

植物诱抗剂对尿素氮利用率和小麦产量的影响

秦瑞劼¹, 张民¹, 刘之广¹, 李泽丽¹, 陈琪¹, 王庆彬²

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 国家缓控释肥工程技术研究中心,

山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东蓬勃生物科技有限公司, 山东 泰安 271018)

摘要: 为研究植物诱抗剂配伍尿素和控释尿素对小麦产量及构成因素、氮肥利用率和土壤养分的影响, 通过对尿素包膜(CRU)、包膜尿素配施诱抗剂(CRUR)、尿素配施植物诱抗剂(UR)的处理方式, 进行了小麦大田试验, 以尿素(U)和无氮(CK)处理为对照, 共设置 5 个处理。结果表明: (1) 尿素配施诱抗剂处理的小麦产量和氮肥利用率比尿素处理显著提高 23.6% 和 10.1 个百分点, 纯收益显著增加 3 269 元/hm²。(2) CRUR 处理较 CRU 处理小麦产量和氮肥利用率显著增加 14.5% 和 12.4 个百分点, 纯收益显著提高 2 361 元/hm²; 比 UR 处理显著提高 16.3% 和 11.9 个百分点, 纯收益增加 2 446 元/hm²。(3) 在小麦拔节期即氮肥最大效率期, CRUR 处理的土壤硝态氮含量比 CRU 处理显著增加 29.5%, 比 UR 处理显著增加 88.2%; CRUR 处理的土壤铵态氮含量比 UR 处理显著提高 34.4%。控释尿素配施植物诱抗剂可实现两者协同增效, 显著提高小麦生育关键期土壤氮素供应强度、产量、氮肥利用率和纯收益, 为促生型缓控释肥料的研发与应用提供依据。

关键词: 控释肥; 植物诱抗剂; 土壤养分; 产量; 氮素利用率

中图分类号: S482.99; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0327-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.052

Effects of Plant Inducer on Nitrogen Use Efficiency of Urea and Wheat Yield

QIN Ruijie¹, ZHANG Min¹, LIU Zhiguang¹, LI Zeli¹, CHEN Qi¹, WANG Qingbin²

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, National Engineering and Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers, College of Recourses and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018; 2. Shandong Pengbo Biotechnology Company, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In order to study the influence of urea and controlled-release urea combined with plant inducer on the wheat (*Triticum aestivum* L.) yields, nitrogen use efficiency and soil nutrients, a field experiment was designed with five treatments, which were controlled-release urea (CRU), controlled-release urea combined with plant inducer (CRUR), urea added plant inducer (UR), urea (U) and no nitrogen (CK) treatments as the control. The results showed: (1) Wheat yield of UR was significantly increased by 23.6%, the nitrogen use efficiency was improved by 10.1%, and the net income was significantly increased by 3 269 Yuan per hectare, compared with U. (2) Wheat yield of CRUR was significantly increased by 14.5%, the nitrogen use efficiency improved by 12.4% and net income was significantly increased by 2 361 Yuan per hectare, compared with UR. Wheat yield of CRUR was significantly increased by 16.3%, the nitrogen use efficiency was improved by 11.9% and net income was significantly increased by 2 446 Yuan per hectare, compared with CRU. (3) During the maximum nitrogen use efficiency period of wheat growth, soil nitrate content of CRUR was significantly increased by 29.5% compared with CRU, but increased by 88.2% compared with UR. Soil ammonium content of CRUR was significantly increased by 34.4% compared with UR. These findings indicated that CRUR could achieve synergistic effects, increase the wheat yield, nitrogen use efficiency, net income and soil available nutrient supply intensity. Then, the research results could provide reference for the development and application of slow and controlled-release fertilizer combined with plant inducers.

Keywords: controlled release fertilizer; plant inducers; soil nutrient; yield; nitrogen use efficiency

控释肥料是指以各种调控机制使养分按照设定的模式释放(释放率和释放时间)与作物吸收养分的规律相一致的肥料^[1];控释肥具有养分释放与作物需求同步、挥发淋溶少、减少环境污染等特点^[2],科学施用缓控释肥料是我国化肥减施增效的重要技术之一。张务帅等^[3]研究表明,控释肥对小麦有显著的增产作用;王文岩等^[4]研究表明,控释肥可显著提高肥料利用率;马富亮等^[5]研究表明,控释肥的养分释放周期可吻合小麦的需肥周期。然而,控释肥推广过程中,还存在价格偏高和控释期与作物的适配性不强等问题^[6]。

