

## 含锌·含锰·控释尿素在小麦上的氮素利用及土壤无机氮残留研究

梅沛沛<sup>1</sup>, 谢孟河<sup>2</sup>, 郭军<sup>3</sup>, 徐丽娜<sup>1</sup>, 王永<sup>1</sup>, 未志源<sup>1</sup> (1. 河南科技学院生命科技学院/河南省现代生物育种协同创新中心, 河南新乡 453003; 2. 山东登海玉种业, 山东济南 250100; 3. 河南省驻马店市泌阳县马谷田镇农业农村服务中心, 河南驻马店 463700)

**摘要** 了解含锌尿素、含锰尿素和控释尿素在小麦上的氮素利用及土壤无机氮残留情况, 以探明新型肥料增产效果和养分利用率, 为小麦生产中尿素及锌锰肥的合理施用提供依据。于2016—2018年在河南省新乡市河南科技学院东区乔榭试验田定位进行, 以小麦百农207为试验材料, 设无氮处理、普通尿素处理、含锌尿素处理、含锰尿素处理、控释尿素处理、普通尿素+锌处理和普通尿素+锰处理, 共7个施肥处理。结果表明, 控释尿素和含锰尿素分别比普通尿素增产3.56%和3.08%。在地上部生物量和氮素养分累积方面, 控释尿素在生育后期表现出明显的增长优势; 而含锰尿素则是在小麦拔节期以前, 有利于小麦植株生长及氮素养分累积; 尿素中加锌后则在孕穗期表现出明显促进小麦植株生长。控释尿素的氮肥利用率最高, 其次是含锰尿素, 二者氮肥利用率分别比普通尿素处理增长22.16%和13.67%。相对于添加锌或锰的其他4种施肥处理, 收获期控释尿素能很好地保存土壤无机氮, 使其在表层积聚, 在40 cm以下土层残留较少; 且各土层速效养分均较高。因此, 控释尿素处理优势明显, 其在小麦植株生产力、氮素养分利用及土壤无机氮残留等方面均表现突出。该研究为控释尿素及锌锰肥料在小麦高效优质生产上的推广应用提供理论支持。

**关键词** 小麦; 控释尿素; 产量; 氮肥利用率; 无机氮残留

中图分类号 S365 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)13-0158-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.13.042

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Effects of Zinc Containing Urea, Manganese Containing Urea and Controlled-release Urea on Nitrogen Nutrient Utilization and Soil Mineral Nitrogen Residue of Wheat

MEI Pei-pei<sup>1</sup>, XIE Meng-he<sup>2</sup>, GUO Jun<sup>3</sup> et al (1. School of Life Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology / Henan Collaborative Innovation Center of Modern Biological Breeding, Xinxiang, Henan 453003; 2. Shandong Denghai Yuyu Seed Industry Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100; 3. Agricultural and Rural Service Center, Magutian Town, Miyang County, Zhumadian City, Henan Province, Zhumadian, Henan 463700)

**Abstract** In order to better understand the effects of several new fertilizers, zinc containing urea, manganese containing urea and controlled-release urea, on wheat yield, nutrient utilization and mineral nitrogen residue, and to provide basis for the rational application of fertilizer and the zinc, manganese and promotion of the fertilizer, the field experiment was carried out in East Pavilion Joe village, Henan Institute of Science and Technology from 2016 to 2018. Seven treatments were designed with wheat as test material: no nitrogen (CK), conventional urea, zinc containing urea, manganese containing urea, controlled-release urea, conventional urea + zinc and conventional urea + manganese. The main results showed that, the new controlled-release urea and manganese containing urea in the test showed high grain yield, which was increased by 3.56% and 3.08%, on average, compared with the conventional urea. Especially the controlled-release urea showed great advantage in the accumulation of aboveground biomass and nitrogen nutrient in late growth period. In addition, the overall apparent recovery of fertilizer N (NRE) of wheat with the controlled-release urea was the highest, and then the manganese containing urea, the two was 22.16% and 13.67% higher than the conventional urea. Applied with the controlled-release urea, the mineral nutrient was accumulated more in the upper layer of soil profile, and there was less residue in the subsoil under 40 cm soil depth, in addition the available nutrients in all soil layers were higher at harvest time, compared with the other four fertilization treatments added with Zn or Mn. Therefore, the controlled-release urea showed great advantage in grain yield, above-ground biomass, nitrogen accumulation, nitrogen use efficiency and mineral nitrogen residue. It is beneficial to the application of the controlled-release urea in high-yield and good quality wheat production.

**Key words** Wheat; Controlled-release urea; Yield; Nitrogen use efficiency; Mineral nitrogen residue

我国占有世界9%的土地却消耗世界总施肥量的32%<sup>[1]</sup>。一般的化学肥料养分释放速率较快,且难以做到与作物养分吸收规律相匹配,铵态氮易挥发,以及氮肥的硝化与反硝化作用,和磷肥的固定等,这就造成了养分的大量流失。为了增加作物产量而施用大量速效氮肥带来了氮素利用率下降、环境污染等问题<sup>[2-4]</sup>。因此,在现代农业生产中,能够控制养分流失、提高化肥利用率的新型控释肥料的研究与生产具有重大的现实意义<sup>[5-8]</sup>。

