

# 改性尿素追施对冬小麦和夏玉米季氮素挥发和淋溶的影响

肖强<sup>1,2</sup>, 李丽霞<sup>1,2</sup>, 李鸿雁<sup>1,2</sup>, 衣文平<sup>1,2</sup>, 邹国元<sup>1,2</sup>, 刘建斌<sup>1,2</sup>, 孙世友<sup>3</sup>

(1.北京市农林科学院植物营养与资源研究所,北京 100097;

2.北京市缓控释肥料工程技术研究中心,北京 100097;3.河北省农林科学院农业资源环境研究所,石家庄 050051)

**摘要:**以NBPT(N-丁基硫代磷酰三胺)和DMPP(3,4-二甲吡唑磷酸盐)为复合抑制剂,利用转鼓喷涂工艺,开发出新型复合型抑制剂涂覆尿素肥料,采用扫描电镜和能谱仪分析其涂覆效果。通过田间试验系统对比评价了追施不同氮肥对调控氮素的特征效果。试验设置5个处理:(1)不施氮肥(CK);(2)农民习惯追施尿素(CU);(3)优化追施尿素(CUU);(4)优化追施抑制剂涂覆尿素(CUY1);(5)优化追施抑制剂涂覆尿素(CUY2)。在夏玉米喇叭口期、冬小麦拔节期追施氮肥后的15天内进行田间原位连续动态观测。电镜和能谱结果表明,复合抑制剂均匀涂覆于尿素表面,形成薄而致密、光滑的涂覆层,该涂覆层均匀分布有磷和硫2种元素,表明复合抑制剂与尿素已有效结合。田间试验结果表明,在同等优化施氮量下与普通尿素相比,夏玉米和冬小麦季追肥后 CUY1 和 CUY2 处理氮挥发分别降低 55.19%,32.15%和 52.46%,39.43%。夏玉米季追肥后,0-20 cm 土层 CU、CUU 处理土壤硝态氮含量于第 5 天达到峰值,到后期已显著低于 CUY1、CUY2 处理,CUY2 处理稳定硝态氮的效果更好。冬小麦季追肥后,0-20 cm 土壤硝态氮含量 CU、CUU 处理分别于第 5.3 天达到峰值,CUY1、CUY2 处理于第 11 天达到峰值后,硝态氮含量已显著高于相同施氮量的 CUU 处理。在保证产量和净收益的同时,抑制剂涂覆尿素显著降低了追施氮素的氮挥发和淋溶损失浓度,其中冬小麦季 CUY1 处经济效益较好,夏玉米季 CUY2 调控氮素的效果最佳,减少向下淋溶的效果明显。

**关键词:**复合抑制剂;涂覆工艺;改性尿素;氮挥发;淋溶

**中图分类号:**X53;S512.1<sup>+</sup>1;S513

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2020)04-0270-10

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.040

## Effects of Modified Urea Topdressing on Nitrogen Volatilization and Leaching in Winter Wheat and Summer Maize

XIAO Qiang<sup>1,2</sup>, LI Lixia<sup>1,2</sup>, LI Hongyan<sup>1,2</sup>, YI Wenping<sup>1,2</sup>,

ZOU Guoyuan<sup>1,2</sup>, LIU Jianbin<sup>1,2</sup>, SUN Shiyu<sup>3</sup>

(1. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097;

2. Beijing Engineering Technology Research Center for Slow/Controlled-release Fertilizer, Beijing 100097;

3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051)

**Abstract:** NBPT (n-butyl thiophosphoryltriamide) and DMPP (3, 4-dimethylpyrazolophosphate) were used as composite inhibitors. By optimizing the combination and using the drum spray process, a new type of composite inhibitor coated urea fertilizer was developed. The effect of coating was analyzed by SEM and EDS. Field experiments were conducted to systematically evaluate the effects of different nitrogen topdressing on nitrogen regulation. Five treatments were set up: (1) No N application (CK); (2) farmers' habit of applying urea (CU); (3) optimization of applying urea (CUU); (4) optimization of applying inhibitor coated urea (CUI1); (5) optimization of applying inhibitor coated urea (CUI2). The field in-situ continuous dynamic observation was carried out within 15 days after applying urea at the ten leaf stage of summer maize and jointing stage of winter wheat. The composite inhibitor was uniformly coated on the surface of urea to form a thin, compact and smooth coating layer. The coating layer was evenly distributed with phosphorus and sulfur elements, which indicated that the composite inhibitor and urea had effectively combined. Compared with the common urea after the same N application, the ammonia volatilization of CUI1 and CUI2 in summer maize

收稿日期:2019-10-30

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800604);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20200418);国家玉米产业技术体系任务项目(CARS-02-88);河北省农林科学院创新工程项目(2019-1-03);河北省重点研究计划项目(20323601D)

第一作者:肖强(1978-),男,副研究员,主要从事新型肥料研究。E-mail:xqiang1978@163.com

通信作者:刘建斌(1981-),男,副研究员,主要从事土壤肥料研究。E-mail:liujianbin1981@126.com

孙世友(1976-),男,研究员,主要从事施肥与环境研究。E-mail:sunshiyu@126.com

and winter wheat decreased by 55.19%, 32.15% and 52.46%, 39.43% respectively. After topdressing in summer maize season, the content of soil  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in 0–20 cm soil layer in CU and CUU treatment reached the peak value at the 5th day, which was significantly higher than that of CUY1 and CUY2 treatment at the same period, and significantly lower than that of CUY1 and CUY2 treatment at the later stage. According to the trend of CUY1 treatment, the effect of CUY2 treatment on stabilizing  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in 0–20 cm soil layer is better. After topdressing in winter wheat season, the content of soil  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in CU and CUU treatment reached the peak value on the 5th and 3rd day, respectively. The content of soil  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in CUY1 and CUY2 treatment increased slowly, and reached the peak value on the 11th day, which was 38.64%, 36.08% and 43.65%, 48.19% respectively lower than that of CU and CUU treatment. After the 11th day, the content of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  was significantly higher than that of CUU with the same N application. At the same time of ensuring the yield and net income, urea coated with inhibitor significantly reduced the ammonia volatilization and leaching loss concentration of nitrogen, among which CUY1 treatment on winter wheat had better economic benefit, CUY2 on summer maize had the best effect of regulating nitrogen, and the effect of reducing leaching down was obvious.

**Keywords:** compound inhibitor; coating process; modified urea; ammonia volatilization; leaching

目前,我国主要粮食作物追肥普遍以尿素为主,虽然能保证一定的作物产量,但尿素施用量大,且为速溶性化肥,损失严重,造成了严重的环境污染问题<sup>[1]</sup>。如华北地区夏玉米季农民的传统施氮量,河南为 450~600 kg/hm<sup>2</sup>,远高于最佳施氮量 225 kg/hm<sup>2</sup>,山东为 259 kg/hm<sup>2</sup>,高于推荐施氮量的 57%<sup>[2-4]</sup>。华北地区目前氮肥损失量已高达 20%~55%,玉米氮肥利用率仅为 29.1%<sup>[5]</sup>。玉米生长期正值高温多雨季节,降水量大且较集中,极易造成氮素淋失,尤其是追肥,一般都是撒施问题<sup>[6]</sup>。尿素肥料的优点是含氮量高,遇水即化,且施用方便,可在雨前施用迅速为作物提供养分,在我国尿素占氮肥消费的 60%以上<sup>[7-8]</sup>。因此,追施尿素在很长一段时间内仍然是我国粮食作物追肥的主要品种。但是,生态问题固然重要,如何提高追施尿素的肥料利用率,降低肥料施用量,开发高效环保类的新型肥料已成为现代农业科学发展的重大课题<sup>[9-10]</sup>。