植物诱抗剂能有效的调节作物的生长发育进程,增强抗逆性,进而提升产量。通过细胞表面分子之间的作用,使植物体内发生一系列反应^[7],诱导植物体内产生新物质^[8],从而增强植物抗病性和抗逆性^[9]。植物诱抗剂具有提高产量^[10]、提高小麦的抗逆性^[11]、防控植物病害^[12]、改善品质^[13]、成本低廉^[14]、提高肥料利用率^[15]、节省劳动力的特点^[16],与肥料配伍对作物增产提质增效潜力巨大。植物诱抗剂与土壤接触易降解或失活,且施用剂量要求精准,低量无效,过量对作物会产生毒害,且需多次施用,费时费工。将植物诱抗剂与常规化学肥料定量配伍制备缓控释肥料可使其与控释养分同步释放,既延长了功能期又易于靶向施用,市场潜力巨大。然而缓控释肥料配伍植物诱抗剂的研究鲜有报道。山东蓬勃生物科技有限公司利用沙棘内生菌宛氏拟青霉(*Paecilomyces variotii*)提取物进行大量作物试验证明其具有促进根系生长特性,能够诱导植物耐旱、耐低温、促进根际微生物生长^[17]。

本研究通过大田试验,探讨尿素和控释尿素配施诱抗剂对小麦产量及其构成、氮肥利用率以及各生育期土壤硝、铵态氮养分状况的影响,为研发促生和抗逆等功能型缓控释肥料提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在山东省泰安市山东农业大学“土肥资源高效利用国家工程实验室”南校区中心试验站(36°20'N,117°13'E)进行,属暖温带大陆性季风气候,平均气温 13℃。供试土壤取自山东农业大学南校区科技园试验基地 0—20 cm 耕层土壤,试验地土壤类型为棕壤(亚类),在中国土壤系统分类中为普通筒育湿润淋溶土(Typic hapli-udic argosols)。土壤的基本化学性质为:有机质含量 12.0 g/kg,全氮含量 0.7 g/kg,硝态氮含量 26.3 mg/kg,铵态氮含量 18.5 mg/kg,有效磷含量 11.2 mg/kg,速效钾含量 91.2 mg/kg,pH 7.8(土水比 1:2.5)。供试作物,供试冬小麦品种为“济麦 22”,生育期 239 d,千粒重 40 g。施肥

后至收获期的麦田日平均气温的变化见图 1。

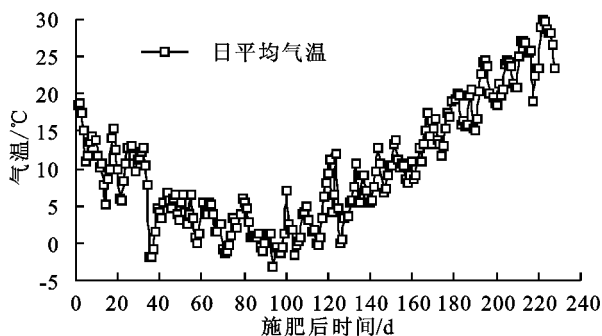


图 1 施肥后日平均气温变化曲线

供试常规肥料为普通尿素(N,46%)、重过磷酸钙(P_2O_5 ,46%)和氯化钾(K_2O ,60%),供试植物诱抗剂为沙棘内生菌宛氏拟青霉代谢产物,提取物原液的干物质含量为 2.6 mg/mL,由山东蓬勃生物科技有限公司提供。

树脂包膜尿素+植物诱抗剂肥料的制备:(1)树脂包膜前后均添加诱抗剂:将 5.0 kg 尿素置于加热转鼓中,加热至 80℃后,加入含有植物诱抗剂的原液(2.6 mg/mL)5.8 mL(分 5 次,每次稀释至 20.0 mL 后均匀喷入),待烘干后,加入 225 g 环氧树脂与 39.7 g 胺固化剂的混合液(分 5 次加入),成膜后,再次加入含有植物诱抗剂的原液(2.6 mg/mL)5.8 mL(分 5 次,每次稀释至 20.0 mL 后均匀喷入),烘干后即得该肥料成品^[18];(2)尿素+植物诱抗剂肥料的制备:将 5.0 kg 尿素置于加热转鼓中,加热至 80℃后,加入含有植物诱抗剂的原液(2.6 mg/mL)5.8 mL(分 5 次,每次稀释至 20.0 mL 后均匀喷入),烘干后即得该肥料成品。

1.2 试验设计

小麦大田试验共设 5 个处理,3 次重复:(1)氮空白(CK);(2)尿素(U);(3)尿素添加植物诱抗剂(UR);(4)包膜控释尿素(CRU);(5)包膜控释尿素包膜前后分别加植物诱抗剂(CRUR)。

大田试验施氮量为 225 kg/hm²,施磷量(P_2O_5)为 150 kg/hm²,施钾量(K_2O)为 75 kg/hm²。小区面积为 5.0×3.2 m=16.0 m²。小麦按大小行播种,共播种 14 行,2016 年 10 月 15 日播种,2017 年 6 月 9 日收获。小麦发芽率为 98%,按 50 kg/hm² 播种。

1.3 样品的采集与测定

采用室内培养箱静水养分浸提法(25℃)和土壤埋袋养分释放法测定供试包膜肥料的养分释放特征。静水养分浸提法(25℃)按照国家标准《缓释肥料》(GB/T 23348—2009)规定的方法进行测定(3,7,14,28,42,56,70,84 天)。

