

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0665

不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜农艺性状、养分吸收和产量的影响

刘如悦¹, 潘悦茹¹, 钟雯瑾², 仝瑞芳³, 刘锐杰², 汪洋¹, 岳艳军²

(1. 河南农业大学资源与环境学院·河南省农业绿色发展工程技术研究中心 郑州 450002;

2. 河南心连心化学工业集团研发中心 河南新乡 453700; 3. 杞县农业农村局 河南杞县 475299)

摘要:为探究不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜农艺性状、养分吸收和产量的影响,以 18-10-18 的氮磷钾养分配比,在氮肥用量恒定的前提下,将不同比例(20%、40%、60%)的普通尿素分别与 60 d、90 d 控释尿素进行配施,3 类氮肥配比如合计 100%,组合成 9 个试验处理(T1~T9),并以单施普通尿素为对照(CK),系统分析了各处理对大蒜农艺性状、干物质量以及氮素、磷素、钾素累积量等的影响。结果表明,与 CK 相比,控释尿素与普通尿素配施处理可改善成熟期大蒜株高、假茎粗、干物质量等指标,产量、大蒜素含量和氮素、钾素累积量分别较 CK 增加了 4.97%~35.18%、3.39%~13.68%、5.66%~41.27%、1.68%~31.63%。除 T2(20%普通尿素+80% 60 d 控释尿素+0% 90 d 控释尿素)、T5(40%普通尿素+60% 60 d 控释尿素+0% 90 d 控释尿素)、T8(60%普通尿素+40% 60 d 控释尿素+0% 90 d 控释尿素)处理低于 CK 外,其他处理磷素累积量较 CK 提高 6.02%~21.39%。其中,T9 处理(60%普通尿素+0% 60 d 控释尿素+40% 90 d 控释尿素)的多个关键指标表现突出:蒜头产量与总收入均最高,分别较 CK 显著提高 35.18%、35.18%,且氮素收获指数最高,为 47.51%,较 CK 显著提高 8.45 个百分点。综上,在本试验条件下 T9 处理(60%普通尿素+0% 60 d 控释尿素+40% 90 d 控释尿素)为最优配施方案,可在河南大蒜主产区推广应用。

关键词:大蒜;控释尿素;配施比例;农艺性状;产量

中图分类号:S633.4

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-211-12

Effects of combined application of controlled-release urea and conventional urea on agronomic traits, nutrient uptake, and yield in garlic

LIU Ruyue¹, PAN Yueru¹, ZHONG Wenjin², TONG Ruifang³, LIU Ruijie², WANG Yang¹, YUE Yanjun²

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University/Henan Agricultural Green Development Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. R&D Center, Henan Xinlianxin Chemical Industry Group, Xinxiang 453700, Henan, China; 3. Qixian Agricultural and Rural Affairs Bureau, Qixian 475299, Henan, China)

Abstract: To explore the effects of different controlled-release urea and ordinary urea on the agronomic traits, nutrient uptake and yield of garlic, a field experiment was conducted with a constant total nitrogen application rate. Specifically, ordinary urea was combined with 60 d and 90 d controlled-release urea at different proportions (20%, 40%, and 60%), with the total proportion of the three nitrogen fertilizer types being 100%, resulting in 9 experimental treatments (T1-T9). Additionally, ordinary urea alone was set as the control treatment (CK). The effects of each treatment on agronomic traits, dry matter content and nitrogen, phosphorus and potassium accumulation were systematically analyzed. The results showed that compared with CK, the combination of controlled-release urea and ordinary urea could significantly improve the agronomic indicators of garlic at maturity stage, including plant height, pseudostem thickness and dry matter content, the yield, allicin content, nitrogen and potassium accumulation of garlic under the controlled-release fertilizer treatments increased by 4.97%-35.18%, 3.39%-13.68%, 5.66%-41.27% and 1.68%-31.63%, respectively. Except for T2 (20% ordinary urea + 80% 60 d controlled-release urea + 0% 90 d controlled-release urea), T5 (40% ordinary urea + 60% 60 d controlled-release urea + 0% 90 d controlled-release urea), T8 (60% ordinary urea + 40% 60 d controlled-release urea + 0% 90 d controlled-release urea), the phosphorus accumulation of the other treatments was 6.02%-21.39% higher than that of CK.

收稿日期:2025-09-15;修回日期:2025-12-24

基金项目:农业农村部农田智慧施肥项目(NK2022180503)

作者简介:刘如悦,女,在读硕士研究生,研究方向为大蒜科学施肥技术。E-mail: 18438659710@163.com

通信作者:钟雯瑾,女,农艺师,主要从事缓控释肥肥料的应用工作。E-mail: 15836113635@163.com

Among them, T9 treatment (60% ordinary urea+0% 60 d controlled-release urea+40% 90 d controlled-release urea) performed excellently in several key indicators: Garlic yield and total income were the highest, significantly increased by 35.18% and 35.18%, respectively, compared with CK. It also had the highest nitrogen harvest index of 47.51%, which was 8.45 percentage points higher than CK. In conclusion, under the experiment conditions, the T9 treatment (60% ordinary urea+0% 60 d controlled-release urea+40% 90 d controlled-release urea) was the optimal combination scheme, which could be popularized and applied in the major garlic producing areas of Henan province.

Key words: Garlic; Controlled-release urea; Blending ratio; Agronomic trait; Yield

大蒜(*Allium sativum* L.)是我国重要的调味品和经济作物,不仅具有丰富的食用价值,还有增强人体免疫力、防治心血管疾病和癌症等方面的功能^[1-2]。2022年中国大蒜产量为1 157.8万t,占世界产量的77%^[3]。2020年开封杞县大蒜种植面积为 4.67×10^5 hm²,产量96万t,种植面积和总产量均位居全国县域第一^[4-5]。有研究表明,相比种植小麦,大蒜比小麦增收5.4万元·hm⁻²^[5-6]。然而,农户为了追求产量效益,尿素的施用量逐年增加^[7],使大蒜生产面临严峻挑战。过量施用氮肥,导致肥料利用率低下,传统尿素氮利用率仅为10.30%~17.99%^[8-9],并易引发一系列环境问题^[10-12],导致土壤板结和盐渍化程度加剧^[13-14],还包括农田温室气体排放、生物多样性的丧失等^[15],严重威胁生态环境与人类健康,造成资源浪费,阻碍农业可持续发展^[16]。

传统尿素作为基肥使用时在大蒜种植中普遍存在“前促后缺”的养分供应矛盾。研究表明,大蒜苗期对氮素需求较少,主要依靠蒜母中的养分,基施尿素过少,返青期容易造成营养不足而影响幼苗生长;基施过多,一是容易烧苗;二是易造成后期脱肥,大蒜叶片变黄。在覆膜栽培条件下,追肥主要为随水冲施,春后气温低,最早在清明前后追肥,而基施的传统尿素已消耗殆尽,难以满足中后期生长需求,导致蒜头膨大期养分供应不足^[17-18]。缓/控释肥是通过养分的化学复合和物理作用,使有效养分随时间的推移而缓慢释放的肥料,在平衡施肥、提高作物产量等方面发挥着巨大作用^[19]。与普通化肥相比,因为有包膜的存在可避免高浓度养分与根系直接接触出现烧苗的现象;更重要的是缓/控释肥一次施用基本满足作物整个生育期的需求,可以减少化肥施用量和施肥次数,提高肥料利用率,减轻环境污染^[20]。有研究表明,施用控释尿素能够有效降低土壤氮素损失,提高氮素利用率,达到增产效果^[21]。吴静等^[22]研究表明,施用控释肥可以改善大葱的品质、提高其产量,单位面积增产率可达57%;