有研究<sup>[11]</sup>报道,在农田运用尿素辅以脲酶抑制剂和硝化抑制剂可以减少氮素损失。目前,脲酶抑制剂中只有 NBPT 和 HQ,硝化抑制剂中有 Nitrapyrin、DCD 和 DMPP 得到了实际的应用,并作为商品在市场流通<sup>[12]</sup>。脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂 3,4-二甲基磷酰盐(DMPP)分别用来减缓土壤中尿素酰胺态氮和铵态氮的水解,以及  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的氧化,以减少  $\text{NH}_3$  挥发、 $\text{NO}_3^-$  淋溶或  $\text{N}_2$  与  $\text{N}_2\text{O}$  等气态损失的元素或化合物<sup>[13-14]</sup>。但二者分别对尿素 N 转化某一特定过程产生作用,其单独作用不能对尿素氮转化的全过程进行有效控制,而两者的协同作用研究<sup>[15]</sup>表明,两者的配合施用可有效延缓尿素水解,并使水解产物  $\text{NH}_4^+$  在土壤中得到更多、更长时间的保存,减少

$\text{NO}_3^-$  的淋溶、 $\text{NH}_3$  挥发及  $\text{N}_2\text{O}$  排放。

本试验经过多年研究,通过筛选、开发复合抑制剂以及涂覆尿素技术工艺与配方,开发出抑制剂涂覆尿素肥料产品,通过系列试验验证,探明了供氮特征及肥料效果。在减施氮素不减产的条件下,具有减少氮素损失风险的特征,希望能为我国面源污染治理及新型肥料研究领域提供借鉴和新的开发思路。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

肥料原料为普通尿素(河北三河香风肥业有限公司)。生化抑制剂:脲酶抑制剂为 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT),硝化抑制剂为 3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP),含量 97%(北京百灵威科技有限公司生产)。

### 1.2 包膜尿素肥料的制备与检测

1.2.1 仪器与设备 试验仪器有转鼓包膜机、恒流泵、配料釜、水浴锅、RCZ-8B 型智能溶出测定仪和 S-450 型扫描电镜(SEM)。

1.2.2 复合抑制剂制备 将 2 种抑制剂按比例组合后,加入到活化剂(聚氨酯类)中,不断搅拌 30 min,转速为 240 r/min,保持温度 30~40 °C,之后静置(各成分比例设计见表 1),得到无杂质澄清溶液。

表 1 制备改性尿素所需各成分配比

序号	处理	尿素	抑制剂		活化剂
			NBPT	DMPP	
1	CUY1	100	0.184	0.046	0.36
2	CUY2	100	0.092	0.092	0.36

1.2.3 复合抑制剂涂覆尿素核心的制备 转鼓包衣机的运行参数为:进风温度 30 °C,压缩空气压强 0.3 Pa,喷头雾化压强 0.2 Pa。将 1.2.2 制备的涂覆材料,在 30 °C 条件下充分搅匀后,在流化态的尿素外表面进行喷涂,制得稳定材料混合涂覆尿素核心。

1.2.4 包膜肥料的外观与剖面结构及能谱分析方法利用 S-450 型扫描电镜(SEM)观察包膜肥料表面、断面膜结构、成膜特点等形态信息。采用 X 射线能谱分析仪(EDS)分析肥料及材料能谱特征。

### 1.3 田间效果评价

1.3.1 试验布置 试验地点设置在河北省农科院大河实验站,位于石家庄市鹿泉区大河镇大河村,属于黄淮海半湿润平原区气候,四季分明。供试土壤为壤质潮土,土壤肥力水平中等,0—20 cm 土层有机质 16.292 g/kg,全氮 0.702 g/kg,全磷 0.061 g/kg,全钾 0.181 g/kg,有效磷 5.4 mg/kg,速效钾 62 mg/kg, pH 8.14。

供试夏玉米品种为“郑丹 958”,冬小麦品种为“轮选 987”。试验设置 5 个处理(表 2),3 次重复。试验田分为微区和小区,各 18 个。每个微区面积为 2 m<sup>2</sup>,长 2 m,宽 1 m,四周用 PVC 板隔开,PVC 板埋深

0.6 m;每个小区面积为 12 m<sup>2</sup>,长 4 m,宽 3 m,四周起垄,小区间隔 0.5 m。微区内部各处理、小区内部各处理随机排列。每个微区内种植夏玉米、冬小麦棵数相同,夏玉米株行距分别为 25,50 cm,冬小麦株行距分别为 6,13 cm,苗期进行疏苗和定植,保持颗数一致。夏玉米于 2018 年 6 月 26 日播种,追肥于小喇叭口期进行;冬小麦与 2018 年 10 月 15 日播种,追肥于拔节期进行。夏玉米习惯施肥为 N 225 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 90 kg/hm<sup>2</sup>, 冬小麦习惯施肥为 N 285 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 60 kg/hm<sup>2</sup>, 所有处理施磷钾量相同,均为一次性底施。根据长期定位试验和测土配方施肥结果,习惯施肥处理的施氮量在基施和追施各占 1/2,其他处理的追施氮量为优化施氮量,所有施氮处理基施肥料都采用普通尿素。追施肥料品种见表 2,冬小麦追施方式为撒施,夏玉米为条施。

表 2 追肥处理

序号	处理	基施肥料品种	追肥肥料品种	总施氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			
				冬小麦		夏玉米	
				基施	追施	基施	追施
1	CK	—	—	0	0	0	0
2	CU	普通尿素	普通尿素(Urea)	142.5	142.50	112.5	112.5
3	CUU	普通尿素	普通尿素(Urea)	142.5	99.75	112.5	78.75
4	CUY1	普通尿素	改性尿素(CUY1)	142.5	99.75	112.5	78.75
5	CUY2	普通尿素	改性尿素(CUY2)	142.5	99.75	112.5	78.75

1.3.2 取样及数据处理 在微区内,施追肥后约 15 天内测定氨挥发,直到氨挥发速率痕量为止,同时取 0—20 cm 土层土样测定硝态氮和铵态氮指标。土壤氨挥发的捕获方法采用通气法<sup>[16-17]</sup>,测定采用凯氏定氮法。在施肥当天开始进行土壤氨挥发气体的收集,施肥后第 2 天 8:00 取样,之后每天取样 1 次,直至监测不到氨挥发时为止。

田间土壤氨挥发通量的计算公式分别为:

土壤氨挥发通量(N kg/(hm<sup>2</sup>·d))=单个装置每次所测氮量+(捕获装置横截面积×每次连续捕获时间)

氮素利用率=(施氮区作物吸氮量-无氮区作物吸氮量)÷施氮区施氮量×100%

小区播种采用机播,只在收获期进行测产。收获测产时每个小区取整 3 行玉米植株测产,取 2 m<sup>2</sup> 小麦测产。收获后用土钻取 0—200 cm 土层土样,0—20 cm 为 1 层,测定硝态氮和铵态氮含量。称取 12.00 g 土样于 250 mL 塑料瓶中,加入 100 mL 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液。振荡 1 h 后用无铵滤纸过滤至 10 mL 离心管中,放入 -20 °C 冰箱冷冻保存,连续流动分析仪(TRAACS 2000, Bran and Luebbe)测定硝态氮和铵态氮含量。

与此同时,称取 25 g 左右土样放入铝盒中,在 105 °C 下烘干 12 h 后测定土壤质量含水量。

图表制作、数据计算与处理及相关分析等采用 Microsoft Office Excel 2010 软件进行;方差分析和多重比较采用 SPSS 17.0 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合抑制剂涂覆尿素肥料的表现与能谱分析