我国在新型肥料的开发、研发方面与发达国家相比,起步较晚<sup>[7]</sup>。2015年农业部指出,实现农作物化肥零增长国家

战略,为新型肥料的发展注入了新的活力。虽然目前我国新型肥料的种类比较丰富,但鉴于新型肥料施用方法复杂,如何将高科技产品生动化、浅显化地传递给用户是需要急待解决的。目前市面上的多种缓效性肥料和专用复合肥料,其不同生态区的肥效及增产作用潜力及对环境的影响等方面仍需配套技术支持<sup>[8]</sup>。缓控肥料在不同环境、作物等因素表现各有差异,在施用缓控肥料后水稻、小麦、玉米、棉花产量均有显著增加,增产幅度分别为13.6%、11.3%、12.6%和18.8%<sup>[9-15]</sup>。目前,关于控释肥料的研究多集中在小麦、油菜、棉花、西瓜等作物的生长和发育方面,而关于含锌尿素和含锰尿素则针对于缺锌和缺锰的蔬菜作物研究较多,对小麦等大田作物研究鲜有报道<sup>[16]</sup>。且针对所施用的新型肥料肥效评价方面,多集中在对所生长作物的产量和作物长势方面<sup>[15-18]</sup>,研究其在土壤中的释放、转化和残留的尚不多见<sup>[19-20]</sup>。

因此,笔者在新乡潮土区研究含锌尿素、含锰尿素和控释尿素在小麦上的增产效果、养分吸收特征及肥料利用效率

**基金项目** 河南省科技攻关计划项目(212102110055,202102110183); 国家级大学生创新训练项目(201610467002,201610467004)。

**作者简介** 梅沛沛(1981—),女,河南灵宝人,讲师,博士,从事土壤与植物资源高效利用研究。

**鸣谢** 心连心化肥有限公司;河南科技学院2016—2017级国家级大学生创新团队,方倩倩团队和井宇航团队。

**收稿日期** 2021-09-30

等,同时深入阐述施用新型尿素后,小麦收获期土壤剖面中硝态氮和铵态氮的残留情况,以分析其对环境的影响,从而针对当地小麦实际生产情况,为该地区适宜的施肥量推荐及配套施肥技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

**1.1 试验地概况** 试验于2016—2018年在河南省新乡市河南科技学院东区乔榭试验田进行,试验点属于暖温带大陆性

季风气候,四季分明,冬寒夏热,秋凉春早,历年平均气温14℃。7月最热,平均27.3℃;1月最冷,平均0.2℃;年平均降水量573.4mm,无霜期220d,全年日照时间约2400h,土地肥沃、光热充沛。试验地为中壤质黄潮土,土层深厚,耕层土壤基础肥力状况见表1。2017—2018年降水量及温度见图1。

表1 小麦播前土壤基础肥力特征

Table 1 Background properties of soil before wheat broadcasting

土层 Soil layer cm	pH (2.5:1 CaCl <sub>2</sub> )	有机质 Organic matter//g/kg	碱解氮 Alkaline nitrogen mg/kg	速效磷 Available P mg/kg	速效钾 Available K mg/kg	有效锌 Available Zn mg/kg	有效锰 Available Mn mg/kg
0-20	8.10	17.48	77.85	20.30	186.58	1.6	28.9
20-40	7.80	12.99	65.18	16.18	136.18	0.9	20.3

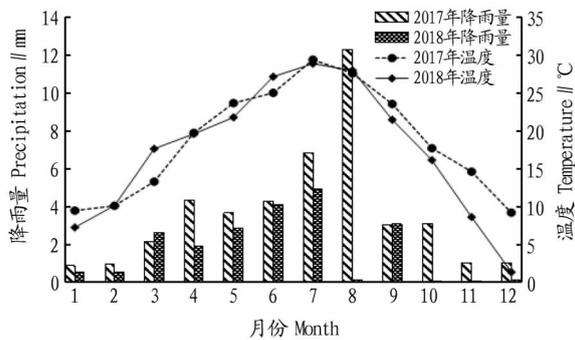


图1 2017—2018年月平均气温和月平均降雨量

Fig. 1 Monthly average temperature and precipitation in 2017 and 2018

**1.2 试验材料** 供试小麦品种为百农207(河南科技学院生命科技学院小麦育种中心提供),供试肥料有普通尿素、含锌尿素、含锰尿素和有效锌、氯化锰(试验所用尿素氮含量均46.4%,为河南心连心化肥有限公司提供。含锌尿素,是在普通尿素中添加0.7% ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O;含锰尿素,是在普通尿素中添加0.004% MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O)。

**1.3 试验设计** 以小麦百农207为试验材料,设不施氮(O)、普通尿素(U)、普通尿素+锰(U+M)、普通尿素+锌(U+Z)、控释尿素(UL)、含锰尿素(UM)和含锌尿素(UZ),共7个施肥处理。小区面积为30m<sup>2</sup>(4.0m×7.5m),随机区组排列,3次重复。试验中N、P、K用量分别为180、105和90kg/hm<sup>2</sup>,P、K作底肥一次施入,氮肥分2次施入,其中底施50%,拔节期50%,加锌、加锰处理均用与含锌尿素和含锰尿素等量的有效锌和硫酸锰(添加的有效锌含量9kg/hm<sup>2</sup>,添加的有效锰含量12kg/hm<sup>2</sup>)。底肥一次性施入。磷源用过磷酸钙,钾源用氯化钾。其他管理同普通大田。小麦于2016年10月17日播种,于2017年6月5日收获;2017年10月21日播种,于2018年6月4日收获。

