

包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长的影响及其机理研究

李玉¹, 王茂莹¹, 张倩¹, 朱营营¹, 董元杰¹, 贺明荣²

(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: 为有效提高尿素氮利用率, 促进新型缓/控释氮肥的研发。在盆栽试验条件下, 研究了脲酶抑制剂氢醌(HQ)部分或全部包膜与尿素掺混施用对小麦生长及土壤不同形态氮素含量和脲酶活性的影响。试验共设5个处理: 对照(CK)、普通尿素(U)、U+普通HQ(SRU1)、U+包膜HQ(SRU2)和U+30%普通HQ+70%包膜HQ(SRU3)。结果表明: 与SRU1相比, 包膜HQ能够促进小麦生长, 改善小麦产量构成, 增加小麦产量, 并提高氮素利用率, 其中SRU2、SRU3分别增加了小麦产量的34.71%, 56.54%; 与SRU2相比, SRU3处理中普通HQ与包膜HQ配合施用前期能够有效抑制尿素水解, 维持土壤中 NH_4^+-N 的适宜浓度, 后期能增加土壤 NH_4^+-N 含量, 保证土壤有效氮的持续供应, 减少氮素损失, 使小麦整个生育期内土壤脲酶活性维持在较低水平。综上, HQ部分包膜与尿素掺混施用的SRU3处理土壤氮的供应能力最强, 氮素利用率最高, 对小麦生长的促进作用最显著。

关键词: 脲酶抑制剂; 小麦生长; 产量; 土壤氮; 脲酶活性

中图分类号: S145.6; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0283-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.02.040

Effects of Coated Urease Inhibitor Synergic Urea on Wheat Growth and Its Mechanism

LI Yu¹, WANG Maoying¹, ZHANG Qian¹, ZHU Yingying¹, DONG Yuanjie¹, HE Mingrong²

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018;

2. College of Agricultural, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018)

Abstract: In order to improve the utilization rate of urea nitrogen and promote the research and development of new slow/controlled release nitrogen fertilizer, a pot experiment, which including five treatments as control (CK), common urea (U), U + common urease inhibitor HQ (SRU1), U + coated HQ (SRU2), and U + 30% common HQ + 70% coated HQ (SRU3), were conducted to study the effect of partially or completely coated HQ mixed with urea on wheat growth, soil nitrogen, and urease activity. The results showed that compared with SRU1, coated HQ can promote wheat growth, improve wheat yield components, increase wheat yield, and improve nitrogen utilization rate. SRU2 and SRU3 respectively increased the yield of wheat by 34.71% and 56.54%. Compared with SRU2, SRU3 treatment of common HQ mixed with Coated HQ could effectively inhibit the hydrolysis of urea at the early stage, maintain the appropriate concentration of NH_4^+-N in soil, and increase the content of NH_4^+-N at the later stage, so as to ensure the continuous supply of available nitrogen in the soil, reduce the loss of nitrogen, and maintain the urease activity of soil at a low level for a long time in the whole growth period of wheat. SRU3 treatment had the strongest nitrogen supply capacity and the highest nitrogen utilization rate in soil, and had the most significant effect on the growth of wheat.

Keywords: urease inhibitor; wheat growth; yield; soil nitrogen content; urease activity

氮素是植物生长与发育的必需养分^[1], 但土壤供应少, 供求之间存在着极大的不平衡, 在农业生产中需要施用一定数量的氮素肥料。尿素是一种重要的氮肥, 在世界农业生产中占有很大比重, 我国尿素施

用量占农用氮肥总施用量的1/2以上^[2], 但普通尿素氮的利用率却只有30%~40%^[3]。尿素施入土壤后, 在适当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_3 , 导致短时间内土壤中 NH_3 浓

收稿日期: 2019-08-28

资助项目: 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); 山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0301)

第一作者: 李玉(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事新型肥料研制与应用研究。E-mail: 2392815362@qq.com

通信作者: 董元杰(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤生态与植物营养研究。E-mail: yuanjiedong@163.com

贺明荣(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事作物栽培研究。E-mail: mrhe@sdaa.edu.cn

度增大, pH 升高^[4], 这样不仅造成 NH_3 的挥发损失, 而且对植物幼苗产生毒害作用^[5]; 残留在土壤中的氮素还对作物的生长和微生物的繁衍产生负面影响, 或通过淋溶、反硝化作用损失掉, 对环境造成污染^[6]。因此, 采用有效途径提高尿素氮利用率、减少氮损失, 具有重要的现实意义。