土壤埋袋法采用塑封机将孔径为 1 mm 的尼龙网压制成长 12 cm、宽 10 cm 的网袋,称取供试包膜控释尿素 10.0 g,装入已制作好的网袋中,塑封机封

口,埋入土中,深度为15 cm。土壤埋袋样品采集,在埋袋后第1,20,40,60,80,100,120,140,160,180,200天时取肥料袋,每次各取3袋,带回实验室后,毛刷轻扫干净,于60℃干燥箱中烘干48 h,干燥器冷却,使用蒸馏后滴定法(GBT 8572—2010,复混肥料中总氮含量的测定—蒸馏后滴定法)测定。

各时段的氮素释放率计算方法为埋袋时袋中肥料总氮量减去每次取回的肥料袋中的总氮量,除以埋袋时袋中肥料总氮量。

土壤取样时间为小麦苗期、返青期、拔节期、开花期和成熟期,在小区中心区域分别取3点,每点采样深度为0—20,20—40 cm,将相同深度土样混匀后用四分法取少量土样带回室内。将土壤自然风干,研磨,分别过2,0.25 mm筛后保存待测。

小麦收获时,取1 m²面积的植株统计株数和穗粒数。取中间8行实收地上部生物产量和籽粒产量。植株秸秆及小麦籽粒置于烘箱中105℃杀青30 min,然后转至75℃烘箱烘干至恒重,其后称重,研磨过0.25 mm筛后,待测。

土壤无机氮含量(风干土壤样品)用0.01 mol/L的CaCl₂浸提(土水比1:10),浸提液中NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量采用连续流动注射分析仪(Bran+Luebbe, AA3, 德国)测定^[19];植株全氮含量采用H₂SO₄—H₂O₂消煮,凯氏定氮法测定^[20]。

1.4 数据处理方法

试验数据分析采用Excel和SAS软件进行处理和统计分析,不同处理间采用单因素方差分析(ANOVA),采用杜肯法(Duncan)进行多重比较检验各处理平均值在P<0.05水平的差异显著性。

氮肥农学利用率(NAE, kg/kg)=(施氮区籽粒产量—不施氮区籽粒产量)/施氮量^[21]

氮肥偏生产力(NPFP, kg/kg)施氮区产量/施氮量

氮肥利用率(NUE, %)=(施氮处理氮累积量—不施氮处理氮累积量)/施氮量×100^[22]

生理利用率(kg/kg)=(施氮处理产量—不施氮处理产量)/(施氮处理氮累积量—不施氮处理氮累积量)

经济效益(元/hm²)=子粒产量(kg/hm²)×价格(元/kg)—氮肥施用量(kg/hm²)×价格(元/kg)—植物诱抗剂添加量(mg)×价格(元/mg);未考虑磷肥、钾肥、种子、农机、农药和灌水等投入,这些投入对每个处理均一致^[23]。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥氮素释放特征

在25℃静水浸提条件下,控释尿素与控释尿素添加植物诱抗剂的氮素累积释放曲线呈现“S”形,前

14天为养分释放的迟滞期,随后的14~70天为养分加速释放的线性期,70~84天为养分释放的衰减期。控释尿素释放到80%的天数为76天,而控释尿素添加植物诱抗剂氮素释放到80%释放天数为68天。控释肥养分释放机理为水蒸气进入膜内,逐渐形成饱和养分溶液,同时水蒸气将树脂膜膨胀,致使膜上微孔增大,使养分扩散溶出^[24]。植物诱抗剂的干物质为细小的固体颗粒附着在尿素表面,有可能增加其粗糙度,从而扩大了树脂膜上的微孔孔径,在同样膜厚度情况下加速了养分的释放(图2)。

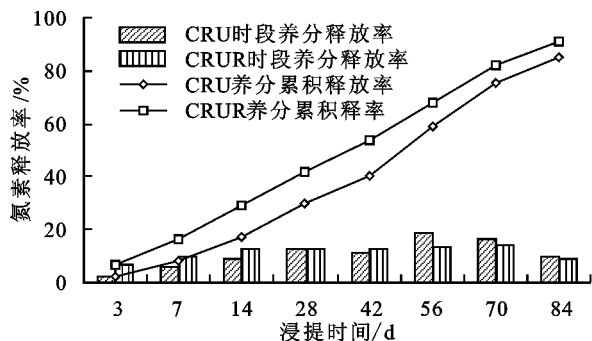


图2 控释尿素在25℃静水中的释放特征

在土壤中控释肥添加植物诱抗剂氮素累积释放曲线呈现“S”形,前1~20天为养分平稳释放期,20~60天为养分释放迟滞期,60~140天为养分慢速释放,140~180天为养分加速释放期,180~200天为养分衰竭期。控释尿素配施植物诱抗剂释放率达到80%时释放天数为177天,相较静水释放多出109天;控释尿素氮素释放率达到80%时释放天数为190天,相较于静水释放多出114天。由于在静水中控释尿素配施诱抗剂的释放率高于控释尿素,在土壤中的释放率有类似的趋势(图3)。

