. **【 Methods 】** The tested particle size of urea was 2.5–3.5 mm and coating material was resin, and the used inhibitors were urease inhibitor (HQ) and nitrification inhibitor (DCD) in the preparation. According to the inhibitor used, four kinds of new resin coated urea were prepared: uncoated (CU), HQ coating (CRU1), DCD coating (CRU2) and (HQ+DCD) combined coating (CRU3). The microstructure of four kinds of coated urea was observed by scanning electron microscope (SEM). The slow release characteristics of nutrient and inhibitors were determined using hydrostatic release test. Two field experiments were carried out separately in Weifang and Tai'an of Shandong Province with the same N, P and K application rates and the same fertilization methods. Soil samples were collected at seedling, jointing, flowering, filling and maturity stages of winter wheat to determine the content of available N. The yield and yield components at the mature stage of winter wheat were investigated. **【 Results 】** 1) In the microscope images of 500× and 1000×, the film layers of all the four prepared slow-release urea were complete, uniform, smooth and dense. Some micropores could be seen on the surface of the film, which worked as the channel for urea and inhibitor to release out. The inhibitor layer tightly covered urea particle without gap, and was completely surrounded by the resin coating layer, realizing the control of the release of urea and inhibitor at the same time. 2) The combination of coating and inhibitor addition effectively controlled urea dissolution. When loaded in still water, the initial N release rates of CU, CRU1, CRU2 and CRU3 were 7.59%, 1.96%, 2.12% and 0.89%, respectively; the release periods of urea of CU, CRU1, CRU2 and CRU3 were 42, 56, 56 and 56 days, respectively; the release period of HQ in CRU1 was 28 days, that of DCD in CRU2 was 14 days, and those of HQ and DCD in CRU3 were 42 and 14 days, respectively. As the longer N and inhibitor release period in CRU3 than CRU1 and CRU2, CRU3 had longer sustained release effect. 3) Compared with the large granule urea control (U), the soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentrations of the four coated urea treatments were maintained at appropriate low levels at the seedling stage, and were significantly increased after flowering stage, which ensured the continuous supply of N to wheat; while the soil  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents during the whole growth period of wheat were reduced significantly, which decreased the possibility of N leaching loss. CRU1 and CRU3 treatments could maintain the soil urease activity at a low level during the whole growth period of wheat, CRU2 and CRU3 treatments could inhibit the transformation of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  to  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , and significantly reduce the apparent nitrification rate of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ . Compared with CU, CRU1, CRU2 and CRU3 treatments significantly increased the yield of wheat by 23.38%, 23.13% and 38.79%, respectively in Weifang, and by 6.36%, 9.52% and 28.57% respectively in Tai'an. **【 Conclusions 】** Double coating large granule urea with inhibitor and resin in turn could form a complete and uniform film layer, and some clear micropores still exist on the layer surface allowing the release of urea and inhibitor. Coated urea containing both urease and nitrification inhibitor (CUR3) has better controlling effect on soil ammonium and nitrate concentration during the whole growth stage of winter wheat, so obtains higher yield effect than the coated urea containing either urease or nitrification inhibitor.

**Key words:** coated urea; HQ; DCD; release performance; soil nitrogen supply capacity; wheat yield

氮是植物生长发育所必需的营养元素, 但土壤供应量少, 供求之间存在着极大的不平衡, 因此农业生产中施用氮肥是保障作物产量和粮食安全必不可少的措施<sup>[1-2]</sup>。然而, 近年来我国氮肥的高投入在保证粮食高产的同时, 氮肥利用率并没有得到提高, 平均约为 30%<sup>[3]</sup>, 损失率非常高<sup>[4]</sup>。氮肥施入土壤后, 易通过氨挥发、硝化-反硝化作用、径流和淋

溶等途径流失到环境中去<sup>[5-6]</sup>, 不仅造成了肥料资源的浪费, 还引发了土壤、水体和空气污染等环境问题<sup>[7-8]</sup>。因此, 通过合理的科学技术手段实现粮食产量与氮肥利用率的同步提高, 是现代农业绿色发展关注的重大课题之一<sup>[9]</sup>。

尿素施入土壤后, 在土壤水分适宜的条件下迅速溶解, 并在土壤脲酶的作用下水解形成  $\text{NH}_3$ , 导

致短时间内土壤中  $\text{NH}_3$  浓度增加和 pH 升高<sup>[10]</sup>, 这样不仅会造成  $\text{NH}_3$  的挥发损失, 还会对植物幼苗产生毒害作用<sup>[11]</sup>。而尿素水解后的  $\text{NH}_4^+$  又是硝化作用的重要底物, 会在硝化作用的第一阶段产生气态中间产物  $\text{N}_2\text{O}$ , 而硝化作用的产物  $\text{NO}_3^-$  又可经过反硝化还原为  $\text{N}_2\text{O}$  与  $\text{NO}$ 。要减少尿素在转化过程中的  $\text{NH}_3$  毒害、气态 N 损失和  $\text{NO}_3^-$  淋失, 提高氮素的利用率, 一方面要努力控制施入土壤中尿素的溶解过程, 另一方面要尽量减缓土壤中尿素的水解和  $\text{NH}_4^+$  的硝化速率<sup>[12]</sup>。在众多控制氮肥溶解的技术中, 对尿素进行物理包膜是将尿素释放周期延长、控制尿素溶出速率的有效措施<sup>[13-14]</sup>。包膜尿素能克服尿素施入土壤后溶解过快的缺点, 但不能控制溶出尿素在土壤中的转化。徐星凯等<sup>[15]</sup>和周礼恺等<sup>[16]</sup>的研究表明, 施用脲酶/硝化抑制剂能够减缓土壤中尿素的水解和铵态氮至硝态氮的转化, 从而减少氨挥发和硝酸盐淋溶的损失, 但脲酶和硝化抑制剂施入土壤后会发生固定和降解等退化现象<sup>[17-18]</sup>, 导致抑制剂发挥作用时间明显缩短, 抑制效能降低。前期研究发现, 将抑制剂添加到无机膜材料中, 制成抑制剂型包膜尿素来联合控氮, 可显著提高氮素的利用效率、改善花生的生理特性、提高花生产量<sup>[19]</sup>。

树脂是世界公认的包膜材料, 脲酶和硝化抑制剂可有效抑制尿素的水解和  $\text{NH}_4^+$  的硝化。为了既控制尿素的溶出又抑制溶出后尿素的水解和水解后  $\text{NH}_4^+$  向  $\text{NO}_3^-$  转换的过程, 本研究在前人研究成果<sup>[20-21]</sup>和实验室前期研究<sup>[22]</sup>的基础上, 采用热固型环氧树脂与脲酶/硝化抑制剂涂层联合包膜的技术手段, 将抑制剂给尿素做成涂层后, 再用环氧树脂包膜, 制备具有物理包膜阻溶与抑制剂减缓氮素转化的新型缓/控释尿素, 以有效控制尿素与抑制剂从膜内的溶出, 并延长抑制剂的持效期, 实现对尿素态氮溶出与转化的双重调控。分别采用扫描电镜和静水释放试验, 研究了自制双控尿素的微观结构特性及养分与抑制剂的缓释性能; 并在山东省潍坊和泰安两地布置相同处理的小麦田间试验, 研究氮素与抑制剂双控释尿素对土壤供氮能力和冬小麦产量的影响。为有效提高氮素利用率, 促进新型缓/控氮肥的研发与应用提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 氮素与抑制剂双控释尿素的制备