## 1.4 测定项目与方法

**1.4.1 植株样品采集。**准确记载作物播种、生长发育情况。共取样7次,分别于泛青期(3月2日)、起身期(3月25日)、拔节期(4月11日)、孕穗期(4月22日)、抽穗期(5月5

日)、灌浆期(5月21日)和收获期(6月1日)取样进行农艺性状调查。将取得的植株样品在105℃下杀青30min,80℃烘干至恒重,称重,粉碎后待测养分(在灌浆期和收获期将植株分成茎秆、叶片和穗粒3部分)。

**1.4.2 计产与考种。**每个处理取3个1m<sup>2</sup>样方进行小麦测产,然后各处理随机抽取10株考种。

**1.4.3 植株养分含量。**地上部植株样品粉碎后,称取样品(出苗期和拔节期0.4500g左右,其余各时期0.4000g左右),在石墨消煮炉上经H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮后,消煮液用于测定氮素养分含量。植株全N养分用流动分析仪(TRAAS-2000)测定。植株地上部吸氮量=植株地上部生物量×植株地上部全氮含量。

**1.4.4 土壤样品采集与测定。**播前采基础土样分析土壤理化性质。在小麦收获时,取植物样后,用土钻法采集土壤样品。均采0~100cm土层。在各处理中取土样,每20cm为一层,随机取2个点混合,鲜土取回后立即将样品充分混合,过2mm土壤筛,并去除可见根,称取12g土壤放置封口袋内于-20℃冰箱保存。同时另取一份土样20g用烘干法测定土壤含水量。室内分析时,将保存在-20℃冰箱中的土样取出解冻,倒入白色塑料瓶中,加入100mL 0.01mol/L的无水氯化钙溶液,在20℃、180r/min的转速下振荡浸提1h,过滤后,土壤铵态氮和硝态氮用流动分析仪(TRAAS-2000)测定。试验田播前和收后的土壤样品(0~20和20~40cm)过0.5mm筛后,放入125mL三角瓶中,加入0.05mol/L DTPA溶液25mL,振荡1h后过滤于三角瓶中,待测液用火焰原子吸收分光光度计测定土壤中的有效锌养分含量。土壤有效锰含量则采用DTPA-TEA方法测定<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

**2.1 产量与考种** 从表2可以看出,各处理小麦成熟期的产量,施用氮肥后各处理的产量均显著高于不施氮的处理。其中以普通尿素+锌处理的小麦籽粒产量最高,达7430.4kg/hm<sup>2</sup>,其次是控释尿素、含锰尿素和普通尿素处理。由此可以看出,控释尿素和含锰尿素均比普通尿素施用增产效果好,分别比普通尿素增产3.56%和3.08%。但

普通尿素+锌处理比普通尿素增产7.32%，而含锌尿素和普通尿素+锰处理没有普通尿素小麦产量高。另外也发现，含锰尿素比普通尿素+锰处理的小麦产量高；而普通尿素+锌处理比含锌尿素处理的小麦产量高，且差异达显著水平。当地农民小麦生产水平与该试验中普通尿素施N处理相当。

从表3可以看出，不同种类尿素的施肥处理并没有显著影响到植株的群体性状，如1 hm<sup>2</sup>穗数、有效穗数和小麦植株的个体农艺性状，如株高、穗长、主茎基2、基3、基4和基5的节间长度及其2节间直径等。但经统计分析发现，施用控释尿素处理小麦穗粒数比不施肥处理、施用普通尿素、含锰、含锌和加锰尿素的处理均显著增加。但对于该试验中产量最高的普通尿素+锌处理而言，其千粒重是几个处理中最高的。

## 2.2 植株生物量及氮素养分含量动态分析

表3 成熟期不同施肥处理小麦考种结果

Table 3 Results of wheat test in different fertilizer treatments

处理 Treatment	株高 Plant height cm	穗长 Length of spike cm	主茎节间长度 Internode length of main stem//cm				基2节 间直径 Internode diameter in stem 2 mm	穗数 Spike number 万头/hm <sup>2</sup>	无效分蘖 Invalid tillering 个	穗粒数 Grain number per spike 个	千粒重 1 000-grain weight g	1 m 行总 籽粒质量 Total grain weight g
			基2 Stem2	基3 Stem3	基4 Stem 4	基5 Stem5						
O	63.0 a	7.8 a	5.8 a	9.1 a	15.0 a	22.1 a	3.3 b	690.0 a	3.2 a	26.8 c	45.0 b	169.0 a
U	65.4 a	8.5 a	5.9 a	9.3 a	15.7 a	23.0 a	3.7 a	735.0 a	4.7 a	29.2 b	48.9 a	206.2 a
U+M	64.6 a	8.2 a	6.4 a	9.2 a	15.3 a	22.7 a	3.7 a	823.5 a	3.3 a	28.5 b	50.4 a	201.2 a
U+Z	66.8 a	8.6 a	6.5 a	9.7 a	15.8 a	22.0 a	3.6 ab	795.0 a	3.2 a	31.5 ab	50.7 a	184.4 a
UL	65.4 a	8.1 a	6.0 a	8.9 a	14.9 a	22.5 a	3.4 ab	786.0 a	5.2 a	35.5 a	49.5 a	210.5 a
UM	66.2 a	8.5 a	6.3 a	9.3 a	15.2 a	21.6 a	3.5 ab	697.5 a	3.2 a	29.2 b	49.3 a	195.6 a
UZ	66.8 a	8.4 a	6.5 a	9.5 a	15.8 a	23.0 a	3.5 ab	790.5 a	4.3 a	29.0 b	49.7 a	201.9 a