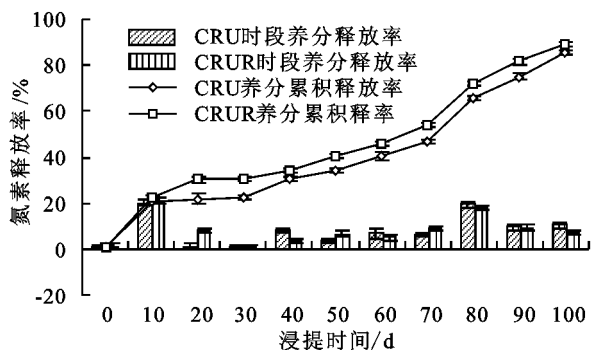


图3 控释尿素在麦田土壤中的释放特征

在20~60天的时段内,气温逐渐下降至最低点,养分出现迟滞期,减慢了控释肥的释放;60~140天,气温逐渐升高至施肥初期气温,控释肥养分平稳释放;140~180天气温持续升高(图1),小麦进入养分最大效率期,控释肥随之进入养分加速释放期,满足小麦生长发育需求;180~240天,小麦进入成熟期,对养分需求不大,控释肥进入养分衰竭期。控释肥在

土壤中释放期相比 25 ℃ 静水释放期延长了 1 倍多,这是因为控释肥在土壤中释放时的温度远低于 25 ℃ 静水释放时的温度^[25]。添加了植物诱抗剂的控释肥释放特征与普通控释肥释放特征相类似^[26],符合控释肥的要求。与尿素相比,控释肥在田间条件下呈“S”形曲线,控释尿素配施植物诱抗剂比控释尿素提前 13 天释放完毕。

2.2 配施诱抗剂对小麦产量及产量构成因素的影响

尿素添加诱抗剂(UR)处理比尿素(U)处理显著

增产 23.6%;控释尿素(CRU)处理比 U 处理显著增产 25.5%;控释尿素添加诱抗剂(CRUR)处理的产量比 CRU 处理显著增加 14.5%,比 UR 处理显著增加 16.3%。地上部生物量施肥处理显著高于 CK,而施肥处理间无显著差异。UR 处理千粒重比 U 处理显著提高 7.9%;CRUR 处理的千粒重比 CRU 处理显著提高 8.6%,与 UR 处理没有显著差异。CRUR 和 UR 处理在株数显著高于 U 处理 20.2%和 13.9%。UR 处理在穗粒数上显著高于 U 处理 14.3%(表 1)。

表 1 小麦产量及产量构成因素

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	较 U 增产/%	茎叶生物量/ (kg·hm ⁻²)	茎叶生物量较 U 增加/%	千粒重/g	穗数/ (万株·hm ⁻²)	穗粒数/株
CK	4990d	-19.3	8695b	-25.1	39.5c	394c	41c
U	6181c	—	11616a	—	43.5b	445bc	43bc
UR	7633b	23.6	12414a	6.9	47.0ab	507a	45ab
CRU	7750b	25.5	11736a	1.0	45.3b	492ab	45ab
CRUR	8880a	43.7	11517a	-0.8	49.2a	535a	48a

注:同列数字后相同字母表示差异不显著($p>0.05$)。下同。

控释尿素配施诱抗剂(CRUR)处理的产量显著高于控释尿素(CRU)的处理,说明植物诱抗剂可以伴随控释肥中尿素的释放而释放,对增产起到一定作用。控释尿素(CRU)产量显著高于尿素,尿素配施诱抗剂(UR)处理产量显著高于尿素(U)处理,并且与控释尿素(CRU)处理无显著差异,说明植物诱抗剂配尿素,有显著的增产效果。控释尿素和普通尿素生物量没有差异,但是籽粒产量有显著差异,说明控释尿素在生育后期,尤其是在育穗期养分供应强度显著大于普通尿素。相同肥料处理间(CRUR 与 CRU, UR 与 U)的穗粒数没有显著差异,而控释肥配施植物诱抗剂(CRUR)的千粒重显著高于所有未添加诱抗剂的处理,从而使产量产生显著性差异。植物诱抗剂可显著增加小麦籽粒的千粒重,此结果与文廷刚等^[27]研究一致。尿素配施诱抗剂(UR)在穗粒数和千粒重上与尿素(U)处理无显著性差异,但是在穗数上有显著性差异且 UR 处理的茎叶生物量为最高,尿素配施诱抗剂通过增加小麦分蘖的方式使产量有显著性差异。植物诱抗剂可以增加小麦的分蘖,此结果