目前抑制剂有很多种,市场化的有 2~4 种,各有优缺点,考虑到抑制剂的稳定性、溶解性和涂覆性能,筛选出目前只有市场化的脲酶抑制剂和硝化抑制剂,进行优势互补,并以有机酸类的物质作为保护剂,通过涂覆工艺将其均匀包裹于尿素表面。通过扫描电镜观察表面结构(图 1a)可以看出,尿素表面有 1 层均匀的涂覆层,很薄但很致密、光滑,物质分布均匀,与尿素表面结合紧密,互相嵌入,达到了较理想的涂覆效果。通过能谱分析可以看出,因为尿素本身含氮和碳高,加入复合抑制剂后,磷和硫的含量增高(图 1b),由于只有抑制剂中含有二者,说明抑制剂与尿素已经很好地融合,为后期调控氮素提供了较好的前提条件。

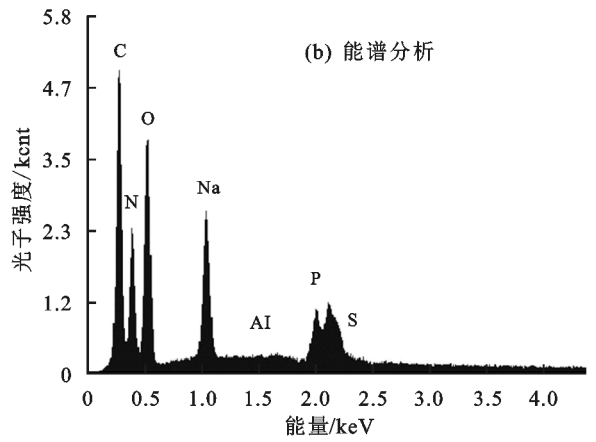
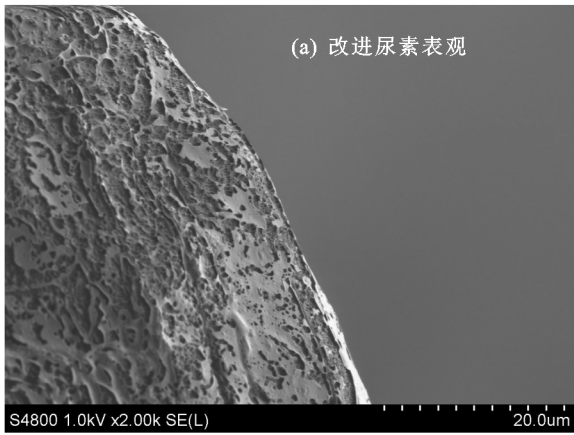


图 1 改性尿素表现与能谱分析

2.2 控释抑制剂田间效果评价

2.2.1 氮挥发分析 追肥后各个处理氮挥发瞬时速率比较见图 2。从玉米季追肥后氮挥发的效果可以看出,整体上呈现出在第 2~3 天达到挥发高峰,之后呈逐渐降低趋势。与小麦季相比,挥发速率大,挥发周期短,说明夏玉米季氮挥发剧烈程度大于小麦季。各处理相比, CU 处理最高,挥发最快,峰值显著高于其他处理,达到 13.22 kg/(hm<sup>2</sup>·d);其次为 CUU 处理,峰值也显著高于 CUY1、CUY2 处理,后二者峰值比 CU、CUU 处理分别降低 91.94%,73.17%和 80.61%,35.45%,CUY2 处理峰值出现时间最晚。

小麦季追肥后施肥处理整体上呈现出在第 2 天达到挥发高峰,之后呈逐渐降低趋势。CU 处理施用普通尿

素,且施氮量最大,氮挥发峰值为 1.41 kg/(hm<sup>2</sup>·d),显著高于其他处理,第 2 天后氮挥发速率迅速降低。CUU 处理施用的也是普通尿素,但为优化施氮量,氮挥发峰值和速率小于 CU 处理,但比相同施氮量的 CUY1、CUY2 处理高,峰值与 CUY1 处理达到显著差异水平;CU、CUU 处理在施肥后 10 天左右氮挥发基本结束,但 CUY1、CUY2 处理在第 28 天时依然高于前二者,CUY2 处理达到了显著差异,为 0.27 kg/(hm<sup>2</sup>·d),比 CUU 处理高出 145.45%。说明新型复合抑制剂涂覆尿素较好地调控了氮素氨的挥发速率,减弱了氮挥发速度和剧烈程度。CUY1 处理与 CUY2 处理相比,后者氮挥发速率和强度较高,说明抑制氮挥发的效果不如前者。

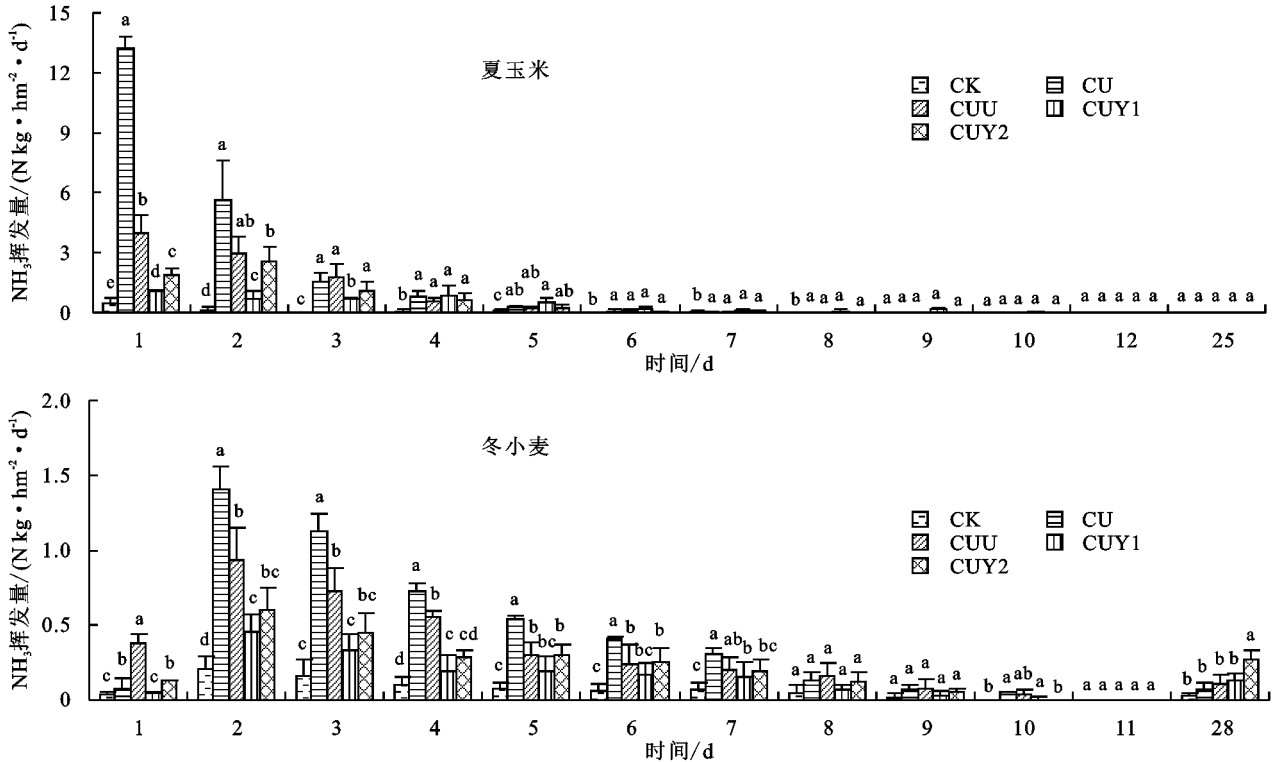


图 2 不同施肥处理瞬时氮挥发量

从追肥累积氮挥发(图 3)可以看出,夏玉米季氮挥发量比冬小麦季显著增高。CU 处理显著高于其他处

理,为 21.47 N kg/hm<sup>2</sup>,其次为 CUU 处理,为 9.55 N kg/hm<sup>2</sup>,氮挥发降低 55.52%。与 CUU 处理相比,CUY1、