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between nitrogen fertilizer treatments ( $P < 0.05$ )

期均有不同程度的下降，但下降未达显著水平。这可能与收获期天气干旱有关，有些植株叶片已经凋落于地面。各施肥处理间差异在各个生育期表现不一致，基本上与小麦营养生长期和生殖生长期相对应，前期生物量积累多的，后期因为籽粒运转和分配效率等，在灌浆期和成熟期其生物量累积不一定多。返青期，小麦地上部生物量最高的为普通尿素处理，控释尿素处理在此时期生物量则较小，与对照不施肥处理间较接近；起身期，含锰尿素处理的生物量最高；拔节期，仍是含锰尿素处理的生物量最高，而控释尿素在此时期生物量与其最接近；孕穗期，含锌尿素处理的生物量最高，控释尿素也保持较高的增长趋势；到抽穗期，生物量发生一些变化，普通尿素+锌处理和含锰尿素处理的生物量增长较明显，可能这2个处理下小麦灌浆速度较快，有利于干物质积累；到灌浆期，控释尿素处理下小麦的生物量累积达到最大值，比同时期不施肥处理高30.1%，差异达显著水平。到成熟期，控释尿素、含锌尿素和含锰尿素均比普通尿素高，分别比不施肥处理高28.9%、27.1%和25.7%。因此，通过生物量动态分析，发现各种尿素的肥效发挥时期是有区别的，它们在土壤中转化，及被植物吸收利用的速率不尽一致。总体上，新型尿素表现出一定的生物量累积优势。

在小麦灌浆期以前，不同施肥处理小麦生物量均呈随着生育期的推移不断增加的趋势，到成熟期各处理生物量相比灌浆

表2 不同施肥处理下小麦籽粒产量及增产率

Table 2 Grain yield and yield increase of wheat in different treatments

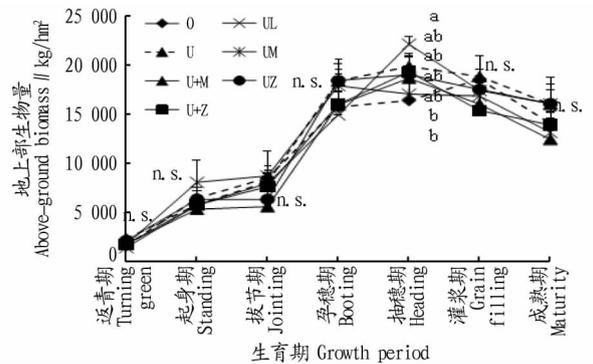
处理编号 Treatment	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield kg/hm <sup>2</sup>	增产率 Increase rate//%
O	无氮处理	5 322.7±802.0 c	—
U	普通尿素	6 923.5±506.8 ab	30.07
U+M	普通尿素+锰	6 203.1±144.8 bc	16.54
U+Z	普通尿素+锌	7 430.4±437.5 a	39.60
UL	控释尿素	7 170.3±603.7 a	34.71
UM	含锰尿素	7 136.9±104.2 ab	34.08
UZ	含锌尿素	5 789.6±6.7 c	8.77

注：同列不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著( $P < 0.05$ )

Notes: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between nitrogen fertilizer treatments ( $P < 0.05$ )

表3 成熟期不同施肥处理小麦考种结果

Table 3 Results of wheat test in different fertilizer treatments



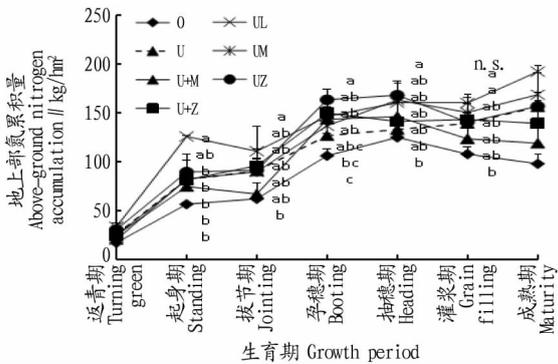
注：不同小写字母表示同一生育时期不同施肥处理间差异显著( $P < 0.05$ )，n. s. 表示同一生育时期不同施肥处理间差异不显著( $P < 0.05$ )

Notes: The different lowercase letters indicated significant differences between fertilizer treatments at the same growth stage ( $P < 0.05$ ), and n. s. stood for no significant difference

图2 各生育期不同施肥处理小麦植株地上部生物量动态变化  
Fig. 2 Dynamic change of above-ground biomass of wheat at different growth stages with different fertilizer treatments

由图3可知，各处理间小麦地上部植株氮积累量在各个

时期均表现出一定差异。这个差异一方面是来自生物量在不同时期的累积量差异,一方面是植株体内氮浓度的差异。总体而言,含锰尿素在生育前期累积较多的氮素养分,而控释尿素则是在生育后期累积较多的氮素养分。