与尚玉磊等^[28]研究结果一致。

2.3 配施诱抗剂对冬小麦氮肥利用率的影响

控释尿素(CRU)和尿素配施诱抗剂(UR)处理的氮素累积量比尿素(U)显著提高 22.5%和 22.6%;控释尿素配施诱抗剂(CRUR)处理的氮素累积量比 CRU 处理显著提高 21.7%,比 UR 处理显著提高 21.6%。UR 处理的氮肥利用率比 U 处理显著提高 10.1 个百分点;CRU 处理比 U 处理显著提高 9.6 个百分点;CRUR 处理的氮肥利用率比 CRU 处理和 UR 处理显著提高 12.4 个百分点和 11.9 个百分点。UR 处理的农学利用率显著高于 U 处理 122.2%;CRU 处理显著高于 U 处理 122.2%;CRUR 处理的氮肥农学利用率比 CRU 和 UR 处理显著提高 40.7%和 47.9%。UR 处理的氮肥偏生产力比 U 处理显著提高 23.5%;CRU 处理的氮肥偏生产力比 U 处理显著提高 17.4%;CRUR 处理的氮肥偏生产力比 CRU 处理显著提高 14.5%,比 UR 处理显著提高 11.2%。在生理利用率上 CRUR,UR 和 CRU 处理比分别 U 处理显著提高 72.2%,57.1%和 64.4%(表 2)。

表 2 小麦地上部氮素积累量及氮肥利用率

处理	氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥利用 率/%	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	生理利用率/ (kg·kg ⁻¹)
CK	71.8d	—	—	—	—
U	158.4c	24.5c	14.0c	5.3c	13.8b
UR	194.2b	34.5b	17.3ab	11.7b	21.6a
CRU	194.1b	34.0b	16.8b	12.3b	22.6a
CRUR	236.1a	46.4a	19.3a	17.3a	23.7a

控释尿素配施诱抗剂(CRUR)处理的氮肥利用率显著高于控释尿素(CRU)处理,说明植物诱抗剂可以通过显著提高籽粒的养分吸收,进一步提升产

量,在施氮量相同的情况下,诱抗剂与养分控释协同提高了氮肥利用率。CRU 处理的氮肥利用率显著高于 U 处理,此结果郭新送等^[29]的研究一致。UR 处

理的肥料利用率显著高于 U 处理,与 CRU 处理差异不显著,尿素配施诱抗剂,显著提高籽粒产量,但生物量没有显著增加,显著提高氮肥农学效率和生理效率,从而提高了氮肥利用率。

2.4 配施诱抗剂对小麦经济效益的影响

尿素配施诱抗剂(UR)处理的纯收益比尿素(U)处理显著增加 3 269 元/hm²,显著增加 23.6%;CRU 处理比 U 处理显著增加 3 355 元/hm²,显著增加 25.5%;CRUR 比 CRU 处理显著增收 2 660 元/hm²,显著增加 14.5%,比 UR 处理显著增收 2 361 元/hm²,显著增加 16.3%(表 3)。控释尿素配施诱抗剂(CRUR)处理的投入虽为最高,但经济效益显著高于控释尿素不添加诱抗剂的处理,使农民收入得到显著提高。UR 处理的经济效益显著高于 U 处理,与 CRU 处理没有显著差异。植物诱抗剂与尿素配施的成本要远低于控释肥,可以降低农民投入成本。

表 3 小麦大田籽粒收入及经济效益

处理	籽粒收入/ (元·hm ⁻²)	氮肥/ (元·hm ⁻²)	诱抗剂/ (元·hm ⁻²)	纯收益/ (元·hm ⁻²)
CK	11752d	0	0	11752c
U	14555c	776	0	13779c
UR	17974b	776	150	17048b
CRU	18250b	1116	0	17134b
CRUR	20911a	1116	300	19495a

注:树脂包膜控释尿素 2 204 元/t,尿素 1 511 元/t,小麦 2 242 元/t,植物诱抗剂 150 元/hm²。

2.5 配施诱抗剂对小麦土壤速效养分的影响

在苗期(播后 40 天)0—20 cm 土层中,尿素(U)和尿素配施诱抗剂(UR)处理土壤硝态氮含量显著高于其他处理。在拔节期(160 天),控释尿素(CRU)处理的土壤硝态氮含量比 U 处理显著增加 65.1%;CRUR 处理的土壤硝态氮含量比 CRU 处理显著增加 29.5%,比 UR 处理显著增加 88.2%。在育穗期,UR 处理的土壤硝态氮含量显著高于 U 处理 23.8%;CRU 处理的土壤硝态氮含量显著高于 U 处理 49.7%(图 4)。

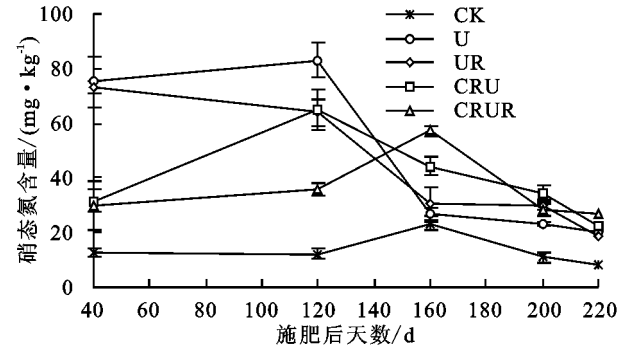


图 4 各时期 0—20 cm 土壤中硝态氮含量

在返青期(120 天)0—20 cm 土层中,控释尿素配施诱抗剂(CRUR)处理的铵态氮含量显著高于其他施肥处理。在拔节期(160 天),控释尿素(CRU)的

铵态氮含量显著高于尿素(U)50.4%;CRUR 处理的铵态氮含量比 UR 处理显著高出 34.4%。在育穗期,CRUR 处理的铵态氮显著高于其他施肥处理 57.9%~69.9%(图 5)。

