



稀土镧和铈对东北大豆荚果干物质和籽粒氮积累的影响

李昊阳¹, 张兴文², 陈海燕¹, 白露¹, 陶佩¹, 苗艳丽¹, 任红玉¹

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨工业大学 化工与化学学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为研究稀土对大豆荚果干物质及籽粒中氮积累量的动态影响规律,揭示其与产量形成的内在关系,以东北典型不同品质类型的大豆东农 42(高蛋白型)、东农 47(高油脂性型)和东农 52(兼用型)为试验材料,采用盆栽方式种植,在苗期和初花期分别叶面喷施不同浓度的 LaCl_3 、 CeCl_3 和 $\text{LaCl}_3 + \text{CeCl}_3$ 溶液,测定大豆初荚至成熟期干物质和氮积累量的动态变化。结果表明:初荚后 20~40 d 为干物质和氮素积累的主要时期,40 d 后积累速度减缓,呈现慢慢慢的增长趋势。适宜浓度的稀土溶液可以提高大豆干物质和氮积累总量及最终产量,且稀土对各指标的影响程度因大豆品质类型的不同而存在差异性。东农 42 在 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CeCl}_3$ 处理下干物质、氮积累总量和产量均最高,较对照分别显著增加 22.66%、38.41% 和 39.48%。东农 47 在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CeCl}_3$ 处理下 3 个指标均最高,较对照分别显著增加 18.71%、31.62% 和 29.62%。东农 52 在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CeCl}_3$ 处理下 3 个指标均最高,其中氮积累总量较对照显著增加 13.10%,干物质和产量分别增加 6.80% 和 4.20%,但差异不显著。由此看来,稀土铈的处理效果最佳,且对高蛋白大豆的促进作用最大。

关键词: 镧; 铈; 大豆; 氮积累量; 干物质积累

Effects of Rare Earth Lanthanum and Cerium on Pod Dry Matter and Grain Nitrogen Accumulation of Soybean in Northeast China

LI Hao-yang¹, ZHANG Xing-wen², CHEN Hai-yan¹, BAI Lu¹, TAO Pei¹, MIAO Yan-li¹, REN Hong-yu¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to study the dynamic effect of rare earth elements on dry matter accumulation in soybean pods and nitrogen accumulation in soybean seeds, find the relationship between dry matter and nitrogen accumulation and yield formation, Dongnong 42 (high-protein), Dongnong 47 (high-fat) and Dongnong 52 (intermediate) of different genotypes in Northeast China were used as experimental materials. The samples were tested by spraying different concentrations of LaCl_3 , CeCl_3 and $\text{LaCl}_3 + \text{CeCl}_3$ solution on the leaves in the seedling stage and flowering stage, and measured the changes in dry matter and nitrogen accumulation from pod to maturity in soybean. The results showed that the main accumulation period of dry matter and nitrogen was 20–40 days after initial pod, and then the accumulation rate slowed down, showing a slow-fast-slow growth trend. Suitable concentrations of rare earths solution could increase the dry matter and nitrogen accumulation and the yield of soybean, the effects of rare earth elements on dry matter and nitrogen accumulation were different due to different soybean genotypes. Under the treatment of $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CeCl}_3$, the total amount of dry matter and nitrogen accumulation and yield of Dongnong 42 were the highest, and significantly increased by 22.66%, 38.41% and 39.48% compared with the control. Under the treatment of $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CeCl}_3$, the three indexes of Dongnong 47 were the highest, with a significant increase of 18.71%, 31.62% and 29.62% compared with the control. Under the treatment of $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CeCl}_3$, the three indexes of Dongnong 52 were the highest, the total amount of nitrogen accumulation was significantly increased by 13.10% compared with the control, and the dry matter and yield increased 6.80%, 4.20% respectively, but the difference were not significant. Therefore, the treatment effect of rare earth cerium was the best, and Dongnong 42 had the largest increase in all indicators.

Keywords: Lanthanum; Cerium; Soybean; Nitrogen accumulation; Dry matter accumulation

氮素是大豆生长发育过程中的必需元素,是细胞质、细胞核、酶的组成成分。作物氮素营养水平状况,直接影响其光合速率和生长发育状况,并最终影响作

物品质和产量^[1-2]。作物高产的前提是要有较高的生物量,而生物量累积又是以氮素吸收为基础^[3]。有研究表明,作物生育期内干物质和氮素的积累量与产量

收稿日期:2018-02-06

基金项目:国家自然科学基金(31471440)。

第一作者简介:李昊阳(1993–),男,硕士,主要从事稀土农用作物生理品质研究。E-mail:lihyoung@163.com。

通讯作者:任红玉(1974–),女,博士,副教授,主要从事稀土农用作物生理品质研究。E-mail:renhongyu@163.com。

显著正相关^[4]。因此促进大豆不同生育时期氮素与干物质的积累量是提高产量的关键。

影响大豆产量品质的因素既包括其自身品质类型的内在因素,也有水、肥、气、热等的外在因素。但目前,转基因作物的安全性及环境影响结论未定,因此通过营养调控的方式改良大豆品质、提高大豆产量具有重要意义。我国的稀土农用起源于20世纪70年代,为我国带来十分可观的社会与经济效益。稀土具有生理活性,适量的稀土元素可以促进植物种子萌发、提高出苗率、促进扦插植物生根^[5],增强植物抗逆境能力和抗病性^[6-7],增加植物叶绿素含量、提高植物光合速率^[8-10]。稀土在促进作物增产与改善作物品质方面的作用也已被证实^[11-12]。王宪泽等^[13]研究发现,稀土可以促进作物对氮素的吸收,提高作物体内氮代谢相关酶的活力,加快氮素的还原和同化,从而在一定程度上提高籽粒氮的积累。但稀土对植物的促进作用也存在着相应的剂量效应。