注:不同小写字母表示同一生育时期不同施肥处理间差异显著( $P < 0.05$ )

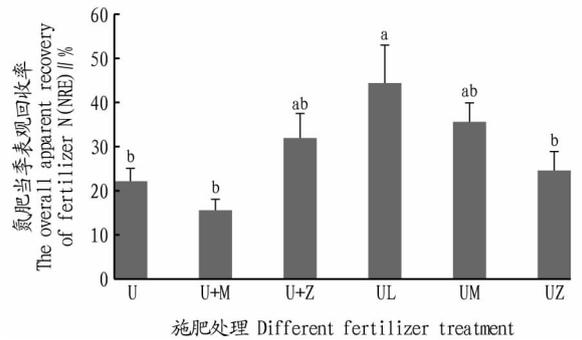
Notes: Different lowercase letters indicated significant difference between fertilizer treatments at the same growth stage ( $P < 0.05$ )

图3 各生育期不同施肥处理小麦植株地上部氮素累积量动态变化

Fig. 3 Dynamic change of above-ground N accumulation of wheat at different growth stages with different fertilizer treatments

**2.3 氮肥当季表现回收率** 从图4可以看出,在氮肥利用率方面,控释尿素、含锰尿素、普通尿素+锌、含锌尿素各处理的氮肥当季表现回收率均高于普通尿素处理,分别高22.16%、13.67%、9.80和2.48%。其中,控释尿素处理显著高于含锌尿素处理;普通尿素+锰处理最低,但其与含锌尿素、普通尿素+锌和含锰尿素处理之间无显著差异。说明科学合理选择施用新型肥料,可以提高氮肥利用率<sup>[11]</sup>。

**2.4 土壤剖面中无机氮累积** 从表4小麦收获期各土层铵态氮和硝态氮的累积量来看,在0~100 cm土层控释尿素的



注:不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

Notes: Different lowercase letters indicated significant difference between fertilizer treatments ( $P < 0.05$ )

图4 收获期不同施肥处理小麦氮肥利用率

Fig. 4 The overall apparent recovery of fertilizer N (NRE) of wheat at maturity

铵态氮和硝态氮累积量与不施肥处理较为接近,与其他处理间有一定差异。具体表现为在0~20 cm土层,控释尿素的铵态氮累积量与其他施肥处理间无差异,而硝态氮较其他几个处理稍高;而从20~40 cm土层开始,不论是铵态氮还是硝态氮,包括控释尿素在内的各施肥处理与不施肥处理间差异不显著,而控释尿素处理开始表现出一定的减少趋势;尤其是40~60 cm土层,控释尿素处理中铵态氮和硝态氮的累积量大幅度降低。在该层中普通尿素+锰处理的铵态氮的累积量却出现了最高。对比60~80和80~100 cm这2个土层的数值发现,控释尿素的数值均较偏小。说明控释尿素能很好地保存土壤养分在表层的积聚。虽然当季小麦没有完全吸收利用,但也未转移到下层,因而可以使耕层土壤养分蓄积而对环境负面影响较小,同时还有利于下一茬作物的养分供应。

表4 小麦收获期各土层铵态氮和硝态氮的累积量

Table 4  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  accumulation of wheat soil with different layers at maturity

kg/hm<sup>2</sup>

处理 Treatment	铵态氮累积量 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ accumulation					硝态氮累积量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation				
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
O	7.1 a	7.5 a	7.3 b	6.9 b	8.4 b	17.4 a	13.6 ab	14.3 b	3.0 c	8.8 c
U	5.6 a	8.4 a	7.3 b	15.1 ab	6.1 b	13.3 a	20.6 a	28.7 a	19.1 ab	31.7 a
U+M	6.9 a	8.1 a	12.8 a	12.0 ab	10.7 ab	16.8 a	25.6 a	21.8 ab	30.0 a	18.9 ab
U+Z	7.0 a	7.0 ab	7.7 b	7.6 b	6.6 b	17.8 a	19.9 a	29.8 a	28.2 a	26.1 ab
UL	7.9 a	7.2 ab	5.3 b	6.6 b	7.3 b	21.5 a	16.0 ab	22.5 ab	26.1 a	9.9 c
UM	6.8 a	7.9 a	6.5 b	18.3 a	8.3 b	16.9 a	24.0 a	24.5 ab	21.7 ab	21.4 ab
UZ	6.2 a	7.5 a	7.8 b	9.6 b	16.4 a	13.8 a	11.3 b	17.9 b	25.2 a	4.4 c

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )

Notes: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between fertilizer treatments ( $P < 0.05$ )

**2.5 收获期土壤中氮、磷、钾、锰、锌含量** 从表5可以看出,收获期速效氮、速效磷、速效钾、速效锌和有效锰比收获前分别降低了39.95%、37.64%、39.36%、38.95%和51.62%。且0~20 cm各速效养分的值均仍大于20~40 cm土层。在播前和收获后各层土壤的数值进行对比时,发现20~40 cm各项数值变化幅度较小,受到耕作层施肥和灌水等农艺措施干扰较小。但从各个施肥处理来看,在0~20 cm土层碱解氮、速效磷和速效钾的含量以控释尿素处理的最高,与普通尿素