叶洁^[23]在辣椒试验中发现,施用控释肥较常规化肥氮肥利用率提高20.56%;孙明^[24]研究表明,高山番茄施用控释肥时,2种控释肥处理分别较常规施肥增产11.00、25.17 t·hm⁻²。包膜控释尿素效果显著,但其成本较高,且单施前期氮素释放较慢,可能导致作物早期氮素供应不足^[25]。将控释尿素与普通尿素配施,可利用速效氮保障作物前期对氮素的需求,同时依赖控释氮满足中后期氮素供应,从而在保证产量的前提下降低总施肥量和成本^[26-28],控释尿素与普通尿素配施结合了速效与缓释优势,在小麦^[29-30]、玉米^[31-32]、水稻^[33-34]等作物上已取得显著成效,显著提升了产量和氮肥利用率。例如,河南禹州试验中控释尿素与普通尿素5:5配施可使小麦增产9.58%,氮素累积量增加21.43%^[29];申朝阳等^[35]研究表明,30%~50%控释尿素配施使谷子产量提升29.28%~31.81%,氮肥农学利用率最高提升295.55%。但普通尿素与控释尿素配施对大蒜产量提升的研究仍处于起步阶段。

控释肥通过将营养颗粒包裹在有机或无机材料中使肥料的养分释放与作物生长周期一致,从而提高营养物质的利用效率,随着包膜材料破裂,肥料颗粒中的养分被溶解和释放,肥料在土壤中的浓度梯度降低,从而减缓了养分释放速率。控释肥的养分释放速率主要与包膜材料有关^[36]。因此,本研究通过设置不同控释时间(60、90 d)尿素与普通尿素的多梯度配施试验,分析其对大蒜农艺性状(株高、假茎粗、SPAD值)、养分吸收(氮、磷、钾累积量)、产量和品质(大蒜素含量)的影响,旨在筛选出最优的控释尿素类型及控释尿素与普通尿素配施比例,为大蒜高效施肥提供理论依据和技术支撑。研究结果对推动大蒜绿色高产栽培、提高氮肥利用率及减轻环境污染具有重要意义。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验于2024年9月至2025年6月在河南省

开封市杞县五里河镇芦庄村进行。此地为暖温带大陆性季风气候。当地种植模式为大蒜-玉米轮作,玉米收获后秸秆全部还田。大蒜生育期内的日平

均气温为 12.55 °C,日平均降水量为 1.28 mm,具体气象数据见图 1。施肥前取 0~20 cm 耕层土壤测定基本理化性状,具体参数见表 1。

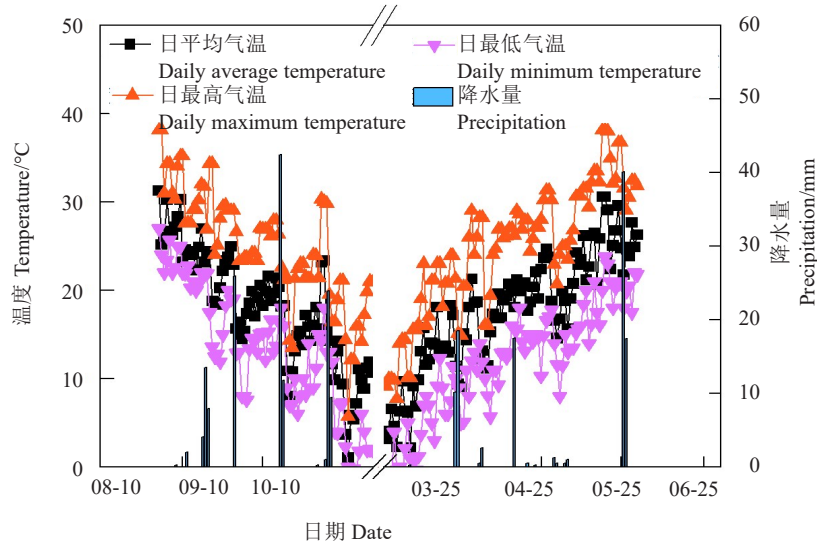


图 1 2024 年 9 月至 2025 年 6 月试验点气象数据

Fig. 1 Meteorological data of the test site from September 2024 to June 2025

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土壤质地 Soil texture	土壤容重 Soil bulk density/ (g·cm ⁻³)	pH	w(有机质) Organic matter content/(g·kg ⁻¹)	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/(mg·kg ⁻¹)
黏壤土 Clay loam	1.41	8.0	14.6	1.6	19.6	126.3

1.2 试验材料

供试大蒜品种为中晚熟的济南大青稞,由杞县农业农村局提供。该品种生育期 260 d,植株粗壮,耐寒性强,抗病性好,5月下旬至6月上旬收获。控释尿素分为释放周期为 60 d(控释尿素 1)和 90 d(控释尿素 2)2 种类型,其中包膜尿素的膜材为生

物基聚氨酯,2 种控释尿素区别主要在于膜材的添加量不同,释放周期为 60 d 的包膜尿素膜材添加量为 2.5%,释放周期为 90 d 的包膜尿素膜材添加量为 3.5%,2 种控释尿素均购自河南心连心化学工业集团。由图 2 可知,对 2 种类型控释尿素在 25 °C 下静水释放,分别在第 60 天和 90 天氮溶出率达到

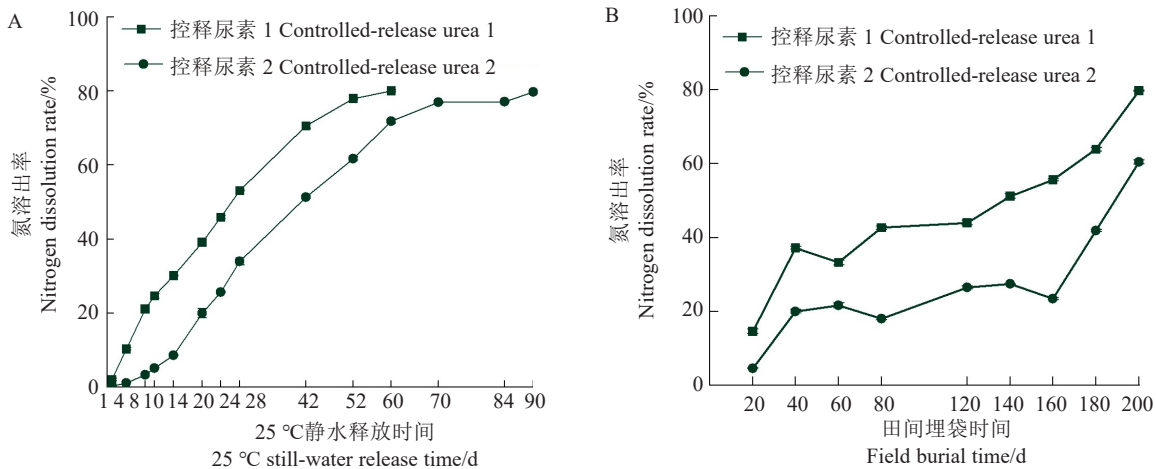


图 2 25 °C 静水释放(A)和田间埋袋(B)条件下 2 种控释尿素的氮溶出率

Fig. 2 Nitrogen dissolution rates of the two controlled-release ureas under the conditions of hydrostatic release at 25 °C (A) and buried bags in the field (B)