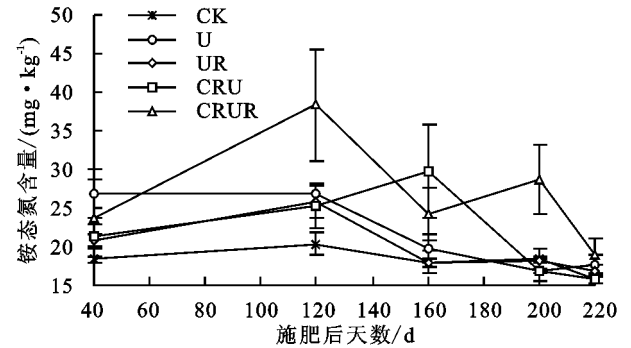


图 5 各时期 0—20 cm 土壤中铵态氮含量

在 20—40 cm 的土层中,拔节期(160 天)尿素配施诱抗剂(UR)处理的硝态氮含量比尿素(U)处理显著提高 83.2%;控释尿素配施诱抗剂(CRUR)处理的硝态氮含量比控释尿素(CRU)显著提高 168.2%。在开花期(200 天),UR 处理的硝态氮含量比 U 处理显著提高 86.4%(图 6)。

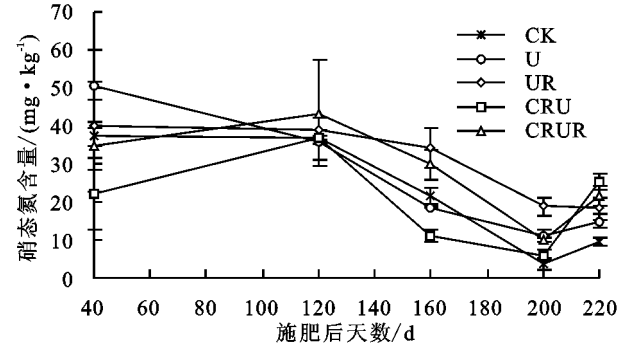


图 6 各个时期 20—40 cm 土壤中硝态氮含量

在 20—40 cm 的土层中,拔节期尿素配施诱抗剂(UR)处理的铵态氮含量比尿素(U)处理显著提高 70.2%;CRU 处理比 U 处理显著提高 28.0%;CRUR 处理比 UR 处理显著提高 36.4%,比 CRU 处理显著提高 81.5%。在开花期,CRU 处理的铵态氮含量比 U 处理显著提高 62.0%;CRUR 处理比 CRU 处理显著提高 56.3%,比 UR 处理显著提高 151.2%(图 7)。

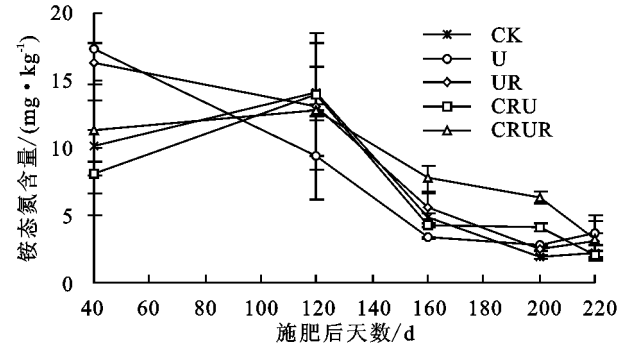


图 7 各个时期 20—40 cm 土壤中铵态氮含量

拔节期为小麦养分最大效率期^[30],0—20 cm 的土

层中的硝态氮含量, CRU 处理的显著高于 U 处理, CRUR 处理的显著高于 CRU 处理; 在 20—40 cm 的土层中, 所有配施诱抗剂处理的硝态氮含量均显著高于同类型肥料不添加诱抗剂的处理。0—20 cm 的土层中的铵态氮含量, CRUR 处理显著低于 CRU 处理, 而 CRUR 的硝态氮显著高于 CRU 处理。在 20—40 cm 的土层中, CRUR 处理无机氮养分供应强度显著高于其他处理。在 0—40 cm 的土层中, 所有配施诱抗剂的处理的硝态氮和铵态氮含量在拔节期和育穗期均显著高于同类型未配施诱抗剂处理, 为小麦生长发育和籽粒产量的形成提供了更为充足的养分。