人们在有关减缓和控制尿素的溶解及释放速率方面做了大量研究, 前人^[7]的研究主要集中于对普通尿素用无机、有机材料直接包膜和对尿素进行改性, 进而控制尿素的溶解过程, 或者直接添加脲酶抑制剂来减缓尿素的酶解速率^[8]。尿素包膜可将尿素释放周期延长, 克服尿素施入土壤中溶解过快的缺点, 但不能控制溶出尿素在土壤中的转化, 且工艺复杂、成本较高; 普通尿素添加脲酶抑制剂可有效减缓尿素的酶解速率, 但有研究^[9]表明, 其延缓尿素水解的持效时间较短。氢醌(HQ)是一种酚类脲酶抑制剂, 因其在农业生产实践中具有较高的性价比, 目前在国内外得到较为广泛的关注与应用^[10]。有研究^[11]表明, HQ 与其他脲酶抑制剂相比, 在减少氮肥的损失量和提高作物产量方面效果更为明显; 但也有研究^[12]发现, HQ 对尿素水解的抑制作用随时间的延长而迅速减弱。因此, 提高 HQ 对土壤中脲酶活性抑制作用的持效性, 已成为 HQ 增效尿素研究中亟待解决的科学问题。

为此, 本文在借鉴前人研究成果的基础上, 将肥料包膜技术应用到 HQ 上, 以延长 HQ 的持效期, 对 HQ 进行部分或全部包膜与普通尿素进行掺混制备增效尿素, 采用盆栽试验的研究方法, 研究不同 HQ 增效尿素对小麦生长、产量及土壤不同形态氮素含量和脲酶活性的影响, 明确 HQ 部分或全部包膜对抑制尿素水解的影响及机理, 为有效提高氮素利用率、降低氮肥施用的环境风险、促进新型缓/控氮肥的研发提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试肥料为普通尿素(N 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 12%)和氯化钾(K_2O 60%), 脲酶抑制剂采用氢醌(Hydroquinone, HQ)。包膜 HQ 的制备方法为: (1) 包膜 HQ 的主要原料为明胶胶囊、石英砂和 HQ 粉末, 包膜采用的明胶胶囊主要成分为淀粉、色素和食用胶, 对土壤环境无污染; (2) 制备过程中首先将 HQ 白色针状结晶研磨细化, 然后将其与石英砂按照质量比 1 : 100 的比例混合均匀, 称取混合后的肥料 0.05 g 装入胶囊壳体中, 罩紧胶囊帽, 制成包膜缓释 HQ。包膜 HQ 增效尿素的制备方法为: 将普通 HQ 与包膜 HQ 按照不同混合比例与尿素进行掺混制成包膜脲酶抑

制剂增效尿素。试验于 2017 年 10 月至 2018 年 6 月在山东农业大学资源与环境学院实验站(36.16°N, 117.15°E)进行, 供试土壤为棕壤, 质地为黏壤土, 试验前土壤基础肥力为: 土壤 pH 6.50, 电导率 145.04 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 有机质含量 14.10 g/kg, 有效氮含量 62.01 mg/kg, 全氮含量 0.86 g/kg, 有效磷含量 49.75 mg/kg, 速效钾含量 271.12 mg/kg。供试作物为小麦, 品种为“泰农 18”。

1.2 试验设计

采用盆栽试验, 于 2017 年 10 月 21 日播种, 2018 年 6 月 4 日收获。试验共设 5 个处理: (1) 不施氮肥(CK); (2) 普通尿素(U); (3) U + 普通脲酶抑制剂 HQ(SRU1); (4) U + 100% 包膜 HQ(SRU2); (5) U + 30% 普通 HQ + 70% 包膜 HQ(SRU3)。每盆装风干土 5.00 kg, 肥料施用量 N、 P_2O_5 、 K_2O 分别为 0.10, 0.05, 0.05 g/kg 土, HQ 添加量按照纯 N 的 0.80% 与尿素掺混施入。除普通尿素处理中氮肥基施 50%, 拔节期追施 50%, 其余肥料均一次性施入。将肥料与土壤混合均匀, 每盆播小麦种子 15 粒, 待小麦出苗后于两叶一心期定苗 10 株。每个处理设 12 次重复, 随机区组排列, 其他管理与常规盆栽试验相同。

1.3 样品的采集与测定

分别于小麦的返青期(3 月 16 日)、拔节期(4 月 18 日)、灌浆期(5 月 14 日)、成熟期(6 月 4 日)采用破坏性取样的方法, 采集小麦植株样品和土壤样品, 其中每个处理随机取 3 盆重复。

小麦植株样品的测定: 每盆中小麦的株高、分蘖、鲜重及干重采用常规测量和天平称量方法, 叶绿素含量 SPAD 值采用便携式叶绿素仪(SPAD502)测定。小麦成熟期时, 测定各处理每盆小麦的穗数、穗长、穗粒数、千粒重及产量。

土壤样品的测定: 将每盆中的土混合均匀, 风干、研磨、过筛, 测定土壤中氮含量和脲酶活性。土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量采用 2 mol/L 的 KCl 浸提, 流动分析仪测定; 有效氮(Available N, AN)含量采用碱解扩散法测定^[13-14]; 土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定, 以 24 h 每克土壤中产生的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的毫克数表示^[15]。