及其他4种添加元素的尿素差异不显著。对于土壤速效锌而言,在0~20 cm土层,普通尿素+锌处理和含锌尿素的速效锌养分含量显著高于不额外补充锌肥的其他几个施肥处理;而在20~40 cm此现象不存在。有效锰养分结果与速效锌较为一致,在土壤中补充锰元素比不添加的含量高,达17.27%~80.84%,其中普通尿素+锰的处理比含锰尿素土壤有效锰的含量高7.86%。而控释尿素在收获期表现为在各土层速效养分含量均较高。

表5 小麦收获期不同土层氮、磷、钾、锰、锌含量

Table 5 N, P, K, Mn and Zn content of wheat soil in different soil layers at maturity

土层 Soil layer//cm	施肥处理 Fertilizer treatment	碱解氮 Alkaline nitrogen mg/kg	速效磷 Available P mg/kg	速效钾 Available K mg/kg	有效锌 Available Zn mg/kg	有效锰 Available Mn mg/kg
0~20	O	28.80 b	9.51 a	69.03 b	0.99 b	16.27 b
	U	50.52 ab	14.00 a	128.04 a	0.92 b	11.38 b
	U+M	49.04 ab	12.78 a	117.54 ab	0.91 b	20.58 a
	U+Z	47.72 ab	12.44 a	114.37 ab	1.23 a	12.74 b
	UL	53.72 a	14.00 a	128.74 a	1.09 b	16.90 b
	UM	48.42 ab	12.62 a	116.05 ab	0.98 b	19.08 a
	UZ	49.02 ab	12.78 a	117.50 ab	1.12 a	13.92 b
	20~40	O	24.11 a	5.98 a	50.38 a	0.52 a
U		40.30 a	10.50 a	88.38 a	0.45 a	11.44 a
U+M		41.06 a	10.19 a	85.79 a	0.52 a	13.19 a
U+Z		39.95 a	9.91 a	83.47 a	0.45 a	10.66 a
UL		40.97 a	11.16 a	93.96 a	0.45 a	10.20 a
UM		40.54 a	10.06 a	84.70 a	0.39 a	11.45 a
UZ		41.05 a	10.19 a	85.76 a	0.52 a	9.56 a

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different fertilizer treatments ( $P < 0.05$ )

### 3 结论与讨论

**3.1 新型尿素在小麦上的增产优势** 从籽粒产量结果看, 新型尿素中控释尿素和含锰尿素在该试验中表现出增产优势。普通尿素+锌处理的小麦籽粒产量最高, 其次是控释尿素和含锰尿素。而含锌尿素与普通尿素相比较低。但各施肥处理均与普通尿素处理之间无显著差异, 与不施肥处理差异显著。因此, 在普通尿素中添加氯化锰, 增产效果不明显, 而含锰尿素则有一定的增产效果。与此不同的是, 含锌尿素的产量没有普通尿素添加等量有效锌的产量高。因为锌和锰在不同肥料结构中对产量的表现不同。普通尿素加等量锌处理下小麦  $1 \text{ hm}^2$  穗数和千粒重均最高, 而控释尿素无效分蘖较多。

但在一定程度上, 说明在尿素中加入锌元素制成的含锌尿素在小麦上施用效果不佳, 推测原因有可能是在化学肥料制造工艺方面存在不当之处, 有待于进一步通过多生态区试验验证。对于该试验中产量最高的普通尿素加等量锌的处理而言, 其  $1 \text{ hm}^2$  穗数和千粒重均是几个处理中最高的, 这其中的机理有待进一步探究。同时, 也建议通过更科学合理的方式对该地区土壤中补充锌肥。

**3.2 新型尿素在小麦植株生物量和氮素养分动态积累方面的表现规律** 从各生育时期小麦植株地上部生物量和地上部氮素积累量来看, 各新型肥料和普通尿素在不同生育时期所能发挥的效果不同。但从整个生育期来看, 无论是小麦植株生物量的累积, 还是氮素养分的累积, 起身期、拔节期小麦快速累积营养物质的过程中含锰尿素表现优越; 从孕穗到灌浆前期, 普通尿素加等量锌处理则表现出快速累积的过程; 而控释尿素在前期养分积累阶段虽没有明显优势, 但小麦进入灌浆期主攻籽粒后, 其优势越来越明显。这进一步验证了施用控释氮肥能够有效延长氮素释放期, 保证作物关键生育时期的氮素供应, 有效提高作物干物质累积, 增加作物产量<sup>[16-17, 22]</sup>。就不同尿素施用后, 氮素养分在不同植物器官间的转移和累积是否有差异, 最后导致产量差异较显著, 仍需要进一步深入研究<sup>[18-21]</sup>。

**3.3 新型尿素对小麦氮肥利用率的影响** 从氮肥利用率来看, 控释尿素的氮肥当季表现回收率最高, 其次是含锰尿素、普通尿素+锌。因此, 控释尿素更有利于满足农作物生长发育过程中对氮素养分的需求, 属于绿色环保的新型肥料, 为未来精准施肥提供理论支撑。而含锌尿素和含锰尿素需要进一步研究其肥效及探索出更加科学合理的施用方法等<sup>[23-24]</sup>。