80%，在田间埋袋条件下第200天的氮素溶出率分别为80%和60%，2种控释尿素含氮量(w,后同)均为45%；普通尿素含氮量为46%，磷肥使用过磷酸钙(P₂O₅含量16%)，钾肥使用硫酸钾(K₂O含量52%)，均由河南心连心化学工业集团提供。

1.3 试验设计

试验采用随机区组排列，小区面积为30 m² (5 m×6 m)，大蒜种植密度4.2万株·hm⁻²，于2024年9月13日播种，2025年5月20日收获。氮磷钾采用18-10-18配方，每667 m²施尿素46.75 kg、过磷酸钙67.00 kg、硫酸钾43.20 kg，作为底肥一次性施入，后期不再追肥。控释尿素与普通尿素配施比例见表2，共10个处理，每个处理3次重复。在播种、返青、抽薹前后灌水，在播种后覆膜前打1次除草剂，后期视病虫害发生情况统一防治。

表2 控释尿素与普通尿素配施占总氮肥施用量比例
Table 2 Proportion of combined controlled-release urea and ordinary urea in total nitrogen fertilizer application

处理 Treatment	占总氮肥施用量比例 Proportion of total nitrogen fertilizer/%		
	普通尿素 Conventional urea	控释尿素 1 Controlled-release urea 1	控释尿素 2 Controlled-release urea 2
T1	20	40	40
T2	20	80	0
T3	20	0	80
T4	40	30	30
T5	40	60	0
T6	40	0	60
T7	60	20	20
T8	60	40	0
T9	60	0	40
CK	100	0	0

1.4 测定指标与方法

分别于越冬期(2025年3月中旬)、抽薹期(2025年4月中下旬)和成熟期(2025年5月下旬)，每个小区连续监测10株大蒜，测量植株的株高、假茎粗、叶片SPAD值，其中株高测量时以地表为坐标原点，植株基部至最高功能叶叶尖的垂直距离；假茎粗测量植株基部向上5 cm处；使用叶绿素仪(SPAD-502Plus,柯尼卡美能达)统一测量自上而下第3片叶中段的SPAD值。

于苗期(2024年12月中旬)、越冬期(2025年3月中旬)、抽薹期(2025年4月中下旬)和成熟期(2025年5月下旬)每个小区采集长势均匀一致的具有代表性的8株样品，蒜头在抽薹期开始膨大，此后将蒜头与地上部植株的养分分别测定，在成熟期样品完成采收后统一测定养分含量。采集到的

植株样品100℃杀青1 h后80℃烘干至恒质量，测定干物质质量，粉碎后过筛、消煮，过滤得到待测液用于测定植株氮、磷、钾含量。参照鲍士旦^[37]的方法，采用凯氏定氮法测定蒜头与地上部植株氮含量，采用钼蓝比色法测定蒜头与地上部植株磷含量，采用火焰分光光度法测定蒜头与地上部植株钾含量。大蒜素为大蒜的特征性评价指标，硝酸盐含量是评判蔬菜食用安全的重要指标，二者能全面反映大蒜的品种特性与食用安全性，采收后立即测定蒜头中大蒜素、硝酸盐含量，其中大蒜素采用硫酸钡比浊法测定^[38]，硝酸盐采用紫外分光光度法测定^[39]。

大蒜收获时每个小区选取30株蒜，蒜头下方用蒜剪贴蒜头剪掉根，上方在距离蒜头4 cm处剪断假茎，将蒜头上的泥土洗净、晾干后用游标卡尺测定蒜头直径，用百分天平称质量并折算成每hm²产量，蒜头直径按蒜头最大横径进行分级^[40]：特级蒜头横径≥65 mm，一级≥55 mm，二级≥45 mm，三级≥30 mm。

氮、磷、钾元素累积量、成熟期氮素收获指数^[41]和干物质、元素积累速率^[42]按如下公式计算，其中抽薹期及成熟期元素累积量为蒜头元素累积量与地上部植株元素累积量之和。计算公式如下：

$$\text{元素累积量}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=\text{干物质质量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\times\text{元素含量}/\% \quad (1)$$

$$\text{氮素收获指数}/\%=\text{成熟期的蒜头氮素累积量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})/\text{成熟期地上部植株氮素累积量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \quad (2)$$

$$\text{干物质积累速率}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})=(\text{后一时期干物质质量}-\text{前一时期干物质质量})/\text{生育期生长时间}(\text{d}) \quad (3)$$

$$\text{元素积累速率}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})=(\text{后一时期元素累积量}-\text{前一时期元素累积量})/\text{生育期生长时间}(\text{d}) \quad (4)$$

1.5 数据处理

采用IBM SPSS Statistics 26进行试验数据的统计分析，采用LSD最小显著差异法进行不同处理间的多重比较。采用Excel 2021、Origin (2021)软件进行数据处理和绘图。

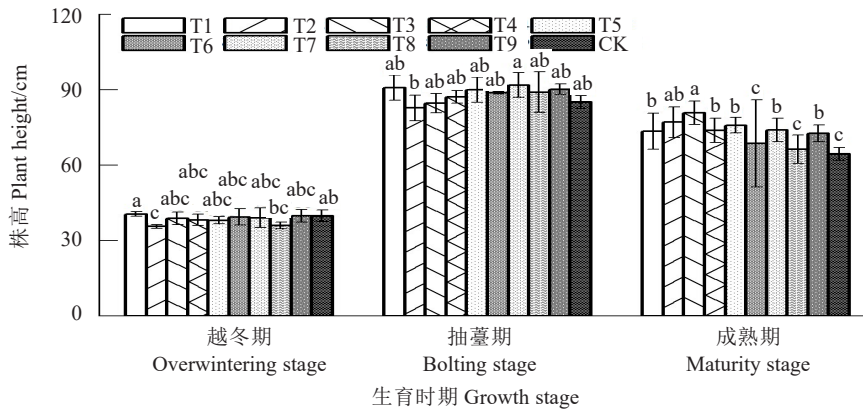
2 结果与分析

2.1 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜农艺性状的影响

2.1.1 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜株高的影响 由图3可知，越冬期T1处理株高最高，T2处理株高最低，其他各处理间差异均不显著。抽薹

期 T7 处理株高最高,较 CK 提高 7.82%,各控释尿素与普通尿素配施处理与 CK 差异均不显著。成熟期 T3 处理株高最高,显著高于除 T2 处理外的其他处理,且各控释尿素与普通尿素配施处理较 CK 提高了 2.93%~25.52%。

2.1.2 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜假茎粗的影响 假茎粗是衡量大蒜植株健壮程度的关键指标。由图 4 可知,越冬期,T9 处理的假茎粗最粗,较 CK 显著提高了 11.65%,其他处理与 CK 差异均不显著。抽薹期 T1 处理的假茎粗最粗,较 CK 提高



注:不同小写字母表示同一生育期不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level among different fertilizer treatments at the same growth stage. The same below.