#### 1.1.1 试验材料与仪器 供试肥料: 粒径范围

2.5~3.5 mm 的大颗粒尿素 (N 46%)。

供试生化抑制剂: 脲酶抑制剂氢醌 (HQ) 和硝化抑制剂双氰铵 (DCD), 两种抑制剂均溶于水和乙醇。

供试包膜材料: 双酚 A 型环氧树脂和环氧树脂固化剂 T-31。

试验仪器: 圆盘包衣机 (新而立机械设备有限公司生产, 型号 BY-300), 恒温水浴锅, 温度计, 手动喷雾器等。

1.1.2 氮素与抑制剂双控释尿素的制备工艺 将用量为纯氮质量 0.8% 的 HQ、4% 的 DCD 和两个同量抑制剂 (HQ+DCD) 分别混溶于含粘结剂乙基纤维素的乙醇溶剂中, 85℃ 水浴加热混溶均匀后, 装入手动喷雾器中。然后将筛分好的大颗粒尿素装入转速为 40 r/min 的包衣机的锅中, 预热至 85℃, 旋转抛光 5 min, 用手动喷雾器对尿素颗粒外表面进行喷涂, 保持尿素温度为 85℃, 干燥后制得 3 种涂层尿素肥核。

分别将大颗粒尿素和制备的 3 种肥核装入转速为 40 r/min 包衣机锅中, 旋转预热至 75℃, 将双酚 A 型环氧树脂与固化剂按质量比 10 : 1 配制的混合液均匀喷涂到包衣机锅中的肥料颗粒上, 按尿素与包膜材料质量比为 100 : 1, 保持尿素温度 75℃, 连续包膜 5 次, 分别制得树脂包膜尿素 (CU) 和 HQ 涂层 (CRU1)、DCD 涂层 (CRU2)、HQ 与 DCD 组合涂层 (CRU3) 4 种新型包膜缓/控释尿素。

制备的新型包膜尿素中膜材料质量占肥料总质量的 4.76%, CU 的氮含量为 43.00%; CRU1 的氮含量为 38.30%, HQ 含量为 0.30%; CRU2 的氮含量为 38.30%, DCD 含量为 1.53%; CRU3 的氮含量为 38.30%, HQ 含量为 0.30%, DCD 含量为 1.53%。

### 1.2 田间试验

试验分别在山东省潍坊市农业科学院实验基地和山东农业大学资源与环境学院实验站进行, 土壤类型均为棕壤, 质地分别为粘壤土和砂壤土, 供试土壤基本理化性质见表 1。

采用大田试验, 供试作物为冬小麦 (品种: 济麦 22)。于 2018 年 10 月 21 日播种, 2019 年 6 月 14 日收获。试验共设 6 个处理: 1) 不施氮肥 (CK); 2) 普通尿素 (U); 3) 树脂包膜尿素 (CU); 4) HQ 涂层树脂包膜尿素 (CRU1); 5) DCD 涂层树脂包膜尿素 (CRU2); 6) HQ 与 DCD 混合涂层树脂包膜尿素 (CRU3)。试验小区面积为 30 m<sup>2</sup> (3 m × 10 m), 小麦播种量为 150 kg/hm<sup>2</sup>, 行间距 22.5 cm。每个处理重

表 1 供试土壤基本理化性质  
Table 1 Physical and chemical properties of tested soils

地点 Site	pH	电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) EC	有机质 ( $\text{g}/\text{kg}$ ) Organic matter	有效氮 ( $\text{mg}/\text{kg}$ ) Available N	全氮 ( $\text{g}/\text{kg}$ ) Total N	有效磷 ( $\text{mg}/\text{kg}$ ) Available P	速效钾 ( $\text{mg}/\text{kg}$ ) Available K
潍坊 Weifang	7.16	172.37	14.41	62.01	1.31	22.30	147.65
泰安 Tai'an	6.50	145.04	10.10	36.50	0.82	22.50	95.89

复 3 次, 小区随机排列。肥料施用量标准为 N 240  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  105  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  105  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 磷肥和钾肥分别由过磷酸钙 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  12%) 和氯化钾 ( $\text{K}_2\text{O}$  60%) 提供。4 种包膜肥料处理采用撒肥翻耕方式一次性基施, 普通尿素处理的氮肥基施 50%, 拔节期追施 50%, 磷钾肥料均一次性施入。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 氮素与抑制剂双控释尿素的微结构分析 把肥料颗粒平放在实验台上, 解剖刀垂直切下, 肥料颗粒切成半圆状后, 将样品在真空 IB5.0 离子喷镀仪上喷金, 然后用扫描电镜 (OXFORD FEI 7231) 对包膜肥料的表面、剖面进行扫描拍照。

1.3.2 氮素和抑制剂缓释速率的测定 按国标 GB/T 23348-2009 采用水溶出率法测定控释尿素的养分释放率, 氮采用凯氏定氮法测定<sup>[23]</sup>, HQ 采用碱氧化—比色法测定<sup>[10]</sup>, DCD 采用联二酮分光光度法测定<sup>[24]</sup>。

1.3.3 田间样品的采集与测定 分别于冬小麦的苗期 (12 月 8 日)、拔节期 (4 月 7 日)、开花期 (5 月 5 日)、灌浆期 (5 月 26 日)、成熟期 (6 月 4 日) 采集耕层土壤样品, 并于小麦成熟期测定产量及构成因素。

土壤样品的测定: 土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量采用 2 mol/L KCl 浸提, 流动分析仪分析法测定; 土壤脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定, 以 24 h 土壤中产生的  $\text{NH}_3-\text{N}$  的量表示<sup>[25]</sup> (单位:  $\text{mg}/\text{kg}$ )。

小麦产量及其构成因素的测定: 成熟期在各小区内选取长势均匀一致的区域, 划定 2.0 m  $\times$  6 行 (共计 3  $\text{m}^2$ , 包含一个边行) 的面积用于穗数的调查, 然后人工收割、脱粒, 风干后称重, 并用谷物水分测定仪测定籽粒含水量, 换算为含水量至 12% 的籽粒产量, 即: 小区产量 = 实测产量  $\times$  (1 - 籽粒含水量)/(1 - 12%); 在长势均匀一致的区域随机取 30 个单穗用于每穗粒数的调查; 于小区测产的风干籽粒中随机取样进行粒重调查, 并将数据折算为 12% 含水量标准的粒重。

### 1.4 计算公式及数据处理

初期溶出率 (%) = 24 h 养分溶出量/包膜肥料中养分含量  $\times$  100;

微分溶出率 (%) = (养分累积溶出量/包膜肥料中养分含量 - 初期溶出率)/(浸泡天数 - 1)  $\times$  100;

土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  表观硝化率 (%) =  $\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}) \times 100$ 。

采用 Excel 2007 软件处理数据和绘表, 采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析, 采用最小显著极差法 (LSD) 进行差异显著性检验 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮素与抑制剂双控释尿素的表面与剖面结构特征

在 500 倍和 1000 倍的电镜照片 (图 1-A、B) 中可以看出, 包膜尿素表面成膜完整, 树脂包膜材料能完整地覆盖在颗粒尿素的表面上, 膜质细腻、致密、均匀一致, 表面光滑; 同时, 观察到膜内部的抑制剂在颗粒尿素表面均匀分布。放大 1000 倍偶见膜表面有微孔, 这些微孔的产生, 成为水向包膜尿素核心及尿素与抑制剂溶液向膜外渗透和扩散的通道。

包膜尿素剖面结构的电镜扫描结果 (图 2) 观察表明, 包膜厚度均匀, 表面光滑且膜层致密, 其间孔隙排列纵横交错, 形成了水分进入和尿素与抑制剂溶出膜的通道, 包膜层与肥心接合紧密、牢固, 分界明显, 其中尿素为粒状晶体。膜材料在成膜时分布均匀、结合紧密, 能穿入肥料颗粒的多孔表面, 很好地适应肥料颗粒表面凸凹部分的外形轮廓而将其紧密覆盖。成膜时没有形成断层和孔洞, 说明了膜材料组方和包膜工艺较好。