1.4 计算指标及数据处理

氮肥农学利用率 $\text{NFAE}(\text{kg}/\text{kg}) = (\text{施氮区籽粒产量} - \text{不施氮区籽粒产量}) / \text{施氮量}$

氮素利用率 $\text{NUE}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{籽粒产量} / \text{供氮量}$ ^[16]

供氮量 $(\text{g}/\text{pot}) = \text{施氮量}(\text{g}/\text{pot}) + \text{播前土壤中无机态氮含量}(\text{g}/\text{pot})$ ^[17]

氮肥偏生产力 $\text{PFP}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{籽粒产量} / \text{施氮量}$

氮肥产量贡献率(%)=(施氮区籽粒产量—不施氮区籽粒产量)/施氮区籽粒产量×100%

采用 Excel 2007 软件处理数据和绘表,采用 DPS 7.05 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 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长及产量的影响

2.1.1 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长的影响

由表 1 可知,脲酶抑制剂增效尿素可促进小麦生长,与 U 相比,SRU1、SRU2、SRU3 处理的株高在小麦返青期分别增加 33.77%,24.52%,55.17%,拔节期分别增加 3.02%,13.62%,0.69%,说明包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦前期株高的影响优于普通脲酶抑制剂增效尿素。小麦生长期间各施肥处理的叶

片 SPAD 值均普遍高于 CK,除灌浆期外,脲酶抑制剂增效尿素可不同程度提高小麦功能叶片的 SPAD 值,其中与 U 相比,返青期 SRU1、SRU2、SRU3 处理分别提高叶片 SPAD 值的 7.37%,11.81%,27.73%;拔节期叶片 SPAD 值以 SRU3 处理最高,较其他处理增幅分别为 20.16%,0.94%,2.31%,2.50%,说明包膜脲酶抑制剂增效尿素可提高小麦叶片的叶绿素含量,从而有利于光合作用的进行和小麦的生长发育。从表 1 还可看出,与对照相比,施氮处理可增加小麦的有效分蘖数,其中包膜脲酶抑制剂增效尿素对增加小麦分蘖的影响更为显著,与 SRU1 相比,SRU2、SRU3 处理分蘖数分别增加 28.91%,40.63%。说明包膜脲酶抑制剂增效尿素能够促进小麦生长,提高叶片叶绿素含量,增加小麦分蘖数,有利于小麦构建良好的群体,其中以 SRU3 处理效果最优。

表 1 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长指标的影响

处理	株高/cm			SPAD			有效分蘖数
	返青期	拔节期	灌浆期	返青期	拔节期	灌浆期	
CK	8.36±1.64c	25.04±5.90c	40.70±3.01ab	46.69±5.59b	44.30±3.84b	39.25±5.82c	1.13±0.25b
U	8.32±1.05c	33.47±3.47b	41.72±3.08a	44.11±5.22b	52.73±0.97a	51.22±3.54a	1.35±0.13b
SRU1	11.13±2.08b	34.48±4.26b	37.91±3.90c	47.36±6.39b	52.00±1.94a	47.95±4.17ab	1.28±0.10b
SRU2	10.36±2.53b	38.03±2.83a	38.49±3.31bc	49.32±9.96b	51.90±4.52a	49.23±3.92ab	1.65±0.13a
SRU3	12.91±1.89a	33.70±2.78b	37.66±3.85c	56.34±7.13a	53.23±0.21a	46.50±6.53b	1.80±0.21a

注:表中数据为平均值±标准差;数字后不同字母表示差异达 5%显著水平。下同。

由表 2 可知,小麦拔节期至灌浆期,地上部鲜、干重逐渐增加,与 CK 相比,各施肥处理地上部鲜重、干重均有所提高。拔节期,与 U 相比,SRU1、SRU2、SRU3 的小麦鲜重分别增加 68.38%,56.21%,84.94%,干重分别增加 50.25%,55.16%,70.40%,说明 HQ 与尿素掺混施用能够显著增加小麦拔节期地上部物质积累,促进小麦生长,其中以 SRU3 处理对小麦生长的促进作用最大。灌浆期,SRU1 处理小麦地上各部位鲜重、干重均低于普通尿素处理,而 SRU2、SRU3 与 U 相比,分别增加小麦茎干重的 73.36%,19.36%,叶干重的 39.94%,0.74%,穗干重的 10.30%,40.78%,说明 HQ 部分或全部包膜与普通尿素掺混能够显著增加小麦灌浆期地上部干重,促进小麦后期干物质的积累,其中 SRU2 处理的小麦茎、叶鲜重和干重显著高于其他处理,说明包膜 HQ 能促进小麦灌浆期茎叶的生长,而 SRU3 处理增加了小麦穗的质量,说明 HQ 部分包膜更能促进小麦后期干物质向籽粒的转运,从而促进小麦增产。