CUY2 处理氨挥发分别降低 55.19% 和 32.15%。CUY1、CUY2 处理相比, CUY1 处理累积氨挥发量比 CUY2 处理降低 33.95%。从冬小麦季追肥累积氨挥发可以看出, CU 处理显著高于其他处理, 为 4.91 N kg/hm<sup>2</sup>, 其次为 CUU 处理, 为 3.72 N kg/hm<sup>2</sup>, 氨挥发降低 24.37%。CUU 处理虽然与 CUY1、CUY2 处理

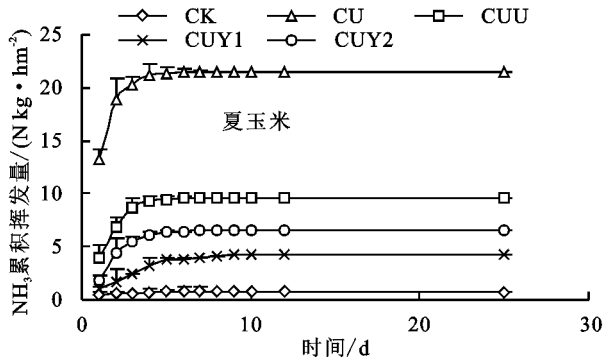


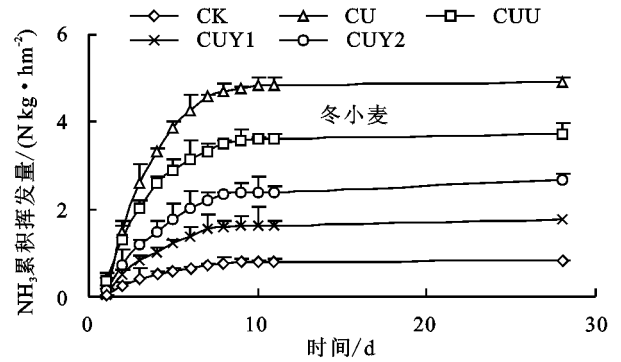
图 3 不同施肥处理累积氨挥发量

2.2.2 土壤铵态氮分析 从夏玉米季施追肥后土壤铵态氮含量变化(图 4)可以看出, 施氮处理土壤铵态氮含量均相应升高, 并迅速达到峰值, 尤其以 CU 处理土壤铵态氮含量升高速度最快, 峰值为 12.35 mg/kg, 显著高于其他施氮处理。其他施氮处理也在同一时期达到峰值, 但并没有达到差异显著。CU、CUU 处理达到峰值后铵态氮含量迅速下降, 而 CUY1、CUY2 处理则缓慢降低。与 CU 相比, 在施氮 4 天后, 差异逐渐达到显著水平。CUY1、CUY2 处理相比, 差异基本不显著。

冬小麦季施追肥后, 土壤铵态氮含量整体高于夏玉米季, 施肥处理土壤铵态氮含量均相应升高, CU、CUY1 和 CUY2 处理为施氮后第 2 天达到峰值, CU 处理为 23.53 mg/kg, 显著高于同期其他处理; CUY1、CUY2 处理高于 CUU 处理, 后者为 9.79 mg/kg, 与 CUU 处理达到显著差异, 但是 CUU 处理在施氮后第 3 天达到峰值, 为 30.66 mg/kg, 显著高于 CUY1、CUY2 处理的峰值, 说明 CU、CUU 处理施氮后 1~3 天内土壤铵态氮含量升高最快, 之后迅速下降, 没有缓冲性; 而 CUY1、CUY2 处理在施氮后 27 天内土壤铵态氮含量变化幅度小, 没有出现迅速增加或减少的现象, 说明复合抑制剂调控氮素转化效果较好, 同时第 27 天的时候, 显著高于 CU、CUU 处理, 进一步说明调控效果较优; 与 CUY1、CUY2 处理相比, 施氮后前期前者小于后者, 但后期相反, 且没有达到显著差异。从趋势上看, 说明 CUY1 处理脲酶抑制剂含量相对较高, 延缓其向铵态氮的转化。

冬小麦土壤铵态氮含量高于夏玉米, CUU 处理铵态氮峰值延缓, 说明夏玉米铵(氨)形式的氮可能损失

施用的均为普通氮肥, 且施氮量相同, 但后二者为抑制剂涂覆尿素, CUY1、CUY2 处理氨挥发分别降低 52.46% 和 39.43%。CUY1、CUY2 处理相比, CUY1 处理累积氨挥发量比 CUY2 处理降低 33.72%, 说明 CUY1 处理调控氨挥发的效果更好, 稳定尿素形态、减缓转化氨挥发的速度更优。



更多, 可能与夏季高温多雨及淋溶较强有关。

2.2.3 收获期土壤铵态氮分析 夏玉米收获后, 0—200 cm 土层内, 各处理铵态氮含量分布差异显著(图 5)。CU、CUU 处理铵态氮由表层到 120 cm 土层淋溶逐渐增强并达到最大值, 在 120 cm 处铵态氮含量由高到低依次为 CU、CUU、CUY1、CUY2 处理, 前两者显著高于后两者; CUY1、CUY2 处理铵态氮的变化与 CU、CUU 处理不同, CU、CUU 处理铵态氮含量峰值在 0—20 cm 土层, 并显著高于其他处理, 二者之间差异不显著。20—120 cm 土层铵态氮含量并没有逐渐增强, 而在 80—100 cm 处达到第 2 次峰值, 在 100 cm 处铵态氮含量 CUY2 处理显著高于 CUY1 处理, 说明 CUY2 处理释放出的铵态氮比 CUY1 处理更多地保留到土壤中, 在 0—100 cm, 每个层次内 CUY1、CUY2 处理铵态氮含量基本均高于或显著高于 CU、CUU 处理, 说明 CUY1、CUY2 处理铵态氮淋溶强度弱于 CU、CUU 处理, 铵态氮的释放具有一定的缓释性。120—200 cm 土层所有施肥处理铵态氮含量骤降, 在 180—200 cm 土层内, CU 处理铵态氮含量最高, CUY1 处理最低, 在 200 cm 处, CU 处理显著高于 CUY1、CUY2 处理, CUU 处理显著高于 CUY2 处理, 说明 CUY1、CUY2 处理控制、稳定铵态氮的效果显著优于 CU、CUU 处理。

冬小麦季收获后 0—200 cm 土层铵态氮的分布与夏玉米差异较大, 没有出现明显的累积层, 上下分布相对均匀, 施氮处理之间差异相对夏玉米较小, 但通体残留浓度高于夏玉米季, 说明冬小麦季铵态氮淋溶明显弱于夏玉米季。施氮处理间相比, 0—20 cm 土层, CU 处理铵态氮含量低于 CUU、CUY1 处理, 显著低于 CUY2 处理, 虽然施氮量多, 但损失或淋溶也

较多。CU处理铵态氮峰值出现在120 cm土层处,为8.79 mg/kg,其次累积量较高出现在180—200 cm土层处,为6.46 mg/kg,显著高于其他处理。CUU处理铵态氮峰值出现在160 cm土层处,为5.06 mg/kg,其次累积量较高出现在40—60 cm土层处,为