**3.4 新型尿素对小麦土壤剖面无机氮残留和收获期速效养分的影响** 从小麦收获期各土层铵态氮和硝态氮的累积量来看, 在  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土层总的累积量上, 只有控释尿素的铵态氮和硝态氮累积量与不施肥处理较为接近, 与其他施肥处理间有显著差异。控释尿素在  $0 \sim 20$  和  $20 \sim 40 \text{ cm}$  浅层土壤累积铵态氮和硝态氮相对较多, 说明控释尿素能很好地促使土壤养分在表层积聚<sup>[21, 25]</sup>。并且当季小麦氮肥利用率以控释尿素最高, 同时, 土壤剖面表层的无机氮养分没有转移到下层, 因而有利于下一茬作物的养分供应。

收获期各施肥处理在  $0 \sim 20$  和  $20 \sim 40 \text{ cm}$  的土壤中各速效养分差异相对较小, 该试验田块本身锌和锰含量偏低, 再加上小麦生长期对锌元素更为敏感, 因此在添加锌元素的2种施肥处理, 普通尿素+锌和含锌尿素均在收获期比其他施肥处理速效锌含量高。同样的, 普通尿素+锰和含锰尿素土壤有效锰含量均高于其他施肥处理。在  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土层差异明显, 而在  $20 \sim 40 \text{ cm}$  土层, 因土壤受到农艺措施的影响较小, 所以没有表现出因不同施肥处理所带来的变化。但经对比, 控释尿素因其具有较强的控制养分流失的能力, 因此其养分释放速度与作物生长速度较为匹配, 而没有导致养分过多损失。在收获期表现为各土层速效养分均较高。因此, 控释尿素更有利于农作物有效吸收, 满足植物生长发育过程中对养分的需求, 且具有减少农业面源污染、控制肥料流失等显著特点<sup>[26]</sup>。而含锌尿素和含锰尿素需要进一步研究其肥效及科学合理的施用方法, 及与土壤无机氮及其他速效养分间的关系等<sup>[26-27]</sup>。而未来还是期望我国早日生产出和推广施用环境友好的智能缓/控释肥<sup>[7]</sup>。

新型肥料中控释尿素在小麦生产上优势明显, 其在小麦

植株生产力、氮素养分利用及土壤无机氮残留等方面均表现突出。通过底施 50% 和在小麦拔节期追施其余 50% 的施肥方式能很好地促进控释尿素肥效的发挥,使其在小麦籽粒产量上增加明显,比普通尿素增产 3.56%。施用控释尿素能促进小麦穗粒数增加。控释尿素在小麦生育后期生物量和氮素养分累积较高。其氮肥当季表观回收率也比普通尿素高 22.16%。而在小麦收获期,控释尿素将铵态氮和硝态氮很好地保存在 0~40 cm 土层。该新型肥料能较好地促进作物生产且降低了对环境的负面作用。因此,该研究为控释尿素在小麦高效优质生产上的推广应用提供理论支撑。而对于新型肥料含锌和含锰尿素,建议肥料生产工艺要作出适当调整,另外,微量元素肥料要依据土壤和作物的需求进行合理施用。

## 参考文献

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [2] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境,2000,9(1):1-6.
- [3] 张维理,田哲旭,张宁,等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报,1995,1(2):80-87.
- [4] 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.
- [5] 于立芝,李东坡,俞守能,等. 缓/控释肥料研究进展[J]. 生态学杂志,2006,25(12):1559-1563.
- [6] 武志杰,张海军,陈利军. 21 世纪我国肥料科学展望[C]//中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会《面向农业与环境的土壤科学(综述篇)》. 北京:科学出版社,2004:249-254.
- [7] 武志杰,李东坡,史云峰. 未来肥料希望——环境友好智能缓/控释肥料[C]//全国第十届新型肥料开发与应用技术交流会年会暨汉枫缓释肥料国际研讨会优秀论文集. 北京:中国化工学会,2005:58-65.
- [8] 刘洁,乔菊,赵成,等. 控失尿素效果评价中分析方法之探讨[J]. 化肥工业,2010,37(1):36-39.
- [9] 谢培才,马冬梅,张兴德,等. 包膜缓释肥的养分释放及其增产效应[J]. 土壤肥料,2005(1):23-28.

(上接第 146 页)

度 100~800  $\mu\text{mol/L}$  亚硒酸钠溶液叶面喷施所产籽粒硒含量均超过富硒玉米硒含量标准,最低试验浓度 100  $\mu\text{mol/L}$  富硒液处理所产玉米籽粒的硒含量几乎是安全含量上限的 2 倍,喷施浓度为 800  $\mu\text{mol/L}$  亚硒酸钠溶液玉米籽粒的硒含量平均达 4.77 mg/kg,先玉 335 和郑单 958 最高达 5.32、5.41 mg/kg,根据籽粒硒含量拟合曲线可以看出仍未到达上升趋势停滞或下降的拐点,因此富硒玉米生产中要严格控制叶面喷施硒肥供应量(浓度和喷施次数及土壤含量),高浓度或多次喷施处理或高硒土壤生长等过度供应均可使玉米籽粒成为超高硒有毒产品,摄入稍多便会出现硒中毒,要高度警惕安全性问题。同时玉米作为硒高富集植物,选择适宜品种严格控制程序生产的高硒玉米籽粒可以制成药丸、粉剂、水剂等产品作为定量补硒保健品或缺硒症患者药食产品。