图 3 控释尿素与普通尿素配施对不同生育期大蒜株高的影响

Fig. 3 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on plant height of garlic at the different growth stages

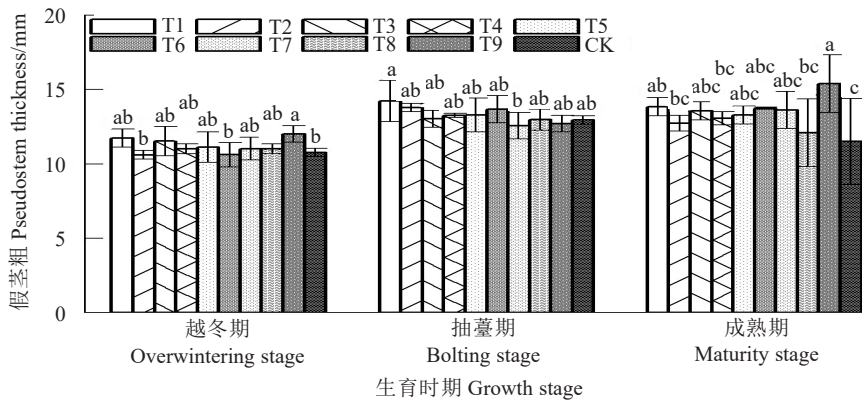


图 4 控释尿素与普通尿素配施对不同生育期大蒜假茎粗的影响

Fig. 4 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the pseudostem thickness at the different growth stages

了 9.87%,各控释尿素与普通尿素配施处理与 CK 差异均不显著。成熟期各控释尿素与普通尿素配施处理假茎粗均大于 CK,较 CK 增加了 5.09%~25.02%,T9 处理最粗,较 CK 显著增加了 25.02%。

2.1.3 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜叶片 SPAD 值的影响 叶片 SPAD 值反映了大蒜叶片的叶绿素相对含量。由图 5 可知,越冬期和抽薹期各处理叶片的 SPAD 值均无显著差异。成熟期 T3 和 T4 处理叶片 SPAD 值均显著高于 CK,较 CK 分别显著提高 14.55%、15.06%,其他处理与 CK 差异均不显著。

2.2 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜养分积累的影响

2.2.1 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜干物质质量的影响 由图 6 可知,越冬期至抽薹期为干物质质量快速积累期,干物质积累速率为 225.10~363.53 kg·hm⁻²·d⁻¹。抽薹期至成熟期干物质积累速率降低,为 65.47~179.73 kg·hm⁻²·d⁻¹。苗期 T4 处理干物质质量最高,较 CK 提高了 13.33%,各处理间差异均不显著。越冬期 T7 和 T9 处理的干物质质量较高,较 CK 分别提高了 12.85%和 14.88%,但各控释

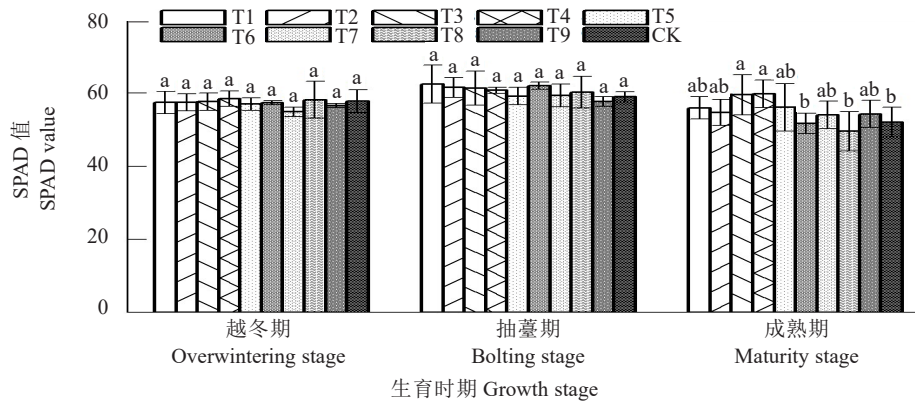


图5 控释尿素与普通尿素配施对不同生育期大蒜 SPAD 值的影响

Fig. 5 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the leaf SPAD value of garlic at the different growth stages

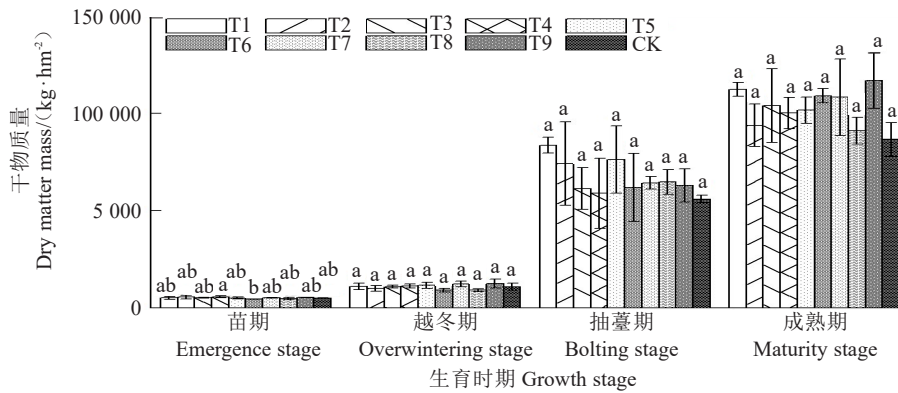


图6 控释尿素与普通尿素配施对不同生育期大蒜干物质量的影响

Fig. 6 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the dry matter mass of garlic at the different growth stages

尿素与普通尿素配施处理与CK差异均不显著。从抽薹期开始到成熟期,各控释尿素与普通尿素配施处理的干物质量均高于CK,但与CK差异均不显著。抽薹期各控释尿素与普通尿素配施处理干物质量较CK提高5.38%~49.65%,其中T1处理的干物质量最高,较CK提高49.65%。成熟期各控释尿素与普通尿素配施处理干物质量较CK提高5.10%~

34.91%, T9处理干物质量最高,较CK提高了34.91%。这表明,控释尿素与普通尿素配施能够提高大蒜的干物质量。

2.2.2 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜氮素累积量的影响 氮素累积量直接影响大蒜的产量和品质。由图7可知,各处理氮素累积量整体上均随生育期延长呈上升趋势。越冬期至抽薹期

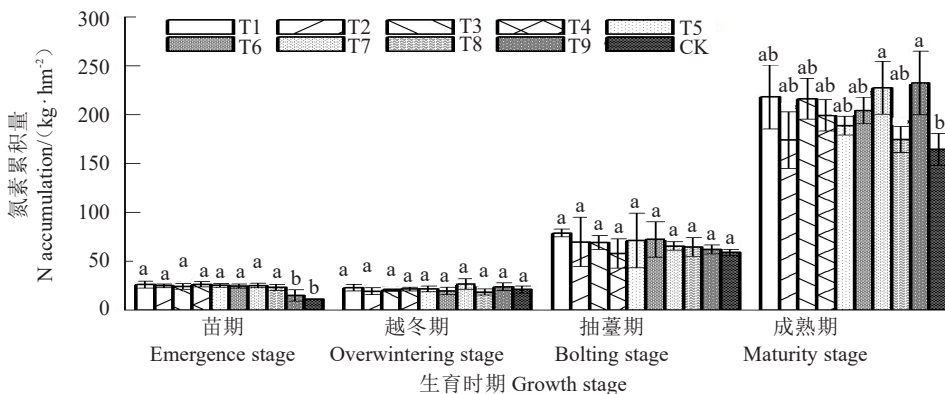


图7 控释尿素与普通尿素配施对不同生育期大蒜氮累积量的影响

Fig. 7 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the N accumulation of garlic at the different growth stages