4.88 mg/kg,与其他处理差异不显著。CUY1、CUY2处理铵态氮峰值分别出现在60—80,0—20 cm土层处,为7.37,7.24 mg/kg。从铵态氮分布情况可以看出,CUY1、CUY2处理铵态氮淋溶弱于CU处理,稳定能力高于CUU处理。

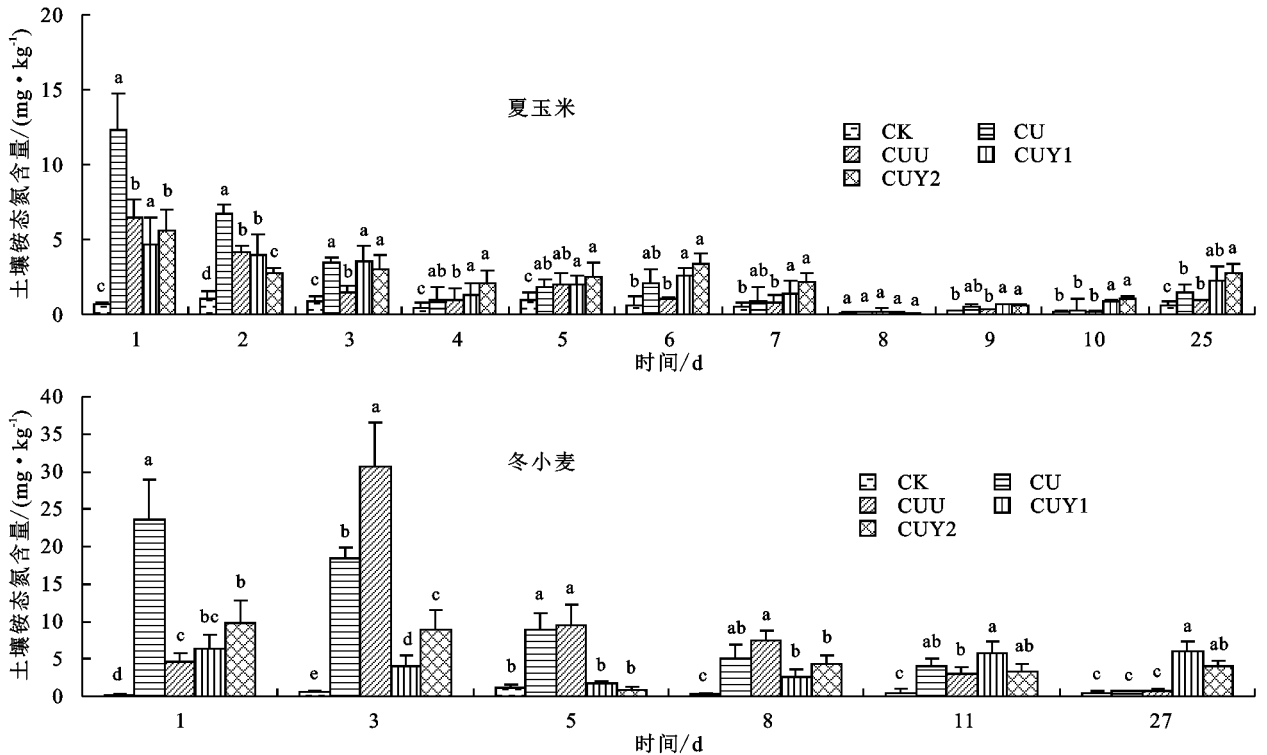


图4 不同处理0—20 cm土壤铵态氮含量分析

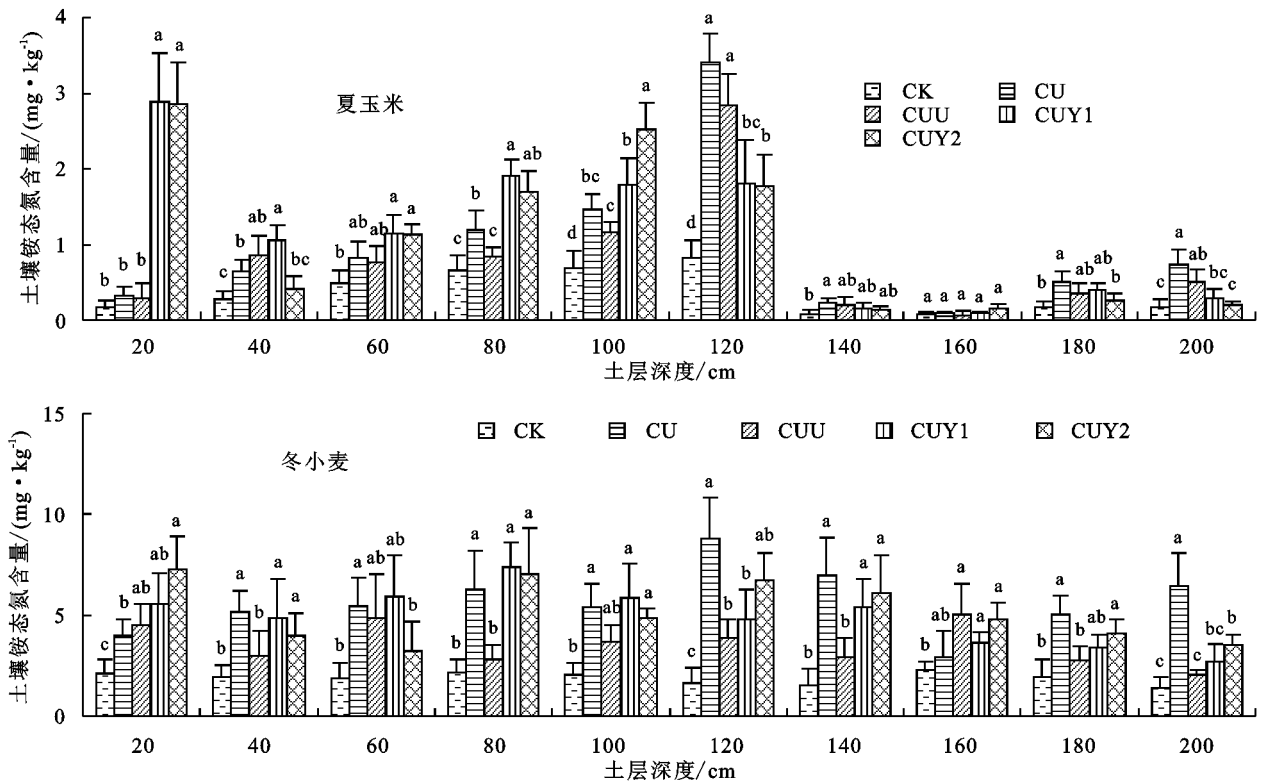


图5 收获期不同处理土壤剖面铵态氮含量分析

2.2.4 土壤硝态氮分析 夏玉米季追施氮肥后, CU、CUU处理施用普通尿素,土壤硝态氮含量迅速

上升,至第5天达到峰值,分别为71.60,86.60 mg/kg,并显著高于同时期 CUY1、CUY2 处理,之后含量

迅速下降,到后期显著低于 CUY1、CUIY2 处理(图 6)。CUU 处理施氮量低于 CU 处理,但硝态氮峰值却相反,原因:一是二者峰值差异并没有达到显著;二是施氮后 5 天内 CU 处理土壤硝态氮含量一直处于最高值,所以整体上 CU 处理土壤硝态氮含量增加剧烈程度大于 CUU 处理。而 CUY1、CUIY2 处理硝态氮含量则为缓慢上升,达到峰值的时间分别为第 10、7 天,其峰值也比 CU、CUU 处理峰值分别降低 37.16%,12.83% 和 48.04%,27.93%,到了后期,依然保持较高的土壤硝态氮含量。说明抑制剂涂覆尿素具有明显稳定硝态氮、减少淋失的特点。CU 处理为习惯施氮量,硝态氮向下淋失的多,CUU、CUIY1、CUIY2 处理施氮量相同,但抑制剂涂覆尿素抑制、稳定硝态氮的效果较好。CUIY1 处理与 CUIY2 处理相比,前期差异不显著,施氮 7 天后 CUIY2 处理硝态氮含量逐渐高于 CUIY1 处理,说明 CUIY2 处理在 0—20 cm 土层稳