有研究表明,较高浓度的Ce会破坏拟南芥细胞的超微结构,抑制其主根的生长,不利于幼苗植株中营养元素的平衡,并导致拟南芥叶绿素含量、总鲜重显著下降^[14]。Wahid等^[15]研究发现,对椰子树施用低剂量的(1 g·株⁻¹)稀土时,可促进树体对氮素的吸收,而稀土施用剂量较大时则会抑制幼苗对磷的吸收。因为稀土对植物的生长有“低促高抑”的作用^[5,16],所以喷施稀土时应注意适宜浓度的筛选。

为研究稀土对我国东北不同品质特性大豆产量影响的内在规律,为东北大豆的高产栽培提供理论依据,为科学合理地使用稀土提供参考,本试验以高蛋白(东农42)、高脂肪(东农47)和兼用型(东农52)品质特性的3类典型的东北大豆为材料,采用盆栽试验方式,通过叶面喷施稀土镧与铈溶液,研究不同种类和浓度的稀土对不同品质型东北大豆荚果干物质积累、籽粒氮积累量的动态影响,揭示稀土与产量形成的内在关系。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2016年在东北农业大学园艺实验站进行。大豆品种为东农42、东农47和东农52(东北农业大学大豆研究所提供),采用盆栽法,盆高30 cm,盆口直径35 cm,盆底直径25 cm。每盆装土17.5 kg,每盆播种籽粒饱满、大小一致的种子8颗,长至三叶期,定苗4株,常规管理。试验用土为取自东北农业大学园艺实验站的黑土,土壤的基础理化性质为:

有机质 31.3 g·kg⁻¹,pH 7.62,碱解氮 147 mg·kg⁻¹、速效磷 74 mg·kg⁻¹、速效钾 202 mg·kg⁻¹。每盆施用尿素 0.44 g,磷酸二铵 1.22 g,硫酸钾 1.25 g。

在大豆苗期(6月17日)和初花期(7月1日),用喷雾器将浓度为120,150,180 mg·L⁻¹的LaCl₃溶液(分别用La12、La15、La18表示)和浓度为30,60,90 mg·L⁻¹的CeCl₃溶液(分别以Ce3、Ce6、Ce9表示)以及浓度为30,40,60 mg·L⁻¹LaCl₃+CeCl₃的混合溶液(分别用LC3、LC4、和LC6表示)分别均匀喷洒于大豆叶片的正反面,苗期每盆喷施约150 mL,初花期每盆喷施约300 mL,滴液为限,对照(CK)喷等量蒸馏水。自初荚期后的第20,30,40,50,60天(成熟期)各取样一次,每个处理3次重复。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 干物质量 取各组中生长正常、发育进程一致的大豆植株,取其中的全部荚果105℃杀青30 min后,70℃烘干至恒重,测定干物质量。