氮素与抑制剂双控释尿素的剖面观察结果显示, 包膜层均匀一致, HQ 和 DCD 完全按尿素不规则表面走向涂布, 尿素与抑制剂交接处结合严密, 无间隙产生, 包膜层紧覆于抑制剂不规则的外表, 抑制剂表面不规则的突起与凹陷起着膜附着与粘结的纽带作用, 使膜材料在其表面形成一层坚实的壁垒将尿素包裹在中心。但在包膜层中, 包膜层与抑

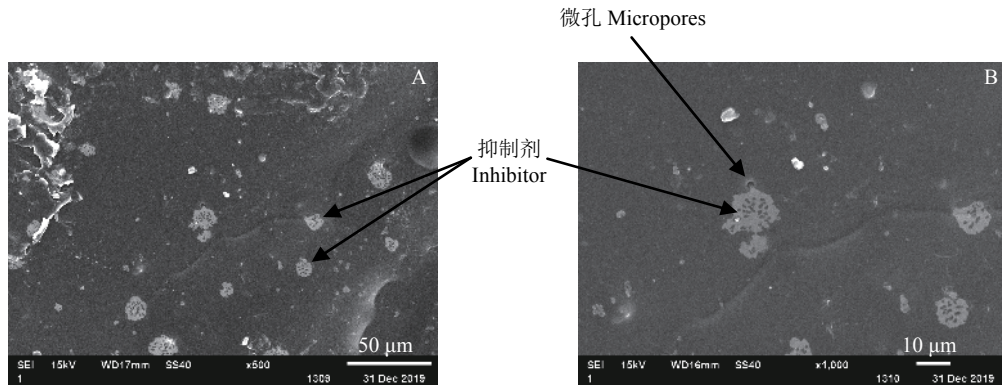


图 1 包膜尿素表面电镜照片

Fig. 1 Images of electroscopic scanning of coated urea surface

[注 (Note) : A—CRU3 肥料表面 Surface of coated urea CRU3, 500×; B—CRU3 肥料表面 Surface of coated urea CRU3, 1000×.]

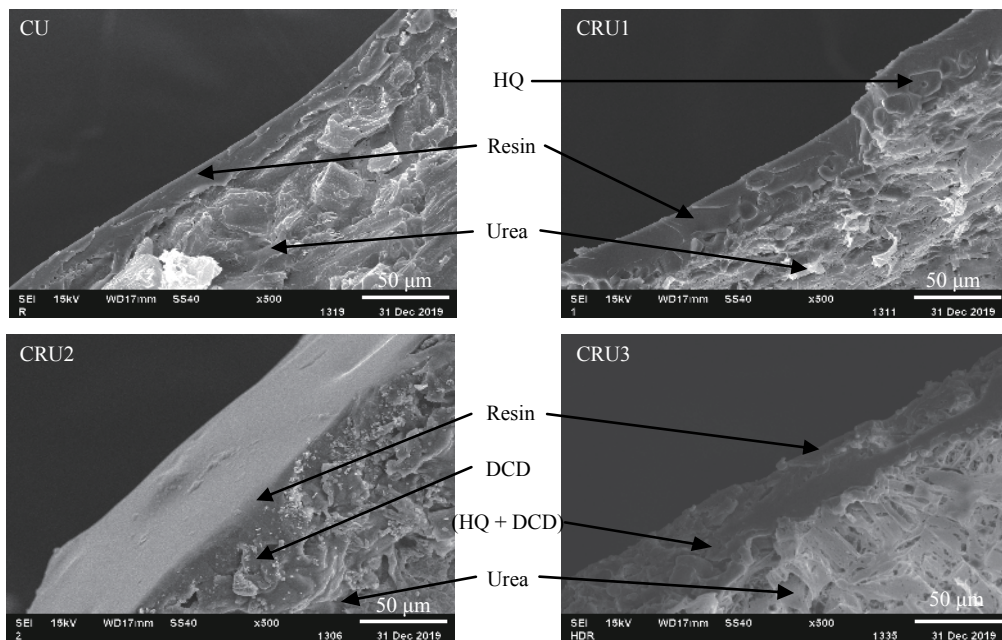


图 2 包膜尿素剖面结构 (500×)

Fig. 2 Sectional view structure of coated urea

[注 (Note) : HQ—HQ 涂层 HQ coating; Resin—树脂层 Resin coating; DCD—DCD 涂层 DCD coating; (HQ+DCD)—(HQ+DCD) 涂层 (HQ+DCD) coating; Urea—肥心尿素 Urea.]

制剂层及抑制剂附着层与尿素表面之间可观察到明显的界限, 抑制剂在尿素表面分布均匀, 与尿素结合紧密。从包膜尿素剖面的电镜照片还可以看出, 抑制剂在包膜层的完全包围之中, 可有效控制抑制剂的溶出, 达到了预期效果, 说明采用尿素与抑制剂共包膜的方式, 可实现尿素和抑制剂释放的同时控制。

## 2.2 氮素与抑制剂双控释尿素中养分与抑制剂的释放特征

由图 3 可见, 树脂包膜尿素氮的第一天溶出率

为 7.59%, 第 3 天溶出率达 17.47%, 微分溶出率 (7 日) 为 3.93%, 肥料 28 天累积释放率为 75.31%。氮素释放期为 42 天, 在第 42 天时, 氮素的累积释放率达到 87.82%, 当培养时间达到 56 天时, 氮素的累积释放率达到 95%。

由图 4 可以看出, HQ 的累积释放率一直高于氮素。试验进行到第 14 天时, HQ 的日释放速率达到最大值 5.26%, 第 28 天时, 氮素的日释放速率达到最大值 2.24%。其中, 氮素和 HQ 第一天的溶出率分别为 1.96%、4.58%, 微分溶出率 (7 日) 分别为 1.01%、2.55%, 氮素释放期为 56 天, HQ 释放期为

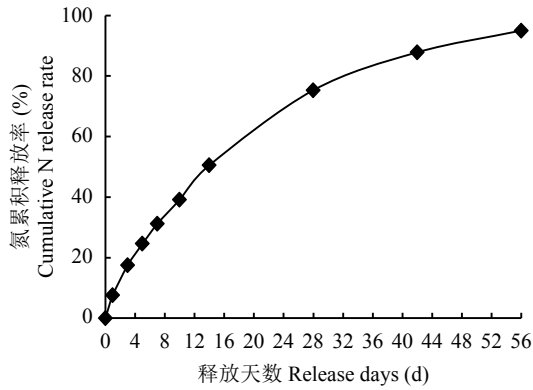


图 3 在 25°C 水中树脂包膜尿素 (CU) 氮素的累积释放曲线

Fig. 3 Cumulative N release curve of resin coated urea (CU) in 25°C water

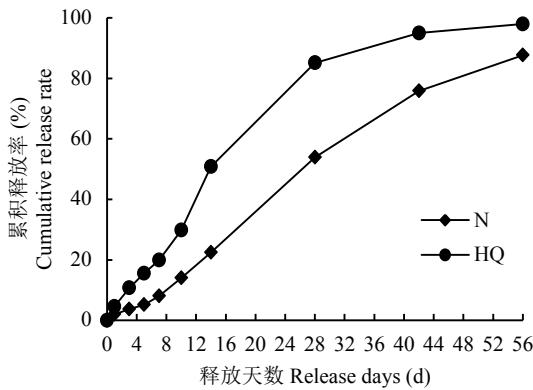


图 4 在 25°C 水中脲酶抑制剂 HQ 涂层树脂包膜尿素 (CRU1) 氮素与 HQ 的累积释放曲线

Fig. 4 N and HQ cumulative release curves of HQ and resin coated urea (CRU1) in 25°C water