定硝态氮的效果更好。

纵观冬小麦季追肥后施氮处理土壤硝态氮含量变化,显著高于夏玉米时期追肥后土壤硝态氮含量。冬小麦季施追肥后,施肥处理土壤硝态氮含量均相应升高,CU 处理为施氮后第 5 天达到峰值,为 264.00 mg/kg,显著高于同期其他处理;CUU 处理峰值出现在施氮后第 3 天,为 287.50 mg/kg,高于同期 CU 处理,显著高于 CUIY1、CUIY2 处理。CU、CUU 处理在施氮 5 天后硝态氮含量迅速下降。CUIY1、CUIY2 处理土壤硝态氮含量缓慢增加,至施氮后第 11 天达到峰值,分别为 162.00,194.00 mg/kg,而且分别比 CU、CUU 处理峰值降低 38.64%,36.08% 和 43.65%,48.19%,至第 11 天后,硝态氮含量已经显著高于同施氮量的 CUU 处理,说明 CUIY1、CUIY2 处理不仅延缓了土壤硝态氮的生成时间,而且保持了土壤硝态氮处于一个相对稳定的含量变化范围内。

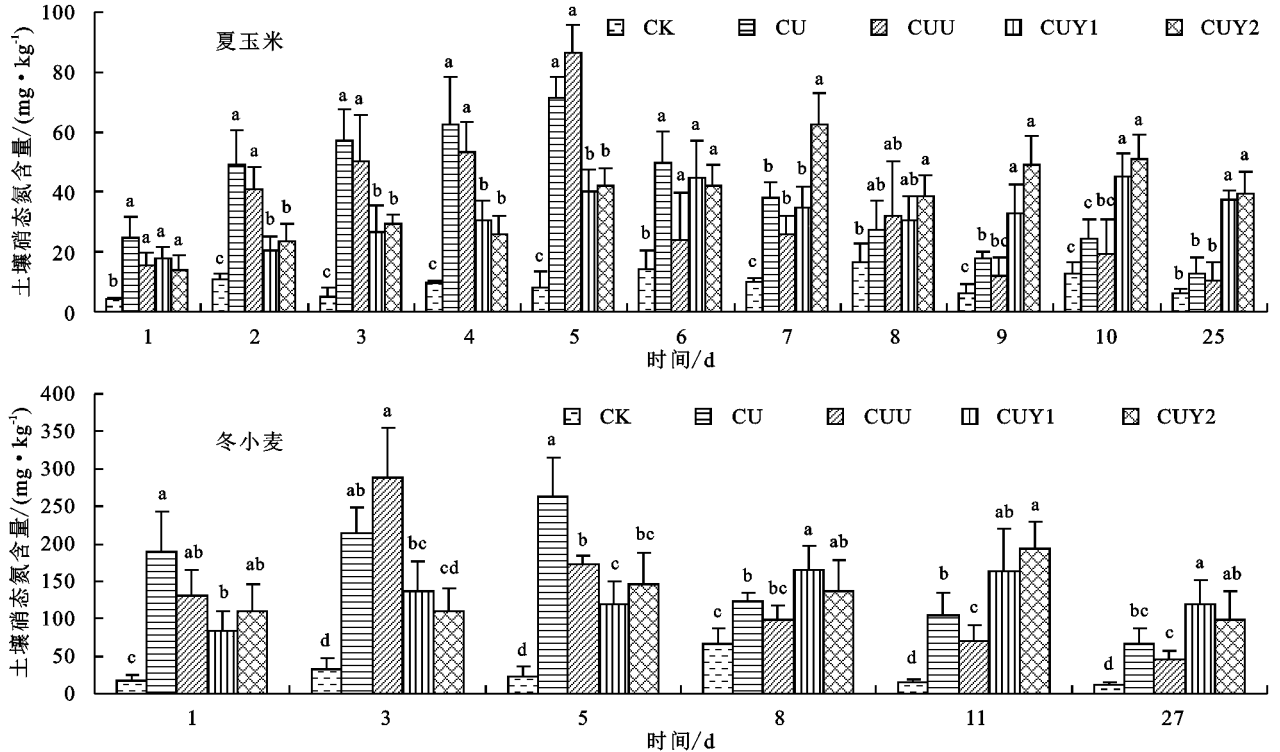


图 6 不同处理 0—20 cm 土壤硝态氮含量分析

2.2.5 收获期土壤硝态氮分析 夏玉米收获期 CU 处理硝态氮在 0—200 cm 土层内分布较均匀,上下都有一定残留量,表层残留不多,说明淋溶较强烈(图 7)。CUU 处理为优化施氮量,表层和 140 cm 土层处含量相对较高,180—200 cm 土层处含量高于同等施氮量下的 CUY1、CUIY2 处理。CUIY1、CUIY2 处理硝态氮含量峰值出现在表层,显著高于 CU、CUU 处理,达到 42.9,49.8 mg/kg,其中 CUIY2 处理含量最高;其次 20—40 cm 处含量较高,之后为 120 cm 处,120 cm 往下直到 200 cm 土层,硝态氮残留量相反,CUIY1、CUIY2 处理低于 CU、

CUU 处理,达到显著差异,CUIY2 处理呈现低于 CUIY1 处理的趋势,但未达到差异显著。说明同等施氮量下,抑制剂涂覆尿素提高了尿素的性能,抑制了硝态氮的初期转化和迁移,稳定硝态氮的能力显著提高。

冬小麦收获后,土壤硝态氮的残留情况与夏玉米略有不同。200 cm 土层内硝态氮的分布相对更均匀,上下土层差异相对更小,总体表现出淋溶弱于夏玉米的趋势。CU 处理表层含量最高,下层相对较少;表层硝态氮含量高于 CUU 处理,但低于 CUIY1 处理,显著低于 CUIY2 处理,说明 CU 处理硝态氮在

表层残留较少。CUY1 处理最大值出现在 80 cm 土层处,显著高于其他处理,CUY2 处理最大值出现在 20 cm 土层处,高于 CUY1 处理,显著高于其他处理,在 180 cm 土层处,CUY1、CUY2 处理显著低于 CUU 处理,低于 CU 处理;在 200 cm 土层处,低于 CUU 处理,CUY2 处理显著低于 CU 处理;CUY1、

CUY2 和 CUU 3 个处理施氮量相同,但从硝态氮分布来看,CUU 处理上下土层分布相对较均匀,没有出现在上层明显累积,硝态氮有可能淋失到 200 cm 土层外,也有可能氮素以氨挥发形式损失掉。总体来看,CUY1、CUY2 处理硝态氮相对淋溶较弱,冬小麦季比夏玉米季淋溶相对较弱。