## 参考文献

- [1] 郝玉波,刘华琳,慈晓科,等. 施硒对两种类型玉米硒元素分配及产量、品质的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(2):411-418.
- [2] 史振声,王莹,王志斌,等. 甜玉米富硒栽培技术研究[J]. 玉米科学,2007,15(6):71-74.
- [3] 周琼,田永和. 富硒水稻品种的筛选[J]. 湖北农业科学,2020,59(18):15-17.
- [4] 杨舒添,杜天庆,翟红梅,等. 叶面喷硒对糯玉米生理特性及籽粒硒含

- [10] 熊又升,陈明亮,何圆球,等. 包膜尿素对芹菜产量、品质及氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(1):104-109.
- [11] 孙克刚,郭跃升,李玉顺,等. 控失尿素在夏玉米上的应用效果研究[J]. 磷肥与复肥,2015,30(1):51-52.
- [12] 孙启忠,樊继刚,李淑芬,等. 心连心控失尿素在小麦上的肥效研究[J]. 现代农业,2015(10):20-22.
- [13] 于淑芳,杨力,张民,等. 控释尿素对小麦-玉米产量及土壤氮素的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1744-1749.
- [14] 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.
- [15] 宋付朋,张民,史衍玺,等. 控释氮肥的氮素释放特征及其对水稻的增产效应[J]. 土壤学报,2005,42(4):619-627.
- [16] 胡斌,李絮花,闫童,等. 控释氮肥对土体中无机氮淋溶分布及夏玉米产量的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4):110-114.
- [17] 何杰,李冰,王昌全,等. 不同控释氮肥比率对土壤无机氮、微生物及小麦生长的影响[J]. 麦类作物学报,2017,37(3):349-356.
- [18] 冯爱青,张民,李成亮,等. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(3):177-184.
- [19] 全云飞,龚佩珍,缪美林,等. 棉花专用包膜肥应用试验初报[J]. 江苏农业科学,1996(2):42-43.
- [20] 李敏,郭熙盛,叶舒斌,等. 树脂膜控释尿素及普通尿素配施对强筋小麦产量、品质和氮肥利用率的影响[J]. 麦类作物学报,2013,33(2):339-343.
- [21] MARTENS D C, LINDSAY W L. Testing soils for copper, iron, manganese, and zinc[M]//WESTERMAN R L. Soil testing and plant analysis. 3rd ed. Madison, WI, USA: Soil Science Society of American, 1990:229-264.
- [22] 朱三明,陈俊婕,郝森,等. 控释氮肥在小麦上的应用研究进展[J]. 安徽农业科学,2021,49(5):18-20,25.
- [23] 程学元,程振勇,宋小顺,等. 配方施肥对新乡市夏玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2013,41(4):4-7.
- [24] 王金荣,马瑞玲,孙淑贤,等. 关于测土配方施肥长效机制的探索与研究[J]. 中国农学通报,2009,25(18):219-220.
- [25] 常淑艳. 氮肥长效增效剂应用方法探讨[J]. 现代农业,2008(4):16-17.
- [26] 程亮,张保林,王杰,等. 腐植酸肥料的研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2011(5):1-6.
- [27] 樊小林,廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(3):219-223.

量的影响[J]. 玉米科学,2020,28(1):117-123.

- [5] 向东山,翟琨,刘晓鹏. 富硒玉米籽粒中硒赋存形态研究[J]. 玉米科学,2007,15(5):93-95.
- [6] 黄丽美,徐宁彤,曲琪环. 硒对玉米产量及籽粒营养品质、重金属含量的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(10):59-61.
- [7] 郑阳,杨华,付忠军,等. 不同硒处理对糯玉米籽粒硒含量及品质的影响[J]. 西南农业学报,2013,26(5):1899-1901.
- [8] 黄爱花,黄开健,彭楷,等. 叶面喷施硒肥对甜玉米籽粒富硒、重金属含量及产量的影响[J]. 南方农业学报,2019,50(1):40-44.
- [9] 刘春菊,刘夫国,陈伟,等. 叶面喷施硒肥对鲜食玉米硒富集的影响[J]. 江苏农业学报,2012,28(4):713-716.
- [10] 李兰青,邓鹏,黄春东,等. 不同糯玉米品种硒富集能力的研究[J]. 安徽农业科学,2019,47(21):157-159.
- [11] 于丽敏,薛艳芳,高华鑫,等. 小麦富硒研究进展[J]. 山东农业科学,2015,47(6):137-144.
- [12] 张城铭,周鑫斌. 不同施硒方式对水稻硒利用效率的影响[J]. 土壤学报,2019,56(1):186-194.
- [13] 吴永尧,罗泽民,陈建英,等. 水稻硒蛋白及其硒结合形态研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2000,34(2):223-225.
- [14] 刘梦兰,高鹏,姚泽天,等. 施硒方式及浓度对粳稻品种籽粒硒积累和形态的影响[J]. 中国稻米,2020,26(3):43-47,53.
- [15] 高婧. 中国典型高硒与硒缺乏区硒营养摄入规律研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [16] 杨亮,孙发宇,李磊,等. 小麦硒敏感性的基因型差异分析[J]. 土壤,2018,50(6):1190-1197.
- [17] 姜超强,沈嘉,祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运[J]. 应用生态学报,2015,26(3):809-816.
- [18] 李圣男,岳士忠,乔玉辉,等. 中国富硒玉米的生产与富硒效应[J]. 中国农学通报,2014,30(30):6-10.