为氮素快速积累期,氮素积累速率为 1.82~2.80 kg·hm⁻²·d⁻¹。抽薹后进入成熟期,氮素积累速率为 3.48~4.91 kg·hm⁻²·d⁻¹。苗期 T1~T8 处理较 CK 显著提高了 109.14%~138.66%,T9 处理虽较 CK 有所提高但显著不差异;越冬期 T7 和 T9 处理的氮素积累量较高,较 CK 分别提高了 26.42%和 12.90%,但各控释尿素与普通尿素配施处理与 CK 差异均不显著。抽薹期除 T4 处理外,其他控释尿素与普通尿素配施处理氮素积累量均高于 CK,较 CK 提高 5.17%~33.60%,但各控释尿素与普通尿素

配施处理与 CK 差异均不显著。成熟期各控释尿素与普通尿素配施处理氮素积累量均高于 CK,较 CK 提高了 5.66%~41.27%,其中 T7 和 T9 处理的氮素积累量较高,较 CK 显著提高了 38.08%和 41.27%。

2.2.3 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜磷素积累量的影响 由图 8 可知,越冬期至抽薹期磷素积累较快,积累速率为 9~20 kg·hm⁻²·d⁻¹。抽薹期至成熟期,磷素积累速率为 13~41 kg·hm⁻²·d⁻¹。苗期 T2 处理磷素积累量最高,较 CK 提高了 20.29%,T6 处理较 CK 降低 12.51%,各控释尿素与普通尿素配

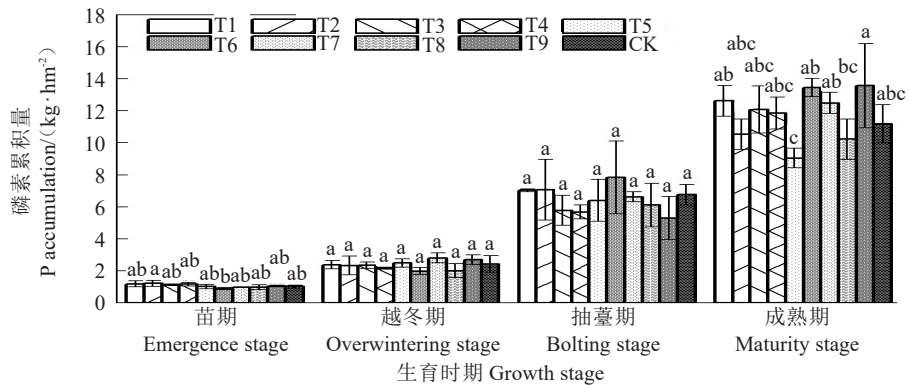


图 8 控释肥与普通尿素对比对不同生育期大蒜磷素积累量的影响

Fig. 8 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the P accumulation of garlic at the different growth stages

施处理与 CK 均无显著差异。越冬期和抽薹期各控释尿素与普通尿素配施处理磷素积累量与 CK 均无显著差异。成熟期除 T2、T5、T8 处理磷素积累量低于 CK 外,其他处理均高于 CK,较 CK 提高 6.02%~21.39%,T9 处理磷素积累量最高,较 CK 提高了 21.39%。这表明控释尿素与普通尿素配施能够提高大蒜磷素积累量,但需要考虑配施比例。

2.2.4 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜钾素

积累量的影响 由图 9 可知,越冬期至抽薹期钾素积累较快,积累速率为 8.38~12.91 kg·hm⁻²·d⁻¹。抽薹期至成熟期钾素积累速率降低,为 -0.90~3.78 kg·hm⁻²·d⁻¹。但 4 个时期各控释尿素与普通尿素配施处理均与 CK 无显著差异。苗期各控释尿素与普通尿素配施处理钾素积累量均高于 CK,较 CK 提高 2.49%~22.61%。越冬期除 T6、T8 处理外,其他处理均高于 CK。抽薹期 T5 处理的钾素积累量

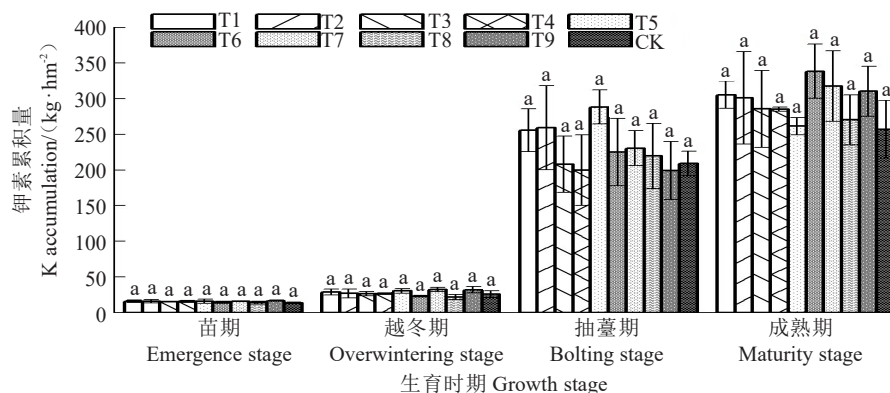


图 9 控释尿素与普通尿素配施对不同生育期大蒜钾素积累量的影响

Fig. 9 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the K accumulation of garlic at different growth stages

最高,较 CK 提高了 37.98%,T3、T4、T9 处理较 CK 分别降低了 0.40%、4.51%、4.63%,其他处理均高于 CK。成熟期各控释尿素与普通尿素配施处理均高于 CK,较 CK 提高了 1.68%~31.63%。

2.3 不同控释尿素与普通尿素配施对蒜头产量、氮素收获指数和品质的影响

2.3.1 不同控释尿素与普通尿素配施对蒜头产量和氮素收获指数的影响 与 CK 相比,各控释尿素与普通尿素配施处理蒜头产量提高了 4.97%~35.18%,T1、T6 和 T9 处理产量较高,T9 处理产量最高,较 CK 显著提高 35.18%,仅 T8 处理与 CK 差异不显著(图 10、图 11)。由图 12 可知,除 T4 处理外,其他处理氮素收获指数均高于 CK,较 CK 提高了 0.67~8.45 百分点,T9 处理最高,为 47.51%,较 CK 显著提高了 8.45 百分点,T4 处理低于 CK,但与 CK 差异不显著。

2.3.2 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜外观品质的影响 蒜头直径是大蒜的外观品质之一。

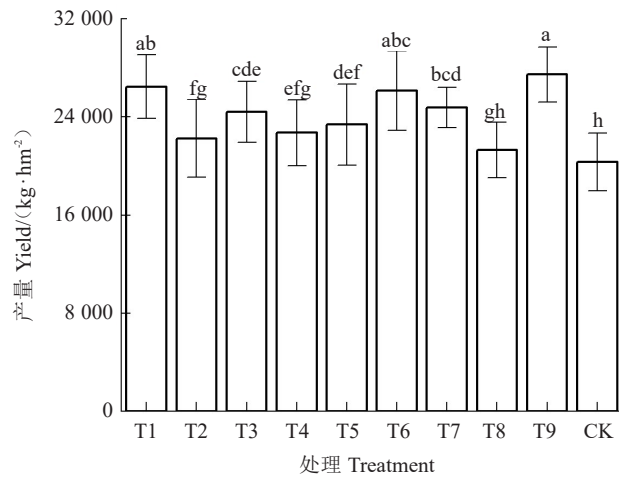


图 10 控释尿素与普通尿素配施对成熟期大蒜蒜头产量的影响

Fig. 10 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the garlic bulb yield at the maturity stage