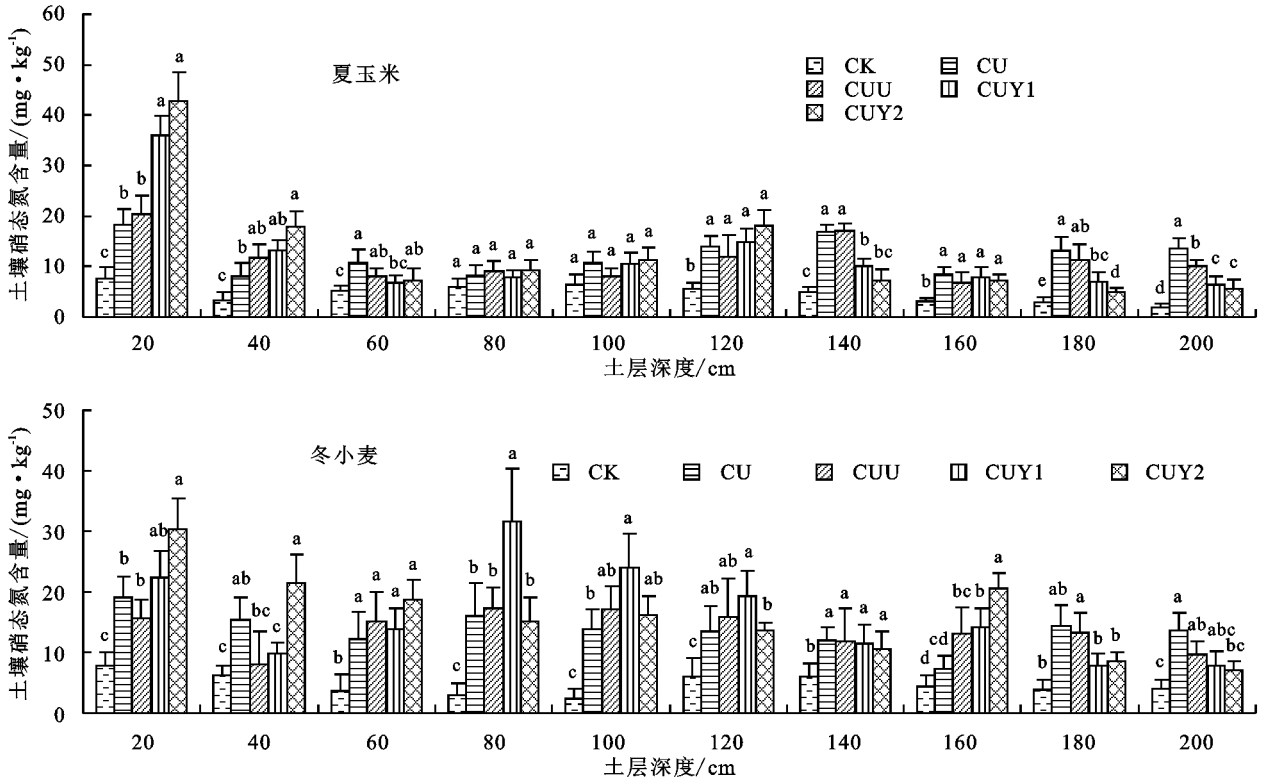


图 7 收获期不同处理土壤剖面硝态氮含量分析

2.2.6 包膜控释尿素与普通尿素配合基施的经济效益分析 与习惯施肥 CU 处理相比,优化施肥 CUU、CUY1 和 CUY2 处理夏玉米产量没有显著差异; CUY1、CUY2 与 CUU 处理相比,虽然未达到显著差异,但产量增加趋势明显。从氮素利用率的角度看(表 3),优化施肥 CUU 处理与习惯施肥 CU 处理相比,氮素利用率提高但未达差异显著,CUY1、CUY2 处理显著提高 8~10 个百分点左右,后者氮素利用率最高。从净收入的情况可以看出,优化施肥 CUU、CUY1 和 CUY2 处理与习惯施肥 CU 处理相比,分别增收 91,483,948 元/hm<sup>2</sup>,相同施氮量下 CUY1、CUY2

处理分别比 CUU 处理增加 392,856 元/hm<sup>2</sup>。从冬小麦季的效果看出,与习惯施肥 CU 处理相比,优化施肥 CUU、CUY1 和 CUY2 处理冬小麦产量没有显著降低,CUY1 处理产量略有升高;与 CUU 处理相比,未达到显著差异,但 CUY1 处理增加 4.18%。从净收入可以看出,优化施肥 CUU、CUY1 和 CUY2 处理与习惯施肥 CU 处理相比,只有 CUY1 处理增加 178 元/hm<sup>2</sup>;与 CUU 处理相比,只有 CUY1 处理增加 558 元/hm<sup>2</sup>。

冬小麦 CUY1 处理经济效益较好,夏玉米 CUY2 处理调控氮素的效果最佳,减少向下淋溶的效果明显(表 3,表 4)。

表 3 夏玉米不同处理的氮素利用率及经济效益

处理	氮素 利用率/%	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	产值/ (元·hm <sup>-2</sup> )	氮肥用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		氮肥成本/ (元·hm <sup>-2</sup> )	净收入/ (元·hm <sup>-2</sup> )
				基肥	追肥		
CK		6986±710b	10479	0	0	0	10479
CU	29.41b	8221±811ab	12332	112.5	112.5	1076	11255
CUU	32.45ab	8174±1072ab	12262	112.5	78.75	915	11347
CUY1	37.47a	8475±459a	12713	112.5	78.75	974	11738
CUY2	38.58a	8780±731a	13170	112.5	78.75	967	12203

注:表内数据以 2018 年当时的市场价计;普通尿素 2 200 元/t,CUY1、CUY2 处理分别为 2 503,2 461.6 元/t,玉米 1 500 元/t。



表 4 冬小麦不同处理产量及经济效益

处理	产量/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	产值/ (元 · hm <sup>-2</sup> )	氮肥用量/(kg · hm <sup>-2</sup> )		氮肥成本/ (元 · hm <sup>-2</sup> )	净收入/ (元 · hm <sup>-2</sup> )
			基肥	追肥		
CK	6031 ± 417b	13268	0	0	0	13268
CU	7155 ± 814a	15741	142.5	142.5	1363	14378
CUU	6889 ± 629ab	15156	142.5	99.75	1159	13997
CUY1	7177 ± 546a	15790	142.5	99.75	1234	14556
CUY2	6883 ± 705ab	15145	142.5	99.75	1225	13918

注:表内数据以 2018 年当时的市场价计;普通尿素 2 200 元/t, CUY1、CUY2 处理分别为 2 503, 2 461.6 元/t, 冬小麦 2 200 元/t。

### 3 讨论

冬小麦季追施氮肥的量高于夏玉米季,但是从以上分析中可以看出,冬小麦季追肥后的氨挥发显著低于夏玉米季,土壤铵态氮和硝态氮的含量却显著高于夏玉米季,其原因可能是冬小麦季追肥时期气温和降雨相对偏低,尽管施氮量大,但前二者影响程度更大,最终导致小麦季氨挥发降低,耕层土壤铵态氮和硝态氮残留相对较多,淋失较少,土壤养分含量相对富裕。这也进一步说明 2 种改性尿素与习惯施氮和追肥优化施氮相比,氮素利用率、产量和净收入 3 方面在夏玉米季差异更明显、在冬小麦季差异偏小的原因。

2 种改性尿素相比,在冬小麦季, CUY1 处理土壤硝态氮和铵态氮含量在追肥后期均高于 CUY2 处理,在夏玉米季相反,虽然未达到显著差异,但呈现明显的趋势和规律,而且从最终的氮素利用率、产量和净收入均体现出一致的规律性,说明不同的脲酶抑制剂和硝化抑制剂涂覆尿素效果不同,在不同作物上的反应不同。 CUY1 处理脲酶抑制剂量添加多,硝化抑制剂量添加少,抑制硝态氮淋失的作用小,相对适合于小麦季应用;而 CUY2 处理脲酶抑制剂量添加少,硝化抑制剂量添加多,抑制硝态氮淋失的作用更强,相对适合于玉米季应用;但是如果仅从氨挥发损失的角度考虑,夏玉米季应该用更多的尿酶抑制剂,这取决于主要目的,即考虑硝态氮淋失还是氨挥发损失。