3 结论

控释尿素 (CRU) 的产量和氮肥利用率比尿素 (U) 分别显著提高 25.5% 和 9.6 个百分点, 纯收益显著增加 3 355 元/hm²。尿素配施诱抗剂的产量和氮肥利用率比尿素显著提高 23.6% 和 10.1 个百分点, 纯收益比尿素显著增加 3 269 元/hm²。控释尿素配施诱抗剂的产量和氮肥利用率比控释尿素分别显著提高 14.5% 和 12.4 个百分点, 比尿素配施诱抗剂 (UR) 分别显著提高 16.3% 和 11.9 个百分点。控释尿素配伍诱抗剂的纯收益比控释尿素显著增加 2 361 元/hm²; 比尿素配施诱抗剂 (UR) 的纯收益显著增加 2 446 元/hm²。

在小麦拔节期即氮肥最大效率期, 控释尿素 (CRU) 处理的硝态氮含量比 U 处理显著增加 65.1%; 控释尿素配伍诱抗剂 (CRUR) 处理的硝态氮含量比 CRU 处理显著增加 29.5%, 比 UR 处理显著增加 88.2%; 控释尿素 (CRU) 的铵态氮含量比尿素 (U) 显著增加 50.4%; CRUR 处理的铵态氮含量比 UR 处理显著增加 34.4%。控释尿素配施植物诱抗剂可实现两者协同增效, 显著提高小麦生育关键期土壤氮素供应强度, 提高产量、氮肥利用率和纯收益。

参考文献:

- [1] 张民, 杨越超, 宋付朋, 等. 包膜控释肥料研究与产业化开发[J]. 化肥工业, 2005, 32(2): 7-13.
- [2] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463-473.
- [3] 张务帅, 陈宝成, 李成亮, 等. 控释氮肥控释钾肥不同配比对小麦生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 178-183.
- [4] 王文岩, 董文旭, 陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 135-141.
- [5] 马富亮, 宋付朋, 高杨, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 67-72.
- [6] 王宇婷, 文祝友, 熊海蓉, 等. 包衣尿素研究现状及发展趋势[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30(1): 17-20.
- [7] 杨普云, 李萍, 王战鄂, 等. 植物免疫诱抗剂氨基寡糖素的应用效果与前景分析[J]. 中国植保导刊, 2013, 33(3): 20-21.
- [8] 邵素琴, 李建中. 植物诱抗剂研究进展[J]. 农药, 2002, 41(6): 12-14.
- [9] Abeysekara N S, Swaminathan S, Desai N, et al. The plant immunity inducer pipecolic acid accumulates in the xylem sap and leaves of soybean seedlings following *Fusarium virguliforme* infection[J]. Plant Science, 2016, 243: 105-114.
- [10] 王祥尊, 蒲文勇, 孙剑峰, 等. 几种植物免疫诱抗剂拌种在小麦上的应用初探[J]. 南方农业, 2017, 11(10): 28-30.
- [11] 王正明, 陈明, 王文刚. 几种植物诱抗剂对小麦纹枯病防治效果研究[J]. 湖北植保, 2012(6): 18-19.
- [12] Qiu D, Dong Y, Zhang Y, et al. Plant immunity inducer development and application[J]. Molecular Plant Microbe Interactions, 2017, 30(5): 355-360.
- [13] Qiu D W. Progress and prospect of plant immunity inducer[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(1): 39-45.
- [14] 邱德文. 植物免疫诱抗剂的研究进展与应用前景[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(1): 39-45.
- [15] 齐林锁. 水稻应用智能水溶肥料试验效果[J]. 现代化农业, 2016(3): 39-40.
- [16] 张锋, 潘康标, 田子华. 植物生长调节剂研究进展及应用对策[J]. 现代农业科技, 2012(1): 193-195.
- [17] 储昭辉, 张民, 丁新华, 等. 一种宛氏拟青霉菌株 SJ1 及其应用: 中国, 201510059660.1[P]. 2015-02-05.
- [18] 杨越超, 张民. 以喷涂尿素为底涂层的改性环氧树脂包膜控释肥料: 中国, 200410024049.7[P]. 2004-04-27.
- [19] 马欣, 周连仁, 王晓巍, 等. 秸秆对根区土壤酶活性、无机氮及呼吸量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(4): 27-33.
- [20] 温云杰, 李桂花, 黄金莉, 等. 连续流动分析仪与自动凯氏定氮仪测定小麦秸秆全氮含量之比较[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 146-151.
- [21] 李大伟, 周加顺, 潘根兴, 等. 生物质炭基肥施用对蔬菜产量和品质以及氮素农学利用率的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(3): 433-440.
- [22] Gaju O, Allard V, Martre P, et al. Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes[J]. Field Crops Research, 2014, 123(2): 139-152.
- [23] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205: 106-115.
- [24] 陈剑秋, 张民, 杨越超. 包膜控释肥养分释放特性的研究[J]. 化肥设计, 2006, 44(2): 56-58.