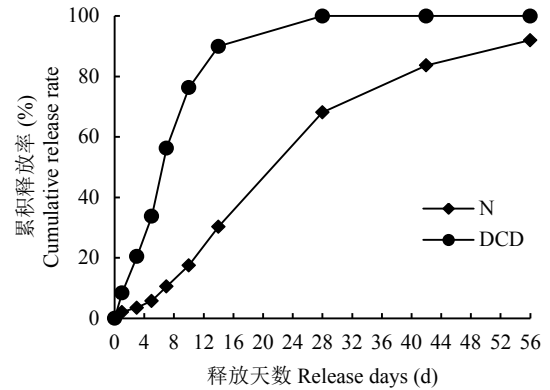


图 5 在 25°C 水中硝化抑制剂涂层树脂包膜尿素 (CRU2) 氮素与 DCD 的累积释放曲线

Fig. 5 N and DCD cumulative release curves of DCD and resin coated urea (CRU2) in 25°C water

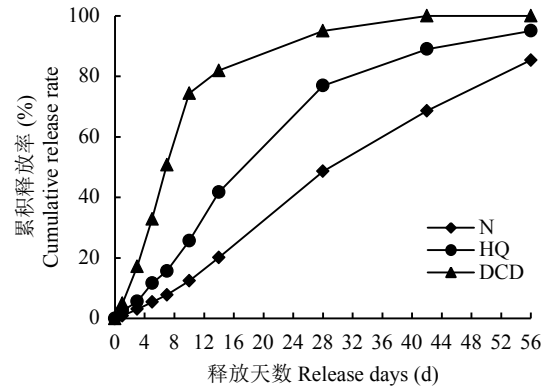


图 6 在 25°C 水中 HQ 与 DCD 组合涂层树脂包膜尿素 (CRU3) 氮素与抑制剂的累积释放曲线

Fig. 6 N and inhibitor cumulative release curves of HQ+DCD and resin coated urea (CRU3) in 25°C water

28 天, 肥料 28 天氮素累积释放率为 53.88%, HQ 累积释放率为 85.13%。表明树脂包膜不但可以减缓尿素氮的释放速率, 也可明显降低 HQ 的溶解速率(同等条件下, 不包膜 HQ 遇水即溶)。

从图 5 可以看出, DCD 和氮素均能缓慢释放, 但 DCD 的释放速率明显快于 N 素, 在第 10 天时 DCD 的累积释放率已达 76.31%, 而氮素的累积释放率只有 17.57%, DCD 的释放速率明显高于氮素, 并在一定程度上抑制了尿素氮的释放。CRU2 中氮素的释放期是 56 天, 第一天溶出率为 2.12%, 微分溶出率(7 日)为 1.40%; DCD 的释放期为 14 天, 初期溶出率为 8.46%, 微分溶出率(7 日)为 7.97%。肥料 28 天氮素累积释放率 68.16%, DCD 累积释放率 100%。同等试验条件下, 不包膜 DCD 即溶于水, 而树脂包膜能减缓 DCD 的溶解速率, 为延长其持效期提供了保障。

从双抑制剂涂层树脂包膜尿素 (CRU3) 中氮素和两个抑制剂的释放曲线 (图 6) 可以看出, HQ 和 DCD 均能缓慢释放, 但释放速率均高于氮素。DCD 的累计释放率一直高于 HQ, 第 14 天时, DCD 累积释放率达到 81.93%, HQ 累积释放率为 41.76%。CRU3 肥料中, 氮素第一天溶出率为 0.89%, 微分溶出率(7 日)为 1.15%, 释放期为 56 天; HQ 的初期溶出率为 2.54%, 微分溶出率(7 日)为 2.19%, 释放期为 42 天; DCD 的初期溶出率为 4.99%, 微分溶出率(7 日)为 7.63%, 释放期为 14 天。肥料 28 天氮素累积释放率 48.59%, HQ 累积释放率 76.91%, DCD 累积释放率 95%。尽管包膜后 HQ 和 DCD 的释放速率均高于氮素, 但与不包膜抑制剂相比, 树脂包膜能实现抑制剂溶解速率的降低, 为延长抑制剂减缓氮素转化的持效期提供了可能。

### 2.3 氮素与抑制剂双控释尿素对土壤供氮能力的影响

2.3.1 双控释尿素对土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量的影响 由图 7 可见, 潍坊、泰安两地田间土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量的变化趋势基本一致, 且各处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。与普通尿素 U 相比, 在小麦苗期, 潍坊试验点土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量 CU、CRU1、CRU2、CRU3 处理分别降低了 12.97%、19.28%、6.23%、14.54%, 在泰安试验点分别降低了 9.84%、12.24%、6.16%、9.15%, 表明包膜尿素的缓释作用使氮素缓慢释放, 从而降低了冬小麦生长前期土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量。在冬小麦拔节期, 两地各施肥处理土壤铵态氮含量差异不显著。在开花期, 包膜尿素

处理土壤中铵态氮含量明显高于普通尿素处理。在灌浆期, 3 个涂层包膜尿素处理土壤中铵态氮含量显著高于无涂层的树脂包膜尿素处理, 潍坊试验点 3 个涂层包膜尿素处理间差异不显著, 而泰安试验点 CUR3 显著高于 CUR1, 为小麦生长后期氮素的持续供应提供了保障。

2.3.2 双控释尿素对土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量的影响 如图 8 所示, 潍坊、泰安两地田间土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量变化趋势基本一致, 不同时期各处理土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量存在一定差异。在小麦苗期, 两地间 U 处理土壤中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 说明 U 处理前期尿素大量水解, 释放出来的  $\text{NH}_4^+$  被氧化形成了  $\text{NO}_3^-$ 。小麦拔节期, 与 CU 相比, 包膜与抑制剂

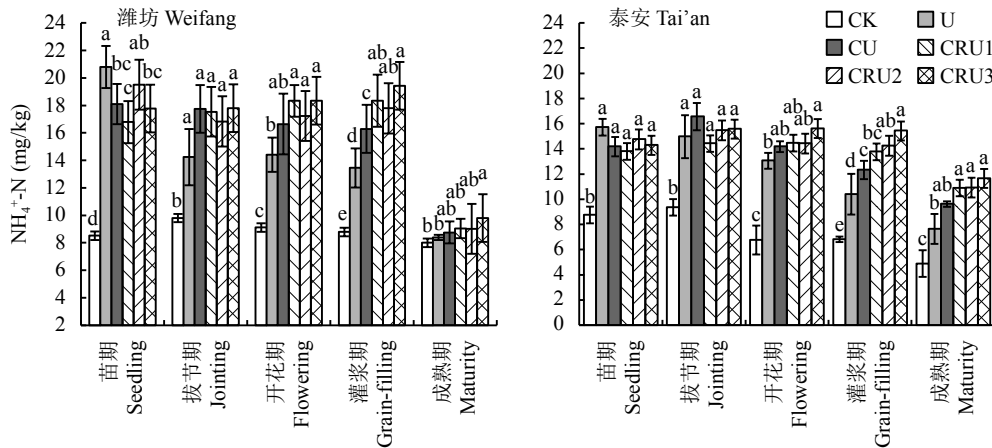


图 7 小麦不同生育期土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量

Fig. 7 Soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  contents at different growing stages of winter wheat

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示相同时期不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )]

Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among different treatments in the same period ( $P < 0.05$ .)