表 2 不同时期小麦地上部鲜重和干重

单位:g/pot

处理	拔节期		灌浆期					
	鲜重	干重	茎		叶		穗	
			鲜重	干重	鲜重	干重	鲜重	干重
CK	39.56b	11.06b	41.38b	18.46b	6.73b	4.15b	49.86a	26.50a
U	41.56b	11.82b	63.55ab	25.41b	13.14ab	6.76ab	61.23a	28.74a
SRU1	69.98a	17.76a	56.97ab	25.25b	11.20b	5.32b	57.85a	26.01a
SRU2	64.92a	18.34a	87.59a	44.05a	18.57a	9.46a	65.12a	31.70a
SRU3	76.86a	20.14a	68.71ab	30.33b	13.23ab	6.81ab	80.47a	40.46a

2.1.2 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦产量及氮素利用率的影响 从表 3 可以看出,与 CK 相比,各施肥处理增产幅度均大于 24.84%,说明施用尿素能够增加小麦产量。与 U 相比,SRU2、SRU3 分别增产 25.04%,45.30%,说明将脲酶抑制剂 HQ 进行部分或全部包膜与

尿素掺混一次性基施,能够促进小麦增产;SRU1 与 U 相比减产 7.18%,说明在本试验条件下,普通脲酶抑制剂 HQ 与尿素掺混一次性基施效果不好。

从产量构成因素来看,各处理间千粒重差异不显著,穗数和穗粒数是引起产量差异的关键因素,与 SRU1

相比,SRU2、SRU3 处理穗数分别增加 16.48%,23.08%;穗粒数分别增加 15.38%,31.87%,其中穗粒数与穗长正相关,各处理中穗越长,穗粒数越多。说明将 HQ 进行部分或全部包膜与尿素掺混施用,是通过增加

小麦穗数和穗粒数来增加小麦产量,其中 SRU3 处理将 HQ 进行 70%包膜与尿素掺混施用,对增加小麦穗数和穗粒数的影响最显著,获得产量最高,表明将 HQ 部分包膜对尿素的增效作用更明显。

表 3 小麦产量及其构成因素

处理	穗长/cm	穗数	穗粒数	千粒重/g	产量/(g·pot ⁻¹)
CK	5.30±0.39c	21.25±2.50b	20.00±2.58c	36.95±0.78a	15.74±3.01c
U	5.80±0.34bc	23.50±1.29b	23.75±0.96b	38.00±0.91a	21.17±0.42b
SRU1	5.50±0.13c	22.75±0.96b	22.75±1.71bc	37.93±0.93a	19.65±2.10bc
SRU2	6.10±0.21ab	26.50±1.29a	26.25±2.22b	37.83±1.72a	26.47±4.22a
SRU3	6.60±0.61a	28.00±2.16a	30.00±3.37a	36.50±0.63a	30.76±5.20a

氮素利用率是籽粒产量与供氮量的比值,本试验施氮处理的施氮量相同,小麦的氮素利用率与产量变化相一致。由表 4 可知,SRU1 处理的氮素利用率最低,而与 U 相比,SRU2、SRU3 处理分别提高氮

素利用率的 25.02%和 45.26%,说明 HQ 包膜与尿素掺混施用能够显著提高小麦氮素利用率,其中以 70%包膜的 HQ 与尿素掺混氮素利用效果最显著。

表 4 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦氮素利用率的影响

处理	氮肥农学利用率 NFAE/ (kg·kg ⁻¹)	氮素利用率 NUE/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 PFP/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥产量 贡献率/%
CK	—	—	—	—
U	10.86bc	26.14bc	42.34bc	25.63b
SRU1	7.82c	24.26c	39.30c	19.25b
SRU2	21.46ab	32.68ab	52.94ab	39.21a
SRU3	30.03a	37.97a	61.51a	47.78a

从氮肥的农学利用率、偏生产力及产量贡献率来看,SRU3 处理较其他处理的氮肥农学利用率分别提高 176.52%,284.02%,39.93%,氮肥偏生产力分别提高 45.28%,56.51%,16.19%,氮肥产量贡献率分别提高 86.42%,148.21%,21.86%,均从不同程度反映 SRU3 处理对小麦的增产效果最优,说明 HQ 部分包膜效果最好。