- [15] Fan D. Three-dimensional pore-scale visualization and trajectory analysis of colloid transport and retention in saturated porous media[D]. Newark: University of Delaware, 2009.
- [16] Bradford S A, Torkzaban S, Leij F, et al. Modeling the coupled effects of pore space geometry and velocity on colloid transport and retention[J]. Water Resources Research, 2009, 45: 142-143.
- [17] Passmore J M, Rudolph D L, Mesquita M M F, et al. The utility of microspheres as surrogates for the transport of *E. coli* RS2g in partially saturated agricultural soil[J]. Water Research, 2010, 44(4): 1235-1245.
- [18] Zhuang J, Qi J, Jin Y. Retention and transport of amphiphilic colloids under unsaturated flow conditions: Effect of particle size and surface property[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(20): 7853-7859.
- [19] 袁瑞强, 郭威, 王鹏, 等. 高 pH 环境对胶体在饱和多孔介质中迁移的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(9): 3392-3398.
- [20] Hogg R, Healy T W, Fuerstenau D W. Mutual coagulation of colloidal dispersions[J]. Transactions of the Faraday Society, 1966, 62: 1638-1651.
- [21] Gregory J. Approximate expressions for retarded van der Waals interaction[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1981, 83(1): 138-145.
- [22] Ruckenstein E, Prieve D C. Adsorption and desorption of particles and their chromatographic separation[J]. Aiche Journal, 2010, 22(2): 276-283.
- [23] Tufenkji N, Elimelech M. Deviation from the classical colloid filtration theory in the presence of repulsive DLVO interactions[J]. Langmuir, 2004, 20(25): 10818-10828.
- [24] 袁瑞强, 郭威, 王鹏, 等. 多孔介质表面化学异质性对胶体运移的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3498-3504.
- [25] Torkzaban S, Wan J, Tokunaga T K, et al. Impacts of bridging complexation on the transport of surface-modified nanoparticles in saturated sand[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2012, 136/137(5): 86-95.
- [26] 袁瑞强, 郭威, 王仕琴, 等. 微生物在饱和多孔介质中的迁移[J]. 水资源研究, 2016, 5(4): 334-349.
- [27] Torkzaban S, Bradford S A. Critical role of surface roughness on colloid retention and release in porous media[J]. Water Research, 2016, 88: 274-284.

(上接第 332 页)

- [25] 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.
- [26] 王端. 包膜尿素氮素释放特征及在春玉米上的应用效果[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [27] 文廷刚, 陈昱利, 杜小凤, 等. 不同植物生长调节剂对小麦籽粒灌浆特性及粒重的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(1): 84-90.
- [28] 尚玉磊, 李春喜, 姜丽娜, 等. 植物生长调节剂对小麦产量及产量构成的影响[J]. 河南科学, 2000, 18(4): 408-412.
- [29] 郭新送, 丁方军, 孟庆羽, 等. 控释肥不同施用量及深度对宅基复垦地小麦产量与氮肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 928-934.
- [30] 肖铁娆, 景东林. 施氮量对冬小麦产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国种业, 2016(6): 56-57.

(上接第 338 页)

- [17] 胡承孝, 吴平. 鄂南棕红壤旱地施用石灰和硫酸镁对油菜的效应[J]. 华中农业大学学报, 1997(16): 571-575.
- [18] 周晓冬, 常义军, 吴洪生, 等. 甘蓝型油菜开花期 SPAD 值、叶绿素含量与氮素含量叶位分布特点及其相互关系[J]. 土壤, 2011, 43(1): 148-151.
- [19] 袁良济, 杨海燕, 邵远玉, 等. 主要环境因子对植物光合特性调控机制的影响研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2233-2235.
- [20] Mao M, Guo D, Liang Y. Effects of soil moisture on photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency of rape in different leaf positions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001, 9(1): 49-51.
- [21] 张涛. 2016 年中国钛白粉总产量 259.7 万 t[J]. 钢铁钒钛, 2017(2): 63-63.
- [22] 杨冬梅. 钛白协会联手中科院调研“钛石膏”[J]. 钢铁钒钛, 2016(3): 69-69.
- [23] 魏长河, 孙玉壮, 高兴保, 等. 钛石膏中重金属元素的浸出特性研究[J]. 环境工程, 2015, 33(5): 131-135.
- [24] Krishnamurthy S L, Gautam R K, Sharma P C, et al. Effect of different salt stresses on agro-morphological traits and utilisation of salt stress indices for reproductive stage salt tolerance in rice[J]. Field Crops Research, 2016, 190(1): 26-33.
- [25] 李彦, 张峰举, 王淑娟, 等. 脱硫石膏改良碱化土壤对土壤重金属环境的影响[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(6): 86-89.
- [26] 王志坚, 王崇华, 魏小兴, 等. 硫酸钙对大蒜生长发育和产量的影响[J]. 蔬菜, 2012(4): 58-60.
- [27] 高素玲, 张慎璞, 琚园园, 等. 不同用量硫酸钙肥对石灰性土壤大蒜生长的影响[J]. 北方园艺, 2014(14): 10-13.