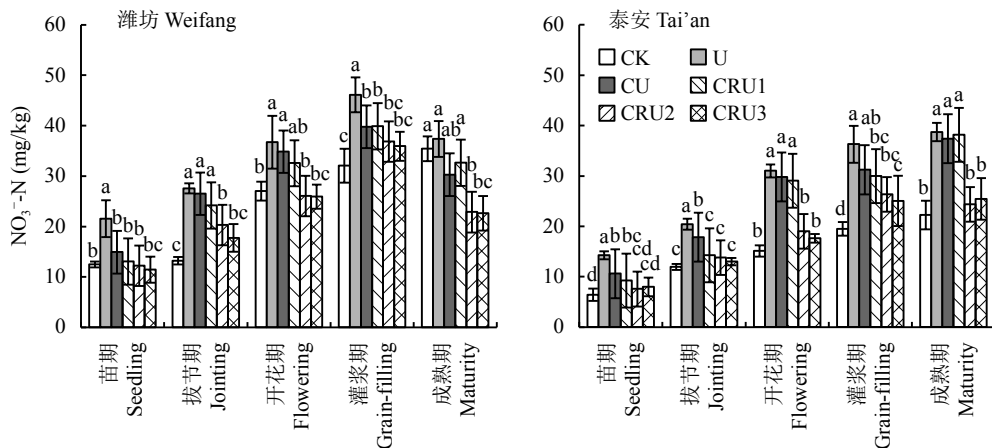


图 8 小麦不同生育期土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量

Fig. 8 Soil  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents at different growing stages of winter wheat

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示相同时期不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )]

Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among different treatments in the same period ( $P < 0.05$ .)

结合的 CRU1、CRU2、CRU3 处理土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量在潍坊试验点田间土壤分别降低了 8.85%、23.45%、33.07%；泰安试验点田间土壤分别显著降低了 20.02%、22.80%、27.10%。说明抑制剂 HQ、DCD 能够抑制尿素水解后  $\text{NO}_3^-$ -N 的形成，且在两个试验点具有相同的效果。小麦开花期后，CRU2、CRU3 处理能使土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 维持在较低水平，且明显低于其他处理；而与 CU 相比，CRU1 处理土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量差异不显著。开花期，与 CRU1 相比，CRU2、CRU3 处理在潍坊试验点田间土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量分别降低了 20.03%、20.44%；在泰安试验点分别显著降低了 34.53%、39.33%，说明硝化抑制剂 DCD 能对土壤中  $\text{NH}_4^+$  的硝化起到显著抑制作用，包膜与 DCD 结合能够有效降低土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量。其中 CRU3 处理脲酶抑制剂 HQ 和硝化抑制剂 DCD 的协同作用，使土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量处于较低水平。

### 2.3.3 双控释尿素对土壤 $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率的影响

由表 2 可知，不同处理土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率在潍坊、泰安两地田间土壤上变化趋势基本一致。在小麦整个生育期，普通尿素 (U) 处理土壤中  $\text{NH}_4^+$  的硝化作用始终保持在较高水平。小麦生长苗期，包膜尿素处理的土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率显著低于普通尿素处理 ( $P < 0.05$ )，与 U 相比，潍坊地块中

CU、CRU1、CRU2 和 CRU3 处理土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率分别显著下降了 10.82%、13.44%、24.26%、23.31%，泰安地块中分别显著下降了 10.08%、15.66%、29.10%、29.38%，说明由于包膜尿素中 N 的缓释作用，使前期尿素水解的  $\text{NH}_4^+$ -N 被小麦吸收利用，不会造成  $\text{NH}_4^+$ -N 的大量积聚，从而显著减少  $\text{NH}_4^+$  的氧化。与 CU 相比，两地 CRU1 处理土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率差异不显著，CRU2、CRU3 处理在小麦生育期内能显著降低土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率 ( $P < 0.05$ )，其中小麦成熟期时，在潍坊试验点 CRU2、CRU3 处理分别显著降低土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率 6.90%、9.50%；在泰安试验点分别显著降低土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率 13.18%、14.08%，说明硝化抑制剂 DCD 及其与脲酶抑制剂 HQ 组合，能够显著降低小麦生长期土壤中  $\text{NH}_4^+$  的硝化作用而导致的 N 损失。其中，CRU3 处理土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率在小麦生育期内长时间维持在较低水平，说明 HQ 与 DCD 组合既能抑制氨挥发，又能抑制  $\text{NH}_4^+$  氧化，使土壤  $\text{NH}_4^+$  含量在短期内含量增加，导致土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 表观硝化率低于 CRU2 处理。

2.3.4 双控释尿素对土壤脲酶活性的影响 如图 9 所示，两地点 CK 处理的土壤脲酶活性均处于较低的水平；除小麦成熟期外，其它生长期 CRU1、CRU3 处理土壤脲酶活性均低于其它施肥处理。与

表 2 土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 的表观硝化率 (%)

Table 2 Apparent nitrification rate of  $\text{NH}_4^+$ -N in soil

地点 Site	处理 Treatment	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Grain-filling stage	成熟期 Maturity stage
潍坊 Weifang	CK	59.44 ± 0.80 a	57.38 ± 2.61 b	74.73 ± 1.61 a	78.37 ± 2.18 a	81.58 ± 0.04 a
	U	50.66 ± 4.73 b	66.03 ± 2.50 a	71.59 ± 4.57 ab	77.34 ± 3.05 a	81.56 ± 1.61 a
	CU	45.18 ± 0.37 c	59.89 ± 3.42 ab	67.75 ± 1.51 bc	70.98 ± 0.64 b	76.94 ± 4.17 a
	CRU1	43.85 ± 1.73 cd	57.89 ± 4.86 b	63.79 ± 4.47 cd	68.43 ± 3.21 bc	78.21 ± 2.60 a
	CRU2	38.37 ± 3.46 d	54.89 ± 4.42 bc	59.90 ± 3.55 d	67.45 ± 0.34 bc	71.63 ± 2.72 b
	CRU3	38.85 ± 3.93 d	49.84 ± 5.29 c	58.56 ± 2.32 d	64.85 ± 2.07 c	69.63 ± 1.56 b
泰安 Tai'an	CK	42.09 ± 2.85 b	56.07 ± 1.76 a	69.20 ± 3.20 a	74.04 ± 0.85 ab	82.02 ± 5.82 a
	U	47.52 ± 2.17 a	57.75 ± 1.66 a	70.34 ± 0.80 a	77.58 ± 4.24 a	83.54 ± 1.80 a
	CU	42.73 ± 1.80 b	51.66 ± 3.80 b	67.67 ± 1.55 a	71.67 ± 0.53 bc	79.50 ± 0.79 a
	CRU1	40.08 ± 2.78 b	49.85 ± 2.33 bc	66.58 ± 2.65 a	68.39 ± 2.00 cd	77.74 ± 0.82 a
	CRU2	33.69 ± 1.37 c	47.05 ± 1.98 c	56.82 ± 2.06 b	64.88 ± 1.04 de	69.02 ± 3.75 b
	CRU3	35.56 ± 3.49 c	45.65 ± 2.42 c	53.00 ± 0.22 c	61.48 ± 4.56 e	68.31 ± 4.85 b

注 (Note): 同列数值后不同字母表示肥料处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters mean significant difference among fertilizer treatments at 0.05 level.