2.2 包膜脲酶抑制剂增效尿素对土壤氮含量的影响

2.2.1 包膜脲酶抑制剂增效尿素对土壤 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 含量的影响 从图 1a 可以看出,各处理中土壤 NH₄⁺—N 含量均明显高于 CK;除普通尿素处理 U 拔节期追肥,使其灌浆期土壤中 NH₄⁺—N 含量明显升高外,其他处理土壤 NH₄⁺—N 含量基本呈前期逐渐下降,趋于稳定后又下降的趋势。在小麦返青期,SRU1、SRU2 和 SRU3 处理与 U 相比,土壤 NH₄⁺—N 含量分别降低 15.98%,4.57%和 9.91%,说明脲酶抑制剂 HQ 能够抑制尿素水解,降低土壤中 NH₄⁺—N 含量。小麦拔节期与 U 相比,SRU1、SRU2 和 SRU3 处理分别提高土壤 NH₄⁺—N 含量的 26.24%,12.47%和 20.96%,说明脲酶抑制剂 HQ 能够延缓尿素的水解进程。灌浆期与 SRU1 相比,SRU2、SRU3 处理土壤 NH₄⁺—N 含量分别增加 6.65%,13.77%,说明与普通 HQ 相比,将 HQ 进行部分或全部包膜与尿素掺混施用能够延长 HQ 的作用时间,增加小麦生育后期土壤

中 NH₄⁺—N 含量。其中 SRU3 处理在小麦生长前期能够有效抑制尿素水解,后期能够延缓尿素的水解进程,延长 HQ 的作用时间,与尿素掺混的作用效果最好。从图 1b 可以看出,土壤中 NO₃⁻—N 含量在小麦灌浆期前呈下降趋势,灌浆期后 NO₃⁻—N 含量有所上升,各处理 NO₃⁻—N 含量均高于 CK。小麦生长前期,各处理间虽存在一定差异,但 HQ 对土壤 NO₃⁻—N 含量的影响不明显,未能减少土壤的 NO₃⁻—N 含量;小麦拔节期,SRU3 与 U 处理相比,降低土壤 NO₃⁻—N 含量的 23.62%;小麦生长后期各处理土壤中 NO₃⁻—N 含量无明显差异。说明脲酶抑制剂 HQ 在小麦生长前期未能减少对土壤中氮的氧化,后期对尿素氮的硝化抑制作用不明显。

2.2.2 包膜脲酶抑制剂增效尿素对土壤有效氮含量的影响 从图 2 可以看出,在小麦生育期内,土壤有效氮含量呈现前期逐渐下降、后期趋于稳定的趋势;与 CK 相比,各施肥处理均明显提高土壤有效氮含量。在小麦返青期,与 U 相比,SRU1、SRU2、SRU3 处理分别降低土壤中有效氮含量的 8.55%,4.61%,6.25%,说明脲酶抑制剂增效尿素前期能够抑制尿素水解,减少土壤中有效氮含量;到小麦拔节期,U 处理土壤中有效氮含量降低幅度最大,与 U 相比,SRU1、SRU2、SRU3 处理分别提高土壤中有效氮含量的 2.97%,7.24%,8.42%;在小麦生长后期,U 处