由图 13 可知,与 CK 相比,各控释尿素与普通尿素

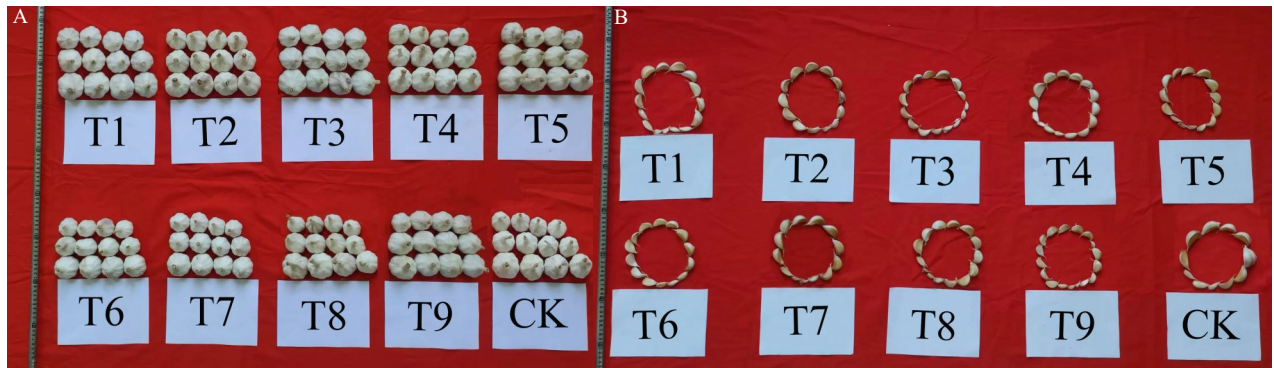


图 11 成熟期各控释尿素与普通尿素配施处理的蒜头(A)和蒜瓣(B)照片

Fig. 11 Photographs of garlic bulbs(A) and cloves(B) at maturity stage under different combined application of controlled-release urea and ordinary urea

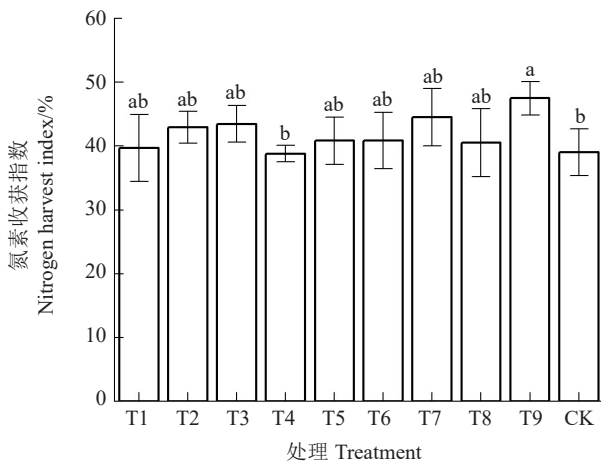


图 12 控释尿素与普通尿素配施对大蒜氮素收获指数的影响
Fig. 12 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the nitrogen harvest index of garlic

配施处理蒜头直径均大于 CK,较 CK 增加 1.30%~14.03%。T8 处理与 CK 无显著差异,其他处理均显著大于 CK,其中 T9、T6 和 T1 蒜头直径较大,分别较 CK 显著增加 14.03%、13.47%和 11.81%。

2.3.3 不同控释尿素与普通尿素配施对蒜头大蒜素、硝酸盐含量的影响 由图 14 可知,各处理蒜头大蒜素含量为 3.89~4.43 mg·g⁻¹,各控释尿素与普通尿素配施处理大蒜素含量较 CK 提高 3.39%~13.68%,但各处理间大蒜素含量无显著差异。由图 15 可知,各处理硝酸盐含量为 624.63~1 321.29 mg·kg⁻¹,其中 CK 含量最高,超过硝酸盐阈值,而各控释尿素与普通尿素配施处理硝酸盐含量均低于阈值。2 种控释尿素施用总比例相同的处理间(如 T1、T2、T3)硝酸盐含量差异不显著,随着 2 种控释尿

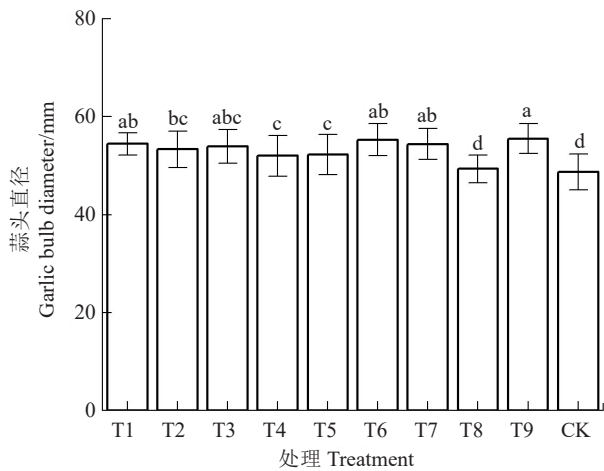


图 13 控释尿素与普通尿素配施对大蒜蒜头直径的影响
Fig. 13 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the diameter of garlic bulb

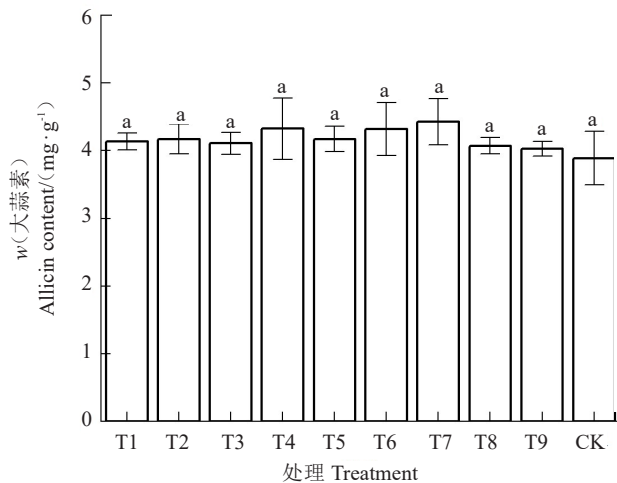
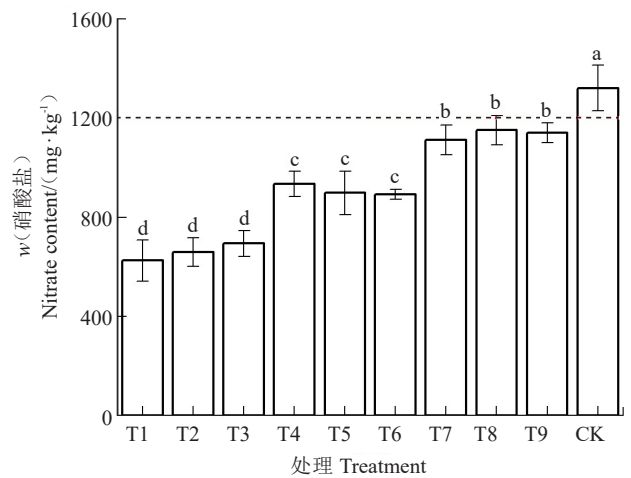