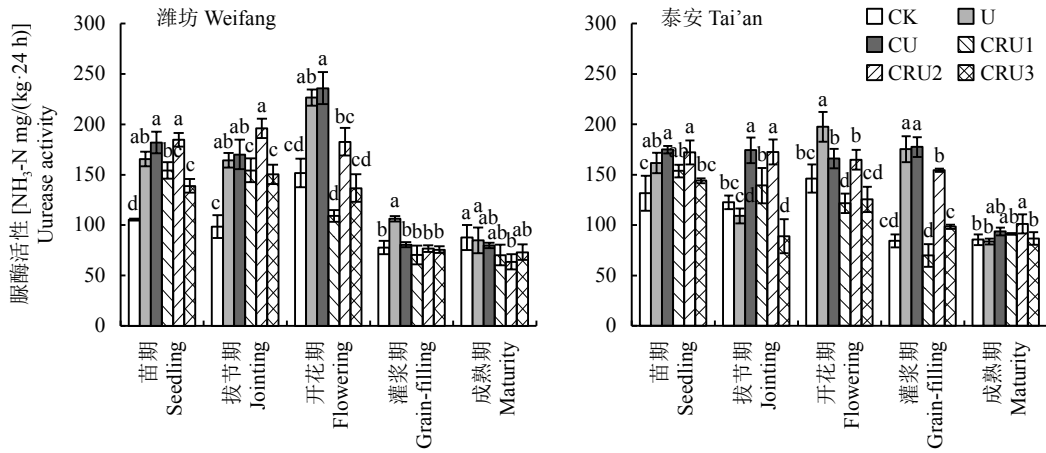


图 9 不同地区土壤脲酶活性变化

Fig. 9 Changes of soil urease activity in Weifang and Tai'an

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示相同时期不同处理间差异显著

Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same period ( $P < 0.05$ ).]

CU 相比, 在小麦苗期, 潍坊试验点 CRU1、CRU3 处理土壤脲酶活性分别降低 15.28%、23.63%; 在泰安试验点分别降低 12.13%、17.61%; 在灌浆期, 与 CU 相比, 在潍坊试验点 CRU1、CRU3 处理分别降低 12.53%、0.60%, 在泰安试验点分别降低 60.68%、44.56%, 说明脲酶抑制剂 HQ 对土壤脲酶活性有一定的抑制作用, 包膜与 HQ 结合还可延长 HQ 的作用时间。与 CRU1、CRU3 相比, CRU2 对土壤脲酶活性的影响较小。本试验结果表明, CRU3

处理可使土壤脲酶活性维持在一个较低水平, 比 HQ 单独与包膜结合施用效果好。

#### 2.4 氮素与抑制剂双控释尿素对小麦产量的影响

由表 3 可知, 潍坊和泰安两地田间冬小麦产量变化趋势基本一致, 说明不同地块间氮素与抑制剂双控释尿素对冬小麦产量的影响相同。与 CK 相比, 各施肥处理均能提高小麦产量。与 CU 相比, CRU1、CRU2、CRU3 在潍坊试验点分别增产 23.38%、23.13%、38.79%, 在泰安试验点分别增产

表 3 小麦产量及其构成因素

Table 3 Yield and yield components of wheat

地点 Site	处理 Treatment	穗数 ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ ) Spike number	穗粒数 Kernel number per spike	千粒重 (g) 1000-kernel weight	产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) Yield
潍坊 Weifang	CK	476.00 $\pm$ 6.00 d	40.27 $\pm$ 4.36 c	48.27 $\pm$ 0.57 a	7859.78 $\pm$ 817.07 c
	U	555.33 $\pm$ 18.15 bc	39.35 $\pm$ 0.68 c	47.47 $\pm$ 1.01 a	8816.83 $\pm$ 382.00 bc
	CU	515.33 $\pm$ 30.75 cd	41.40 $\pm$ 2.36 bc	46.27 $\pm$ 0.40 a	8373.56 $\pm$ 258.12 c
	CRU1	576.00 $\pm$ 22.27 ab	43.60 $\pm$ 2.20 abc	48.33 $\pm$ 1.36 a	10332.01 $\pm$ 997.41 ab
	CRU2	556.00 $\pm$ 49.15 bc	45.85 $\pm$ 2.02 ab	47.23 $\pm$ 2.61 a	10310.69 $\pm$ 1959.12 ab
	CRU3	624.00 $\pm$ 20.00 a	47.00 $\pm$ 2.17 a	46.63 $\pm$ 0.67 a	11622.33 $\pm$ 603.23 a
泰安 Tai'an	CK	292.48 $\pm$ 54.27 c	30.80 $\pm$ 2.00 c	40.43 $\pm$ 0.81 a	3066.67 $\pm$ 305.51 d
	U	355.26 $\pm$ 90.33 bc	31.87 $\pm$ 1.18 bc	39.40 $\pm$ 3.47 a	3666.67 $\pm$ 205.15 cd
	CU	404.01 $\pm$ 33.35 abc	32.80 $\pm$ 2.12 b	37.03 $\pm$ 2.67 a	4200.00 $\pm$ 800.00 bc
	CRU1	468.22 $\pm$ 28.14 ab	30.00 $\pm$ 3.00 c	37.63 $\pm$ 3.51 a	4466.67 $\pm$ 305.51 bc
	CRU2	454.64 $\pm$ 10.80 ab	31.13 $\pm$ 3.90 bc	39.00 $\pm$ 1.00 a	4600.00 $\pm$ 400.00 b
	CRU3	479.84 $\pm$ 17.50 a	34.00 $\pm$ 0.75 a	38.97 $\pm$ 1.54 a	5400.00 $\pm$ 200.00 a

注 (Note) : 同列数据后不同小写字母表示同一地点处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters mean significant difference among treatments in the same experimental site ( $P < 0.05$ ).

6.36%、9.52%、28.57%，不同地区间氮素与抑制剂双控释尿素均能增加小麦产量，其中以 CRU3 增产最显著。从产量构成因素来看，各处理间千粒重差异不显著 ( $P > 0.05$ )，穗数和穗粒数是导致产量差异的关键因素，与 CU 相比，潍坊试验点 CRU1、CRU2、CRU3 的穗数分别增加了 11.77%、7.89%、21.09%；泰安试验点的穗数分别增加了 15.87%、12.51%、18.74%，且两地间表现出相同的变化趋势。我们认为包膜与生化抑制剂结合型尿素通过促进分蘖，增加了小麦穗数，进而增加小麦产量。其中 CRU3 处理在两地间的小麦穗数和穗粒数均高于其他处理，说明将包膜与两种抑制剂结合能有效提高氮素的肥效，并增加小麦产量。

### 3 讨论

#### 3.1 氮素与抑制剂双控释尿素的微观结构及养分与抑制剂的释放特征评价

扫描电镜结果表明 (图 1、图 2)，采用氮素与抑制剂双控技术制成的缓释尿素，表面光滑，固体颗粒凸出较少，包膜厚度较为均匀，膜材料能完整地覆盖在肥核的表面，抑制剂在尿素表面分布均匀，与尿素结合紧密，抑制剂层在包膜层的完全包围之中，包膜可有效控制尿素和抑制剂的溶出。此外，本研究所用的树脂来源广泛、价格低廉，可以回收，既可以消纳塑料废弃物，又可以改善农业生态环境。