理在拔节期进行追肥,引起灌浆期土壤有效氮含量有所增加,与 SRU1 相比,SRU2 对土壤有效氮含量的影响不明显,SRU3 分别在小麦灌浆期和成熟期提高

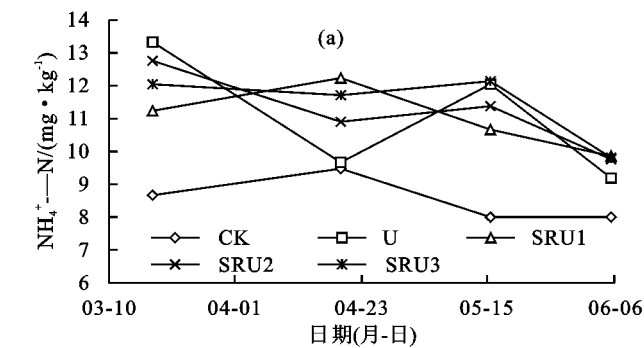


图 1 小麦不同生育时期土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的变化

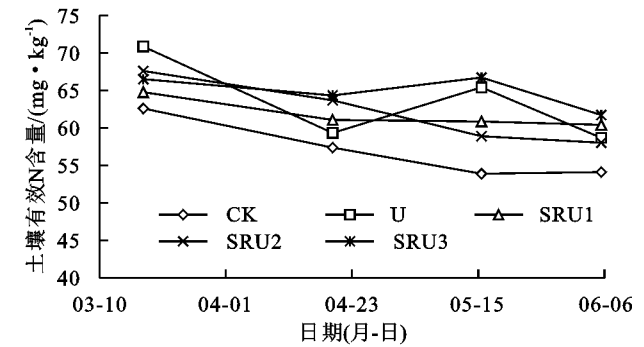


图 2 小麦不同生育时期土壤有效氮含量的变化

2.3 包膜脲酶抑制剂增效尿素对土壤脲酶活性的影响

由图 3 可知,小麦生育期内土壤脲酶活性随小麦生长呈逐渐降低的趋势,且各处理脲酶活性均低于普通尿素处理,各处理脲酶活性在 3 月 16 日至 4 月 18 日及 5 月 14 日至 6 月 4 日期间下降明显,在 4 月 18 日至 5 月 14 日期间趋于平缓。其中与 U 相比,SRU1、SRU2、SRU1 处理土壤脲酶活性在返青期分别降低 15.18%,2.66%,5.50%,在拔节期分别降低 15.37%,17.97%,13.20%,在灌浆期分别降低 9.66%,9.43%,3.91%,说明脲酶抑制剂 HQ 与普通尿素掺混施用可以有效抑制土壤脲酶活性,降低尿素水解速率。其中将 HQ 包膜与尿素掺混施用,在小麦生长前期能够有效抑制土壤脲酶活性,后期能够延长 HQ 的作用时间使土壤脲酶活性保持在较低水平,从而延缓尿素的转化进程,减少损失,提高肥效。

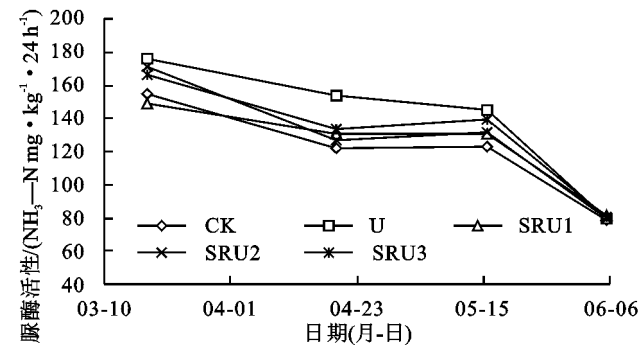
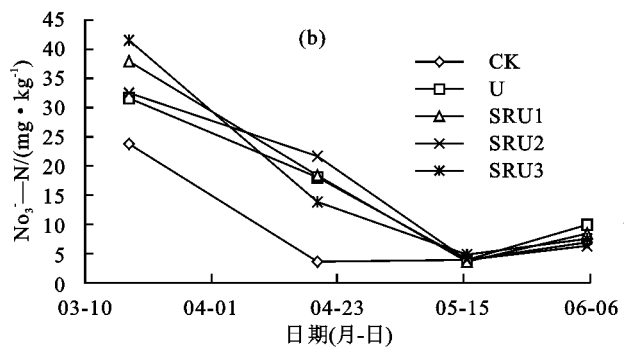


图 3 小麦不同生育时期土壤脲酶活性的变化

土壤有效氮含量的 9.50%,2.46%,说明将 HQ 进行部分包膜与尿素掺混施用,能增加小麦后期土壤中有有效氮含量,为小麦后期生长提供充足氮源。



3 讨论

3.1 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长及产量的影响

目前脲酶抑制剂在延缓尿素的水解及提高氮肥利用率方面已得到广泛验证,但主要还是集中在对产品的筛选及机理方面的研究,而在农业生产中的推广应用还不普遍,其对作物产量影响的研究结果也不完全一致。有研究^[18]表明,脲酶抑制剂可以提高作物产量和氮素利用效率,但也有研究^[19]表明,其对作物产量没有影响或影响不显著。本研究结果表明,脲酶抑制剂 HQ 与尿素掺混施用能够促进小麦生长(表 1),增加小麦生长的株高,促进小麦分蘖,提高小麦功能叶片的 SPAD 值,并能增加小麦地上部物质积累量(表 2)。李小娅等^[20]证实了施用脲酶抑制剂尿素处理的小麦较无氮及常规尿素处理长势平稳旺盛,这与本研究结果一致。包膜 HQ 处理小麦灌浆期干物质积累比普通 HQ 处理具有明显优势,而 SRU3 的 HQ 部分包膜处理能促进小麦后期干物质向籽粒的转运,从而为其产量构成以及产量的增加奠定良好的物质基础。前人^[21]研究表明,脲酶抑制剂氢醌掺混尿素配合磷钾处理能促进小麦氮的吸收效率,显著改善小麦的产量构成,提高小麦产量。本研究表明,普通 HQ 与尿素掺混施用对小麦产量没有显著影响,而包膜 HQ 能够显著提高小麦产量,增加小麦穗数和穗粒数(表 3),提高氮素利用率(表 4)。这可能是由于对 HQ 进行包膜处理能够延长其对土壤中脲酶的作用时间,延缓尿素的转化速率,增加尿素氮的利用率,促进冬小麦群体数量和干物质累积量的增加,从而增加小麦的穗数和穗粒数;同时,促进小麦对氮素的吸收利用,提高氮素利用率。而添加 30% 普通 HQ 和 70% 包膜 HQ 的氮肥处理促进小麦生长前期所积累的干物质更大比例地向籽粒的积累转运,提高