图 14 控释尿素与普通尿素配施对成熟期大蒜蒜头大蒜素含量的影响
Fig. 14 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the alliin content of garlic bulb at the maturity stage

素施用总比例的降低,蒜头中硝酸盐含量呈升高趋势。

2.4 不同控释尿素与普通尿素配施对大蒜经济效益的影响

由表 3 可知,释放周期为 60 d 与 90 d 的控释尿素价格相同,因此 T1~T3 处理、T4~T6 处理、T7~T9 处理 3 组肥料成本分别相同,化肥成本分别较 CK 提高了 2.11%、1.57%和 1.04%。各控释尿素与普通尿素配施处理总收入和净收益均较 CK 高,其中 T9 处理均最高,总收入较 CK 提高了 35.18%,



注:图中虚线为硝酸盐含量阈值。
Note: The dashed line in the figure represents the nitrate threshold.
图 15 控释尿素与普通尿素配施对成熟期大蒜蒜头硝酸盐含量的影响
Fig. 15 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the nitrate content of garlic at the maturity stage

表 3 控释肥与普通尿素配施对大蒜经济效益的影响
Table 3 Effects of combined application of controlled-release urea and ordinary urea on the economic benefits of garlic bulb (10⁴ yuan·hm²)

处理 Treatment	成本 Cost		总收入 Total income	净收益 Net profit
	化肥 Chemical fertilizer	其他投入 Other inputs		
T1	0.644 9	2.545	13.23	10.04
T2	0.644 9	2.545	11.13	7.94
T3	0.644 9	2.545	12.21	9.02
T4	0.641 5	2.545	11.35	8.16
T5	0.641 5	2.545	11.69	8.50
T6	0.641 5	2.545	13.08	9.89
T7	0.638 2	2.545	12.39	9.20
T8	0.638 2	2.545	10.66	7.47
T9	0.638 2	2.545	13.73	10.54
CK	0.631 6	2.545	10.16	6.97

注:蒜头价格按 2025 年 5 元·kg⁻¹。普通尿素价格 1900 元·t⁻¹、控释尿素 2200 元·t⁻¹、磷肥 3400 元·t⁻¹、钾肥 3300 元·t⁻¹;其他投入包括灌溉、农药、人工、机械。

Note: The price of garlic bulbs was set at 5 yuan·kg⁻¹ (based on the 2025 market price). The prices of fertilizers were as follows: Ordinary urea at 1900 yuan·t⁻¹, controlled-release urea at 2200 yuan·t⁻¹, phosphate fertilizer at 3400 yuan·t⁻¹, and potassium fertilizer at 3300 yuan·t⁻¹. Other production inputs included irrigation, pesticides, labor, and machinery operation costs.

净收益较 CK 提高 3.57 万元。这表明控释尿素与普通尿素配施能够提高大蒜经济效益。

3 讨论与结论

本研究表明,田间埋袋第200天时,释放周期为60 d的控释尿素氮素溶出率达80%,然而对于本试验大蒜品种而言,此时大蒜处于鳞芽分化后期,尚未进入抽薹期,王乃建等^[17]研究表明大蒜抽薹期和鳞茎膨大期氮素吸收占整个生育期的83.17%,表明后期仍需要大量氮素供给。以释放周期为60 d的控释尿素为主的处理(T2:20%普通尿素+80% 60 d控释尿素+0% 90 d控释尿素、T5:40%普通尿素+60% 60 d控释尿素+0% 90 d控释尿素、T8:60%普通尿素+40% 60 d控释尿素+0% 90 d控释尿素)成熟期氮素累积量较低,蒜头产量较CK仅分别提高了9.54%、15.07%和4.97%。这种生育后期的劣势可能与释放周期为60 d的控释尿素比例过大有关,释放周期为60 d的控释尿素前期释放氮素多,中后期氮素释放不足,导致关键期吸收养分少,产量不高。

田间埋袋第200天时释放周期为90 d的控释尿素氮素溶出率为60%。以释放周期为90 d的控释尿素为主的T3处理(20%普通尿素+0% 60 d控释尿素+80% 90 d控释尿素)虽在成熟期株高和叶片SPAD值分别较CK显著提高25.52%和14.55%,但其前期氮素供应不足,而后期过多导致大蒜贪青晚熟,最终产量虽显著高于CK,但均低于T6(40%普通尿素+0% 60 d控释尿素+60% 90 d控释尿素)、T9(60%普通尿素+0% 60 d控释尿素+40% 90 d控释尿素)处理,T6处理产量也低于T9。以上结果表明,释放周期为90 d的控释尿素所占比例越高,作物产量越高。T1处理(20%普通尿素+40% 60 d控释尿素+40% 90 d控释尿素)成熟期的干物质量及氮素、钾素累积量均较高,分别较CK提高49.65%、32.53%、和18.76%,可能与2种控释尿素养分比例相等,即释放周期为60 d的控释尿素大多数养分释放完成后,释放周期为90 d的控释尿素仍能不断供应养分有关,这种持续供应与大蒜需肥规律的良好协同使产量达到较高水平。

本研究结果表明,不同控释尿素与普通尿素配施能够通过调控大蒜农艺性状进而影响蒜头产量。成熟期T9处理在多个关键指标上表现突出:干物质量最高,较CK提高了34.91%;假茎粗最粗,较CK显著提高了25.02%,且蒜头产量与总收入均最高,分别较CK显著提高35.18%、35.18%,具有增加收益、减少追肥次数、节约人工成本的优势,与胡

铁军等^[19]的研究结果一致。

GH/T 1194—2022^[40]明确了蒜头大小的分级规范,蒜头直径是衡量大蒜商品规格与市场流通品质的核心指标,在本试验条件下各处理大蒜直径为48.71~55.54 mm,仅T6、T9处理达到一级分级标准,其他处理均为二级分级标准。

蒜头中硝酸盐含量直接关系到大蒜的食用安全性,GB 18406.1—2001^[43]对蔬菜中硝酸盐含量设定了限量要求:蔬菜硝酸盐限量标准为瓜果类 $\leq 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根茎类 $\leq 1200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,叶菜类 $\leq 3000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。大蒜属于根茎类蔬菜,其硝酸盐含量需符合我国限量标准($\leq 1200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。本试验结果表明CK硝酸盐含量已经超过标准中硝酸盐阈值,而各控释尿素与普通尿素配施处理硝酸盐含量均低于阈值。本研究中,2种控释尿素所占比例越高,蒜头所含硝酸盐含量越低,这与毛震宇^[8]的结果一致。

《中华人民共和国药典(一部)》^[44]将大蒜列为药食同源的常用中药材,并对其品质指标如大蒜素含量等作出了明确规定。有研究表明,不同施氮水平会导致大蒜素含量产生显著差异^[45],而在本试验中氮素用量一致,各处理大蒜素含量均无显著差异,为 $3.89\sim 4.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。也有研究表明氮肥和硫肥均可提高大蒜蒜头中的蒜氨酸和大蒜素含量,与氮肥相比,施用硫肥对蒜头中的蒜氨酸和大蒜素含量的提升作用更大^[46]。蒜氨酸是大蒜素合成的前体物质,其N原子的质量占整体比例较小,为7.91%,据此更加印证本试验各处理蒜头中大蒜素含量无显著差异的结果。