另外，新型包膜尿素的研制，首先需在纯水中进行养分释放曲线和控释特征的研究，以评价其养分的控制与释放性能<sup>[26]</sup>。本试验通过测定 4 种氮素与抑制剂双控释尿素在 25℃ 静水条件下的养分释放规律，发现与 CU 相比，其余 3 种具有包膜与抑制剂涂层的双控释尿素使氮素的缓释作用得到强化，其中氮素初期溶出率降低了 72.00%~88.31%，微分溶出率降低 64.38%~74.30%，释放期由 42 天延长到了 56 天，说明树脂包膜与抑制剂涂层结合能强化包膜尿素中氮素的控制释放。这可能是由于 3 种包膜与抑制剂结合型尿素肥料是将抑制剂喷涂到大颗粒尿素表面先形成抑制剂涂层，然后将带抑制剂涂层的尿素再用热固型树脂包膜，而包膜与抑制剂涂层的共包被增强了包膜尿素的疏水性能，强化了控释效果，从而延长了氮素的释放期。其中以 CRU3 处理，即包膜与 HQ 及 DCD 结合型尿素对尿素氮的控制释放作用最强。

CRU1 中尿素和 HQ 在水中均能缓慢释放 (图 4)，

减缓尿素和 HQ 的溶解，但 HQ 从包膜中溶出的速率明显高于尿素，这可能是由于 HQ 的分子极性较弱，所含的—OH 的电子云向苯环偏移较多，而尿素分子的极性较高，所含的—NH<sub>2</sub> 易与包膜高分子聚合物结合，因而尿素通过高分子聚合物包膜层的速率要慢于 HQ。张丽莉等<sup>[10]</sup>研究包膜与 HQ 结合型尿素的溶出特征，结果表明 HQ 从包膜中溶出的速率明显快于尿素，这与本研究结果一致。树脂包膜 DCD 涂层尿素 CRU2 中尿素和 DCD 的溶出是不同步的 (图 5)，DCD 的溶出速率明显高于尿素，这可能是由于用树脂包膜控制 DCD 的溶出比较困难。尽管 CRU2 肥料中 DCD 与尿素溶出并不同步，但包膜后的 DCD 仍达到了缓释效果，有效降低了溶解速率，延长了作用时间。张海军<sup>[12]</sup>将尿素包膜与添加硝化抑制剂结合起来能使尿素与 DCD 缓慢溶出，减小了 DCD 淋失的可能性，这与本研究结果一致。CRU3 肥料是将 HQ 与 DCD 混合涂层大颗粒尿素后包膜，其养分释放曲线 (图 6) 表明，CRU3 肥料中 HQ 与 DCD 两者的溶出互不影响，释放特征与 CRU1 中的 HQ 和 CRU2 中的 DCD 一致，并与尿素均达到了缓释效果，两者与包膜的共同作用对尿素的控释效果最强。综上，4 种氮素与抑制剂双控释尿素的氮素与抑制剂的缓释效应均达到了预期效果，实现了对尿素和抑制剂释放的双控制，既有效控制尿素溶出，又延长了抑制剂对氮素转化的持效期，从而实现了对尿素溶出与转化的双重调控。

#### 3.2 施用氮素与抑制剂双控释尿素对土壤供氮能力的影响

尿素施入土壤后，在适宜的土壤条件下迅速溶解，并在土壤脲酶的作用下水解形成 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N<sup>[27]</sup>，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在土壤微生物的作用下氧化成 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N<sup>[28]</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 均可被作物直接吸收利用，但由于尿素水解时间短，水解的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 来不及被作物吸收利用，导致短期内土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量升高及 NH<sub>3</sub> 的挥发损失<sup>[10]</sup>，而氧化产生的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 易发生淋洗进入地下水，造成氮素损失和对环境的污染。前人研究表明，尿素包膜能够将尿素释放周期延长，克服尿素水解过快的缺点<sup>[13]</sup>；而添加生化抑制剂能控制尿素在土壤中的转化，其中脲酶抑制剂通过降低土壤脲酶的活性减缓尿素水解，从而减少氨的挥发损失，硝化抑制剂通过对铵态氮硝化作用的抑制，降低铵态氮向硝态氮转化的速率<sup>[15]</sup>。本试验研究表明，在肥力水平差异较大的地块上，包膜与抑制剂结合均能进一步提高土壤供氮能力，增强氮素对作物的持续

供应。巴闯等<sup>[21]</sup>也证实包膜与抑制剂联合调控可以进一步提升包膜尿素的应用效果,减少氮素损失,其中抑制剂涂层尿素后包膜作用效果最佳,这与本研究结果相一致。在本研究中,含有 HQ 涂层的树脂包膜尿素与普通树脂包膜尿素相比,能够将土壤脲酶活性在小麦生育期内维持在较低的水平(图 9),延缓尿素的水解,增强土壤的持续供氮能力。这是由于尿素和 HQ 同时缓慢的溶出,增加了 HQ 的作用效果,有利于前期维持土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的适宜浓度,增加小麦中后期  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量,强化土壤中氮素对作物的持续供应能力。张丽莉等<sup>[10]</sup>研究表明,尿素与 HQ 同时缓慢地溶出更加有效地控制了尿素水解的过程,这与本研究结果一致。含有 DCD 涂层的包膜尿素对土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化有明显的抑制作用,显著降低了土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  表观硝化率(表 2),从而减少土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的淋溶损失,张海军<sup>[12]</sup>研究也表明尿素和 DCD 的控制溶出能明显提高其硝化抑制效果。其中 CRU3 处理包膜与 HQ+DCD 结合型控效尿素,既能降低土壤脲酶活性,延缓尿素水解,又对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化起到明显抑制作用,减少了氮素损失,有效提高了氮素利用率,相同施氮量下可显著强化土壤的氮素供应能力。

### 3.3 施用氮素与抑制剂双控释尿素对小麦产量的影响

研究发现树脂包膜尿素能显著提高冬小麦产量<sup>[29]</sup>,脲酶/硝化抑制剂型缓释尿素处理的小麦产量也高于普通尿素处理<sup>[28]</sup>。前人研究表明包膜尿素与抑制剂结合能够促进作物生长,增加作物产量<sup>[30]</sup>。本研究表明,研制的氮素与抑制剂双控释尿素能显著提高冬小麦产量,这与巴闯等<sup>[21]</sup>包膜/抑制剂联合调控尿素在玉米施用上的研究结果一致。这是由于将抑制剂涂层于尿素表面后,再用树脂包膜,既强化了尿素的疏水性能,又能使氮素与抑制剂同步缓释,实现对尿素溶出与转化的多重控制,进而使养分供应与作物生长需求同步,减少氮素损失,增加作物吸收氮素的量,达到增产的效果。而包膜与不同抑制剂涂层尿素结合处理中以 CRU3 处理对冬小麦增产效果最显著,这是由于与 CRU1 和 CRU2 相比,CRU3 使尿素溶出与转化过程得到更加有效的控制,进一步减少了氮素损失,促进了小麦增产。本研究还发现单位面积穗数和穗粒数是影响冬小麦产量的关键因素,说明包膜与抑制剂结合型尿素在小麦的植物营养临界期和养分最大效率期均能保证土壤均衡、

足量供应氮素,通过促进小麦分蘖和小穗分化,增加了小麦的穗数和穗粒数,提高了小麦产量。

## 4 结论

热固型环氧树脂与脲酶/硝化抑制剂涂层联合包膜双控释尿素表面成膜完整,抑制剂与尿素结合严密,且抑制剂涂层在包膜层的完全包围之中,实现了对尿素和抑制剂释放的双重调控。

施用脲酶抑制剂 HQ 涂层大颗粒尿素后进行树脂包膜的控释肥能降低土壤脲酶活性,有效地控制尿素水解;施用硝化抑制剂 DCD 涂层大颗粒尿素后进行树脂包膜的控释肥能抑制土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化作用,减少  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的淋溶损失。双抑制剂涂层大颗粒尿素后包膜可提高土壤氮素持续供应能力,对氮素的控制释放及控制转化作用最强,小麦产量最高。因此,以尿素与 HQ 和 DCD 共包膜处理的双控释尿素效果最优。