小麦产量和氮素利用率的效果最优,表明抑制剂部分包膜效果更好。

3.2 包膜脲酶抑制剂增效尿素对土壤氮素形态的影响

尿素施入土壤后,首先在脲酶的催化作用下水解形成 $\text{NH}_4^+ - \text{N}^{[22]}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在土壤微生物的作用下氧化成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均可被作物直接吸收利用,但由于尿素水解时间短,水解的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 来不及被作物吸收利用,导致短期内土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量升高及 NH_3 的挥发损失^[4],而氧化的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 易发生淋洗进入地下水,造成 N 素损失和对环境的污染。有研究^[18]表明,脲酶抑制剂能延缓尿素水解,使前期土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量低于普通尿素处理,而后期增加土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,从而保障作物后期供氮充足。本试验表明, HQ 与尿素掺混施用,在小麦生长前期能够降低土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,维持土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的适宜浓度,而在小麦生长中后期增加 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量。吴玉光^[23]研究发现, HQ 作为氮肥增效剂对土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的影响显著;周礼恺等^[12]证实了 HQ 能延缓尿素的水解,增加土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量。在本研究中,包膜 HQ 能够延长对尿素水解的作用时间,增加后期土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,保障小麦后期供氮充足,延缓植株的衰老进程。而其中 SRU3 处理中将 HQ 进行 70% 包膜与尿素掺混施用,前期对尿素水解抑制作用明显,有效降低土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,后期延长 HQ 的作用时间,增加土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量并延长其供应时间,保证小麦后期生长土壤中氮的供应。这可能是由于将 HQ 进行部分包膜,在小麦生长的前期和后期均能维持土壤中 HQ 的含量,从而对尿素水解起到持续的抑制作用,延长尿素的肥效。有研究^[11]表明,脲酶抑制剂可以通过抑制土壤脲酶活性,延缓尿素水解,降低土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 生成来减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋溶水平;也有研究^[24]证明, HQ 不仅是一种脲酶抑制剂,同时具有一定的硝化抑制作用;周礼恺等^[12]通过室内培养试验证实 HQ 能有效地减少氨的氧化,使硝酸盐的形成量明显下降。本研究结果表明, HQ 与尿素掺混施用可以延长 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在土壤中停留的时间,但对土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的积累影响不显著,这可能是由于小麦生育期较长,而脲酶抑制剂对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的影响只能通过铵态氮的硝化起间接作用,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 后期被作物吸收利用及淋溶损失,再加上 HQ 的有效性在很大程度上会受环境条件影响,以及 HQ 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的固持作用,使脲酶抑制剂增效尿素对土

壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的影响不明显。

土壤有效氮包括 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及部分有机物中易分解、比较简单的有机态氮,是作物生长过程中短时间内易吸收利用的氮,在农业生产上可直接用其来评价土壤的供氮强度^[25]。前人研究^[22]表明,脲酶抑制剂能减少肥料氮素损失,提高氮素利用效率;而 HQ 能够增加尿素氮的生物固持,意味着土壤中氮素对作物的持续供应能力有了相应的增强^[12]。本研究表明, HQ 与尿素掺混施用能够增加土壤有效氮的含量,说明 HQ 增强了尿素氮对作物的有效持续供应和减少了它的总损失。其中将 HQ 进行部分包膜与尿素掺混施用使土壤中有效氮含量保持在较高且稳定水平,并能增加小麦生长后期土壤有效氮含量,保障在小麦生长期对氮的持续供应。这可能是由于将 HQ 全部包膜,前期对尿素水解的抑制作用不明显,造成部分氮素的损失,后期不能增加土壤有效氮含量,而将 HQ 进行部分包膜,前期能够有效抑制尿素水解,后期缓释的 HQ,能够延长 HQ 的作用时间,增加尿素肥效,减少氮素损失,保证氮素的持续供应。

3.3 包膜脲酶抑制剂增效尿素对土壤脲酶活性的影响

土壤脲酶是土壤氮素循环中唯一作用于尿素的土壤水解酶类,能直接将酰胺态有机氮化物水解转化为供作物吸收利用的无机态氮化物,适宜条件下尿素施入土壤后在土壤脲酶的作用下迅速水解^[4],造成尿素的作用时间短,利用率低。而脲酶活性是影响尿素水解的最主要因素^[26],脲酶活性越强,尿素水解越快,导致分解的产物来不及被农作物吸收就挥发掉或随地下水流失。因此,延长尿素的作用时间,提高其利用率,关键是控制引起尿素水解的脲酶活性。前人^[12]研究表明,脲酶抑制剂可以有效抑制土壤脲酶活性,降低尿素的水解速率,提高尿素利用率。本试验研究表明,脲酶抑制剂 HQ 能够降低土壤脲酶活性,并控制土壤脲酶活性保持在较低水平,从而降低尿素的水解速率,延长尿素的作用时间。张志明等^[27]通过室内模拟、¹⁵N 示踪和田间试验研究结果表明, HQ 有抑制脲酶活性的效应;周礼恺等^[12]证实尿素的水解作用和脲酶的活性相关,在肥料制作时添加 HQ 可延缓其水解速度,但 HQ 对尿素水解的抑制是短时间的,其抑制脲酶活性的作用会随着时间的延长逐渐衰减,这些研究与本研究结果一致。