刘敏等<sup>[18]</sup>在夏玉米上、Afshar 等<sup>[19]</sup>在油茶作物上应用含有尿酶抑制剂和硝化抑制剂的尿素表明,与习惯施氮相比,添加硝化抑制剂可减少 N<sub>2</sub>O 排放,但增加了 NH<sub>3</sub> 的挥发;沈真实等<sup>[20]</sup>研究了含 DMPP 硝化抑制剂的尿素氨挥发损失状况表明,随着 DMPP 尿素施用量的增加,土壤氨挥发损失量呈显著上升的趋势。尿素和硫磺铵的氨挥发损失分别为 25.7% 和 18.6%,而添加 DMPP 抑制剂后,尿素和硫磺铵的氨挥发损失相应增加 1.9% 和 2.0%;污泥和污泥添加 DMPP 处理氨挥发分别为 7.8% 和 11.0%,但差异均不显著<sup>[21]</sup>。多数情况下,氮肥中添加 DMPP 氨挥发损失增

加,但差异不显著,在特定条件下则可减少氨挥发<sup>[22]</sup>;俞巧钢等<sup>[23]</sup>研究发现, DMPP 与尿素混施比单独施用尿素的农田硝态氮淋溶量分别减少 44.9% 和 47.3%,同时铵态氮含量分别增加 20.5% 和 19.1%。添加 1% DMPP 与不添加 DMPP 的尿素相比,深层土壤中硝态氮的浓度显著低于未加 DMPP 的处理,明显降低硝态氮垂直迁移的淋溶损失。Chaves 等<sup>[24]</sup>向蔬菜作物残渣中添加 DMPP 对氮素迁移的影响显示,与空白相比,施加 DMPP 的处理平均减少硝态氮淋洗 64%,并且 DMPP 不会影响氮的矿化作用;Liu 等<sup>[25]</sup>在尿素硝铵溶液中加入 0.3% 不同浓度的 NBPT,在玉米上的试验表明,施氮后 20 天内,氨挥发损失分别减少 29.1%~78.8%, 35.4%~81.9%, 77.3~87.4% 和 59.1~83.3%。上述研究结果都可说明, NBPT 抑制氨挥发的效果较好, DMPP 可能会增加氨挥发,但减少硝态氮淋失。

冬小麦和夏玉米季对氮素循环转化的影响各有其特点,不同抑制剂主要的功能也不同,本文研制的 2 种改性尿素都应用了 2 种抑制剂,均有一定的效果,但如果想实现调控硝态氮淋失和氨挥发损失的效果都好,成本又合理,还需要进一步的研究。另外,不同抑制剂适合的作物也不同也需要通过对比试验进一步研究明确。

### 4 结论

2 种复合抑制剂涂覆尿素与相同施氮量的普通尿素相比,延缓了氨挥发峰值的出现时间,氨挥发速率降低,总量减少,有效调控了氮素的气态损失。使得土壤中铵态氮保持一个相对稳定的含量并且持续较长的时间,整个冬小麦—夏玉米轮作期除表层 0—20 cm 大量残留外, 20—120 cm 土层内铵态氮含量分布相对均匀;同时也延迟了硝态氮峰值出现的时间,硝态氮含量相对稳定而逐步地释放出来,夏玉米季生长中后期表层依然保持相对较高的含量水平,减少了由表层向下淋溶的趋势,相对于习惯施用尿素量和优化施用尿素量, 120—200 cm 土层硝态氮含量相对较低,减轻了硝态氮的淋失风险。

2种改性尿素由于配方不同,作用于不同作物的效果亦不同。尿酶抑制剂控制氨挥发效果偏好,硝化抑制剂控制硝态氮淋失效果偏好。

#### 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.
- [2] Huang J K, Xiang C, Jia X, et al. Impacts of training on farmers' nitrogen use in maize production in Shandong, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,67(4): 321-327.
- [3] 张运红,姚健,宝德俊,等. 尿素硝酸铵溶液对玉米产量、品质及养分吸收的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(9): 113-121.
- [4] 徐钰,刘兆辉,张建军,等. 不同氮肥管理措施对华北地区夏玉米田增产减排的效果分析[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1):9-15.
- [5] 于飞,施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324.
- [6] 杨岩,谭德水,江丽华,等. 黄淮海夏玉米一次性施肥技术效应研究[J]. 中国农业科学, 2018,51(20): 3909-3919.
- [7] 张翀,韩晓阳,李雪倩,等. 川中丘陵区紫色土冬小麦/夏玉米轮作氨挥发研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1359-1366.
- [8] 庄振东. 冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥去向及平衡状况研究[D]. 山东泰安:山东农业大学, 2016.
- [9] 王少杰. 黄土高原旱作覆膜玉米不同时期施氮效果及气态氮损失[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [10] Morán M, Ferreira J, Martins H, et al. Ammonia agriculture emissions: From EMEP to a high resolution inventory[J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(5):786-798.
- [11] 王长军,李凤霞,谭松伟,等. 硝化/脲酶抑制剂对宁夏灌淤土土壤氮含量及其转化的影响[J]. 江苏农业科学, 2019,47(21): 285-289.
- [12] 武志杰,石元亮,李东坡,等. 稳定性肥料发展与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1614-1621.
- [13] 王静,王允青,张凤芝,等. 脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 211-216.
- [14] 刘红江,殷跃军,郭智. 硝化抑制剂对小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 443-449.
- [15] 李莉,李东坡,武志杰,等. 脲酶/硝化抑制剂对尿素氮在白浆土中转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 646-650.
- [16] 李欠欠. 脲酶抑制剂 LIMUS 对我国农田氨减排及作物产量和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [17] 山楠. 京郊小麦-玉米轮作体系氮素利用与损失研究[D]. 河北保定:河北农业大学, 2014.
- [18] 刘敏,张翀,何彦芳,等. 追氮方式对夏玉米土壤  $N_2O$  和  $NH_3$  排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1):19-29.
- [19] Afshar R K, Lin R Y, Mohammed Y A, et al. Agro-nomic effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization and nitrogen utilization in a dryland farming system: Field and laboratory investigation [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 4130-4139.
- [20] 沈真实,许超,汤海涛,等. DMPP 施用的环境效应、影响因素及其机理研究[J]. 湖南农业科学, 2011(8): 71-76.
- [21] Menéndez S, Barrena I, Setien I, et al. Efficiency of nitrification inhibitor DMPP to reduce nitrous oxide emissions under different temperature and moisture conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 53: 82-89.
- [22] Chen D L, Suter H C, Islam A, et al. Influence of nitrification inhibitors on nitrification and nitrous oxide ( $N_2O$ ) emission from a clay loam soil fertilized with urea[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 42: 660-664.
- [23] 俞巧钢,殷建祯,马军伟,等. 硝化抑制剂 DMPP 应用研究进展及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6):1057-1066.
- [24] Chaves B, Opoku A, Neve S D, et al. Influence of DCD and DMPP on soil N dynamic after incorporation of vegetable crop residues[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 43: 62-68.
- [25] Liu S L, Wang X H, Yin X H, et al. Ammonia volatilization loss and corn nitrogen nutrition and productivity with efficiency enhanced urea and urea under no-tillage [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 6610.