提升氮素收获指数是配施技术的重要价值体现。王茂莹等^[47]研究表明,包膜尿素通过延缓氮素释放,使小麦花后土壤氮素供应更稳定,促进了营养器官(茎、叶鞘)氮素向籽粒转运,使花后氮素转运量、小麦氮素收获指数、产量较普通尿素分别提高了16.3%、9.2%、8.7%。贺平等^[48]研究表明,与普通尿素相比,普通尿素与控释尿素配施可显著提升稻-麦产量,稻-麦周年总产量提高21.7%。上述研究共同表明控施尿素能够提高氮素收获指数和产量,与本研究结果一致。本研究中,T9处理的氮素收获指数最高,较CK显著提高8.45个百分点,干物质量和产量也均最高。T9处理氮素收获指数最高的原因可能为:(1)减少了养分损失,配施模式能有效抑制氮挥发^[15];(2)提高了养分吸收效率:成熟期氮素、磷素、钾素累积量均较高,表明养分吸收更为充分;(3)优

化了养分供应与需求的匹配度:释放周期为 90 d 的控释尿素释放曲线较好地契合了大蒜抽薹期的需肥高峰^[17],避免了生育前期供应不足或后期供应过剩现象。王义凡等^[29]研究也表明,通过优化不同释放周期控释尿素与普通尿素配施比例,可实现平稳且持续的氮素供应,进而提高小麦产量。

与单施尿素相比,大蒜生产实行缓控释尿素与普通尿素配合一次性施用,能够有效减少人工投入成本。本研究表明控释尿素与普通尿素配施适宜的比例才能起到改善大蒜农艺性状、提高产量和经济效益的作用,其中以 T9 处理(60%普通尿素+0% 60 d 控释尿素+40%90 d 控释尿素)产量与经济效益最高,与单施普通尿素相比,蒜头产量显著提高 35.18%,总收入增长 35.18%,氮素收获指数显著提高了 8.45 百分点,可作为河南省大蒜主产区轻简化施肥的优选方案。

参考文献

- [1] 刘明.大蒜的功效及深加工研究进展[J].农业科技通讯,2021(10):179-181.
- [2] TATTELMAN E. Health effects of garlic[J]. American Family Physician,2005,72(1):103-106.
- [3] 中国报告大厅.2023 年大蒜市场分析:中国是全球最大大蒜生产国[EB/OL].(2023-08-21)[2025-09-15].<https://www.chinabgao.com/info/1245788.html>.
- [4] 崔学庆,崔学风,司利强,等.杞县:“全国大蒜第一县”的十年嬗变[EB/OL].(2020-09-14)[2025-09-15].[\http://kf.hnr.cn/kfjpyc/article/1/1305434785400885248.
- [5] 王慢慢,侯翠红,黄玉芳,等.河南大蒜主产区施用专用肥对大蒜产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2020,33(10):45-50.
- [6] 王义凡,段风霞,王玉娟.不同种类生物肥对小麦产量的影响[J].农业科技创新,2025(23):39-41.
- [7] 谢建昌.世界的粮食与肥料问题[J].土壤学进展,1994,22(3):1-19.
- [8] 毛震宇.缓释肥替代普通化肥对蒜苗生长生理、品质、养分吸收及土壤酶活性的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2020.
- [9] 张宇.减量施氮配施有机肥及生物炭对大蒜生长的影响[D].山西晋中:山西农业大学,2019.
- [10] 罗国亮,努尔比燕·艾海提,王辉霞.尿素不同施量对大蒜产量及品质的影响研究初报[J].新疆农业科学,2008,45(增刊 1):177-179.
- [11] 刘晓燕.我国农田土壤肥力和养分平衡状况研究[D].北京:中国农业科学院,2008.
- [12] 汪娜,刘灵敏,蒋辰元,等.氮磷化肥施用次数对农业生态环境污染程度的影响研究[J].环境科学与管理,2026,51(3):44-47.
- [13] 周荣全.大蒜重茬减产的原因及防治措施[J].农业知识,2023(8):25-26.
- [14] 王传娥,马君岭.大蒜重茬的原因及防治技术[J].青海农技推广,2023(3):30-32.
- [15] HUMBERT J Y, DWYER J M, ANDREY A, et al. Impacts of nitrogen addition on plant biodiversity in mountain grasslands depend on dose, application duration and climate: A systematic review[J]. Global Change Biology, 2016, 22(1): 110-120.
- [16] 刘兆辉,吴小宾,谭德水,等.一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J].中国农业科学,2018,51(20):3827-3839.
- [17] 王乃建,邱金华,朱庆涛.大蒜养分需求规律及施肥模型初探[J].吉林蔬菜,2014(9):36-37.
- [18] 赵际翔,范仲卿,郭新送,等.控释氮钾肥料及其配合使用对大蒜生育特性及土壤养分变化的影响[J].中国农学通报,2019,35(33):64-70.
- [19] 胡铁军,张怀杰,郑佩君,等.3 种缓控释肥在双季稻上的应用效果比较[J].上海农业科技,2019(6):96-97.
- [20] 程金秋,朱盈,魏海燕,等.缓控释肥料在水稻上的应用效果综述[J].江苏农业科学,2017,45(17):11-15.
- [21] 孙明雪.控释尿素对土壤氮素迁移的调控机制研究[D].北京:中国农业科学院,2022.
- [22] 吴静,魏佑营,张民,等.控释肥对大葱生长及品质的影响[J].西北农业学报,2009,18(5):346-349.
- [23] 叶洁.控释氮肥用量对辣椒生长生理和养分利用的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2017.
- [24] 孙明.控释肥一次性施用对番茄生长和品质影响[D].武汉:华中农业大学,2022.
- [25] 侯红乾,冀建华,刘益仁,等.缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响[J].土壤,2018,50(1):43-50.
- [26] 洪瑜,赵营,王芳,等.控释肥在宁夏灌淤土中的氮素释放特征研究[J].中国土壤与肥料,2018(5):64-69,114.
- [27] 杜昌文,周健民.控释肥料的研制及其进展[J].土壤,2002(3):127-133.
- [28] GENG J B, CHEN J Q, SUN Y B, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency and yield of wheat and corn[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(4): 1665-1673.
- [29] 王义凡,任宁,董向阳,等.控释尿素与普通尿素配施对小麦产量、氮素吸收及经济效益的影响[J].作物杂志,2023(5):117-123.
- [30] 范震,田晓飞,翟胜,等.包膜尿素与普通尿素配施对冬小麦产量及土壤氮素的影响[J].聊城大学学报(自然科学版),2020,33(2):105-110.
- [31] 秦裕波,李前,徐晨,等.控释氮肥与尿素配施对玉米生长和养分吸收及产量的影响[J].现代农业科技,2021(3):12-14.
- [32] 解文艳,周怀平,杨振兴,等.控释尿素与普通尿素配施对春玉米产量、氮肥利用及经济效益的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):31-38.
- [33] 郭慧婷,王英豪,王云翔,等.不同控释期尿素与普通尿素配比对水稻产量及品质的影响[J].江苏农业科学,2024,52(8):94-99.
- [34] 刘梦竹,王锐,冯源,等.控释尿素释放周期对水稻产量和氮肥利用的影响[J].江苏农业学报,2024,40(5):827-834.

(下转第 227 页)