本研究发现,包膜脲酶抑制剂增效尿素可以延长 HQ 对土壤脲酶活性的作用时间,使土壤中脲酶的活性在小麦生长期间维持在较低水平,从而延缓尿素水

解进程,增强对尿素水解的抑制作用,提高氮素利用率。本试验条件下,SRU3 处理中的 HQ 有 70% 为包膜 HQ,在小麦生长前期 30% 的普通 HQ 能够有效降低土壤脲酶活性,后期包膜处理的 HQ 延长了 HQ 对脲酶的作用时间,保障小麦氮素的供应,有效提高了小麦产量和氮素利用率。

4 结 论

与普通 HQ 相比,将 HQ 进行部分或全部包膜与尿素掺混一次性施用能够促进小麦生长,改善小麦产量构成,增加小麦产量,并提高氮素利用率。

将 HQ 全量的 70% 进行包膜与尿素掺混施用,前期能够有效降低土壤中的脲酶活性,抑制尿素水解,维持土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的适宜浓度,而后期包膜处理的 HQ 能有效延长 HQ 对脲酶的作用时间,保证土壤中较高的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,减少氮素损失,增加土壤中有效氮含量,提高土壤有效氮的持续供应能力和供氮潜力,从而提高小麦产量。

本试验条件下,HQ 部分包膜与尿素掺混施用在增强土壤供氮能力和提高小麦产量方面效果最优,表明 HQ 部分包膜与尿素掺混施用优于 HQ 不包膜处理和 100% 包膜处理,但 HQ 最优包膜比例的确定将是下一步筛选研究的重点。

参考文献:

[1] 尚辉.化肥减量对玉米农田土壤氮分布及作物氮吸收的影响[J].江苏农业科学,2018,46(20):66-69.

[2] 姜洪涛.谈如何有效提高肥料利用率[J].农业与技术,2018,38(6):32.

[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 di-cyandiamide[C]//Ji L, Chen G X, Schnug E, et al. Fertilization in the Third Millennium-Fertilizer, Food Security and Environmental Protection, Proceedings, vol. II. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House,2003:1175-1192.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Moiser A R, Bleken M A, Chaiwanakupt P, et al. Policy Implications of human-accelerated nitrogen cycling[J].Biogeochemistry,2002,57/58:477-516.

[7] 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.

[8] 万伟帆,李斐,红梅,等.氮肥用量和脲酶抑制剂对滴灌

马铃薯田氧化亚氮排放和氮挥发的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):693-702.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 郑福丽,李彬,等.脲酶抑制剂的作用机理与效应[J].吉林农业学,2006,31(6):25-28.

[12] 周礼恺,赵晓燕,李荣华,等.脲酶抑制剂氢醌对土壤尿素氮转化的影响[J].应用生态学报,1992,3(1):36-41.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1986.

[14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000:205-226.

[15] 关松荫.土壤酶及研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[16] Dai X L, Zhou X H, Jia D Y, et al. Managing the seeding rate to improve nitrogen-use efficiency of winter wheat[J].Field Crops Research,2013,154:100-109.

[17] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency to nitrogen utilization[J].Agronomy Journal,1982,75:562-564.

[18] 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].植物营养与肥料学报,2018,24(1):95-104.

[19] Li Q Q, Yang A L, Wang Z H, et al. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China[J]. Field Crops Research,2015,175:96-105.

[20] 李小娅,高红兵,张权峰,等.脲酶抑制剂尿素在冬小麦上的应用效果研究[J].现代农业科技,2017(11):12-13.

[21] 李晓鸣.氢醌在小麦吸收利用氮素中的作用[J].黑龙江农业科学,2002(4):4-5.

[22] 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.

[23] 吴玉光.氮肥增效剂的应用效果[J].北京农业科学,1999(17):33-35.

[24] Xu X K, Zhou L K, Cleemput O V, et al. Fate of urea- ^{15}N in a soil-wheat system as influenced by urease inhibitor hydroquinone and nitrification inhibitor dicyandiamide[J]. Plant and Soil,2000,220(1/2):261-270.

[25] 焦晓光,梁文举,陈利军,等.脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响[J].应用生态学报,2004,15(10):1903-1906.

[26] 王天元,宋雅君,腾鹏起.土壤脲酶及脲酶抑制剂[J].化学工程师,2004(8):22-24.

[27] 张志明,武冠云,李荣华,等.脲酶抑制剂氢醌提高尿素肥效的研究[J].土壤通报,1987,18(5):214-216.