### 参 考 文 献:

- [1] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.  
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 783-795.
- [2] 张卫峰,马林,黄高强,等.中国氮肥发展、贡献和挑战[J].中国农业科学,2013,46(15):3161-3171.  
Zhang W F, Ma L, Huang G Q, et al. The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3161-3171.
- [3] Zhou L K, Chen L J, Li R H, et al. Behavior of soil urea N and its regulation through incorporating with inhibitors hydroquinone and dicyandiamide[C]. Ji L, Chen G X, Schnug E, et al. Fertilization in the third millennium-fertilizer, food security and environmental protection proceedings (Vol. II)[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2003: 1175-1192.
- [4] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等.冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J].中国农业科学,2002,35(12):1493-1499.  
Ju X T, Liu X J, Zou G Y, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [5] Azeem B, Kushaari K Z, Man Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer[J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181(1): 11-21.
- [6] 牟林,韩晓日,于成广,等.不同无机矿物应用于包膜复合肥的氮素释放特征及其评价[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1179-1188.  
Mu L, Han X R, Yu C G, et al. N-release characteristics of compound fertilizers coated with various minerals and its evaluation[J]. *Journal*

- of *Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(5): 1179–1188.
- [7] Hayashi K, Nishimur S, Yagi K. Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: Rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2/3): 485–494.
- [8] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, *et al.* How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 636–639.
- [9] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2018, 24(1): 95–104.
- Lu Y H, Nie J, Liao Y L, *et al.* Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 95–104.
- [10] 张丽莉, 武志杰, 陈利军, 等. 包膜与氢醌结合对尿素释放及水解的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1112–1117.
- Zhang L L, Wu Z J, Chen L J, *et al.* Effect of coating and hydroquinone incorporation on urea-N release and its hydrolysis[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 1112–1117.
- [11] 高祥照, 马文奇, 杜森, 等. 我国施肥中存在问题的分析[J]. *土壤通报*, 2001, 32(6): 258–261.
- Gao X Z, Ma W Q, Du S, *et al.* Current status and problems of fertilization in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(6): 258–261.
- [12] 张海军. 包膜与添加抑制剂结合型尿素的控效机理[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所博士学位论文, 2004.
- Zhang H J. Combining effect of coating and inhibitor incorporation on urea-N release, transformation and agricultural efficiency[D]. Shenyang: PhD Dissertation of Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [13] 杜建军, 廖宗文, 王新爱, 等. 高吸水性树脂包膜尿素的结构特征及养分控/缓释性能[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(7): 1447–1455.
- Du J J, Liao Z W, Wang X A, *et al.* Structure and nutrient controlled/slow release characteristics of super absorbent polymer coated urea[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(7): 1447–1455.
- [14] 黄承彪. 复合矿物包膜尿素在土壤中的氮素释放研究[J]. 福建师大福清分校学报, 2008, 2(1): 35–39.
- Huang C B. The characteristics of CMMCU-N releasing and effect on different soil conditions[J]. *Journal of Fuqing Branch of Fujian Normal University*, 2008, 2(1): 35–39.
- [15] 徐星凯, 周礼恺, Oswald Van Cleemput. 脲酶抑制剂/硝化抑制对土壤中尿素氮转化及形态分布的影响[J]. *土壤学报*, 2000, 37(3): 339–345.
- Xu X K, Zhou L K, Oswald Van Cleemput. Effect of urease/nitrification inhibitors on the transformation and morphological distribution of urea nitrogen in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 339–345.
- [16] 周礼恺, 武冠云, 张志明, 等. 脲酶抑制剂氢醌在提高尿素肥效中的作用[J]. *土壤学报*, 1998, 25(2): 191–198.
- Zhou L K, Wu G Y, Zhang Z M, *et al.* The effect of urease inhibitor hydroquinone on urea fertilizer efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 25(2): 191–198.
- [17] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, *et al.* Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 189: 136–144.
- [18] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 稳定性肥料发展与展望[J]. *植物营养与肥科学报*, 2017, 23(6): 1614–1621.
- Wu Z J, Shi Y L, Li D P, *et al.* The development and outlook of stabilized fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1614–1621.
- [19] Hou J, Fan Z Y, Dong Y J, *et al.* Effects of coated urea amended with biological inhibitors on physiological characteristics, yield and quality of peanut[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, 45: 896–911.
- [20] 张丽莉, 武志杰, 陈利军, 等. 双氰胺与尿素共包膜对  $\text{NH}_4^+$ -N 硝化及  $\text{NO}_3^-$ -N 淋溶的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1508–1515.
- Zhang L L, Wu Z J, Chen L J, *et al.* Effect of coating and dicyandiamide incorporation on  $\text{NH}_4^+$  nitrification and  $\text{NO}_3^-$  leaching[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1508–1515.
- [21] 巴闯, 杨明, 邹洪涛, 等. 包膜/抑制剂联合调控对农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放和氨挥发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6): 1291–1299.
- Ba C, Yang M, Zou H T, *et al.* Combined effects of coating/inhibitors on  $\text{N}_2\text{O}$  emission and ammonia volatilization in farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1291–1299.
- [22] 宋以玲, 贺明荣, 董元杰, 等. 硝化抑制剂型包膜肥料对玉米生理特性、产量、品质的影响[J]. *河北科技师范学院学报*, 2015, 29(1): 6–13.
- Song Y L, He M R, Dong Y J, *et al.* Effects of nitrification inhibitor fly ash coated slow release fertilizer on physiological characteristics yield and quality of maize[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2015, 29(1): 6–13.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000. 205–226.
- Lu R K. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 205–226.
- [24] 赵牧秋, 蔡桂佳, 史云峰. 水中双氰胺含量的联二酮分光光度测定法[J]. *环境与健康杂志*, 2014, 31(8): 713–715.
- Zhao M Q, Cai G J, Shi Y F. Determination of dicyandiamide in water by spectrophotometry with vicinal diketones[J]. *Journal of Environment Health*, 2014, 31(8): 713–715.
- [25] 关松荫. 土壤酶及研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- Guan S Y. Soil enzymes and research methods[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986.
- [26] 李东坡, 武志杰, 梁成华. 包膜及其与生化抑制剂结合型尿素在草甸棕壤中尿素态氮溶出特征[J]. *植物营养与肥科学报*, 2010, 16(1): 214–218.
- Li D P, Wu Z J, Liang C H. Nitrogen release characteristics of coated urea amended with biological inhibitors in meadow brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(1): 214–218.
- [27] 张文学, 王萍, 孙刚, 等. 脲酶抑制剂不同用量对土壤氮素供应的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (6): 38–44.
- Zhang W X, Wang P, Sun G, *et al.* Effects of urease inhibitor

- addition rate on nitrogen transformation in paddy soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, (6): 38–44.
- [28] 华建峰, 蒋倩, 施春健, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(1): 94–98.  
Hua J F, Jiang Q, Shi C J, *et al.* Effects of urease/nitrification inhibitors on soil urease activity, soil available N and the yield of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 94–98.
- [29] 郑文魁, 李成亮, 窦兴霞, 等. 不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 162–167, 174.  
Zheng W K, Li C L, Dou X X, *et al.* Effects of different types of controlled release urea on wheat yield and biochemical properties of soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 162–167, 174.
- [30] 侯俊, 董元杰, 李光宗, 等. 硝化抑制剂型包膜复合肥的氮素释放特征及其对大白菜生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 250–253, 259.  
Hou J, Dong Y J, Li G Z, *et al.* N-release characteristics of coated compound fertilizers added by nitrification inhibitor and their effects on Chinese cabbage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 250–253, 259.