1.2.2 氮积累量 将烘干的籽粒粉碎后过60目筛,采用扩散培养法测定大豆籽粒的全氮量^[17],通过计算得到氮积累量。

$$NA = m \times W(N)$$

NA为籽粒氮积累量,mg·plant⁻¹;m为籽粒干物质重,g·plant⁻¹;W(N)为籽粒全氮含量,g·kg⁻¹。

1.2.3 产量 大豆成熟后每个处理和对照组各取12株计算理论产量。

1.3 数据分析

采用Excel 2007进行试验数据汇总、计算与绘图,利用SPSS 19.0软件系统中邓肯(Duncan)多重比较的方法对各项指标进行差异显著性分析。

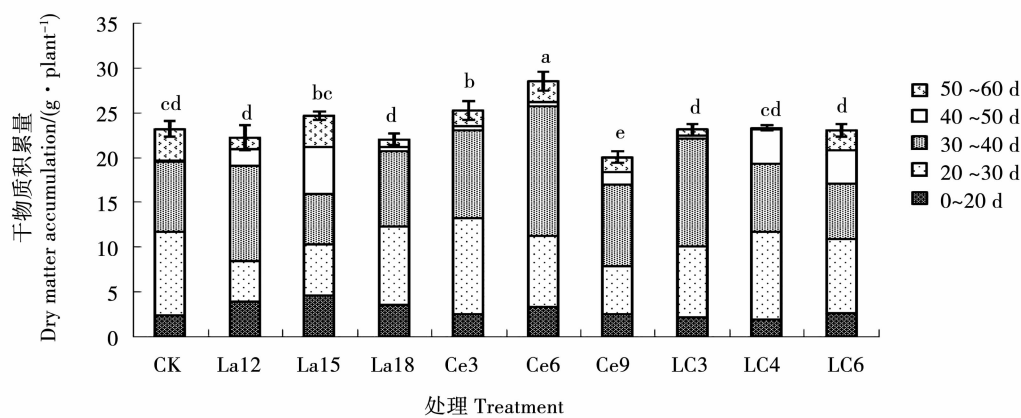
2 结果与分析

2.1 稀土对大豆荚果干物质积累的影响

如图1~3所示,不同品质型大豆的处理组及对照组在初荚后20 d内荚果干物质的积累量均相对较小,干物质积累的主要时期在初荚后20~40 d,之后积累量减少。

2.1.1 稀土对大豆东农42荚果干物质积累的影响

如图1所示,初荚后20 d内,稀土镧、铈处理组干物质的积累量均高于CK,且稀土镧的处理效果好于稀土铈。初荚后20~40 d,与CK相比在Ce3、Ce6、LC3、LC4处理下可以明显提高此阶段干物质的积累,且稀土铈的效果更好,并在Ce6处理下积累量达最大。初荚后40~50 d,CK干物质积累量几乎为零,所有稀土处理组干物质积累量均高于CK。初荚后50~60 d,CK干物质积累量最多,喷施不同类型的稀土均减少了50~60 d内干物质的积累量。



不同小写字母差异显著($P < 0.05$),下同。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$), the same as blow.

图 1 稀土对大豆东农 42 荚果干物质积累的影响
Fig. 1 Effect of rare earth elements on the accumulation of dry matter in soybean pod of Dongnong 42

大豆成熟后,稀土镧、铈及混合稀土处理组的干物质积累总量均随着处理浓度的升高先增加后减少,均在中等浓度稀土溶液处理下达最大值,呈现低促高抑的变化趋势。只有在 Ce3、Ce6 处理下干物质积累总量较 CK 显著增多,分别增加 8.60% 和 22.66%,而在 Ce9 处理下较 CK 显著降低 13.80%。

2.1.2 稀土对大豆东农 47 荚果干物质积累的影响
如图 2 所示,在初荚后 20 d 内,镧处理组及 Ce9 干物质积累量高于 CK。初荚后 20~40 d,Ce3、Ce6 处理较对照提高了干物质的积累,其中在 Ce3 处理

下达最大。初荚后 40~50 d,除 La15 干物质积累量低于 CK 外,其余各处理均高于 CK。初荚后 50~60 d,混合稀土及 La12、La18 处理组干物质积累量均高于 CK。

大豆成熟后,干物质积累总量随着稀土镧、铈浓度的升高先减少后增加,随混合稀土溶液浓度的升高而递减,除 La15 和 LC6 外其它处理均高于 CK,但只有在 La12、La18、Ce3、LC3 处理下干物质积累总量较 CK 显著增加,分别增加 13.07%、17.07%、18.71% 和 13.56%。

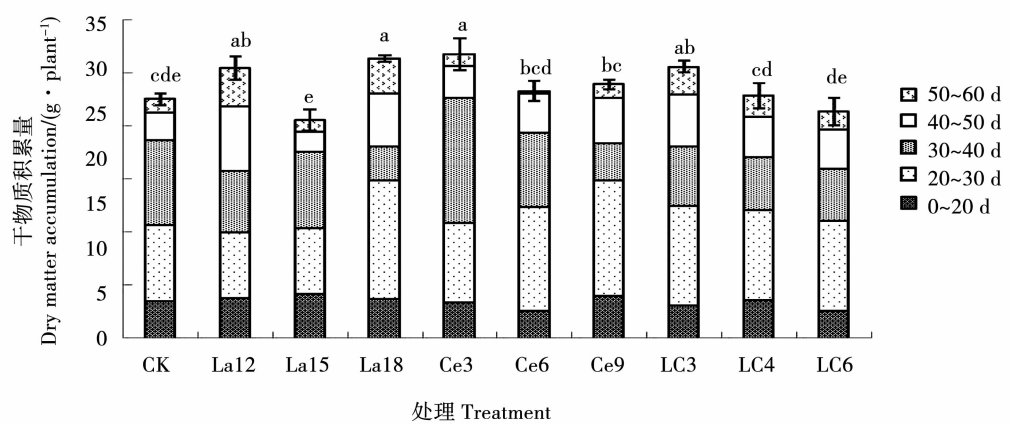


图 2 稀土对大豆东农 47 荚果干物质积累的影响
Fig. 2 Effect of rare earth elements on the accumulation of dry matter in soybean pod of Dongnong 47

2.1.3 稀土对大豆东农 52 荚果干物质积累的影响
如图 3 所示,在初荚后 20 d 内,稀土铈及 La12、La18 处理组干物质的积累量高于 CK。初荚后 20~40 d,在 Ce3、Ce9、LC3、LC4 处理下干物质积累量高

于 CK,其中在 Ce9 处理下此阶段积累量最多。初荚后 40~50 d,全部的稀土镧处理组及 Ce3、LC3、LC6 处理组的干物质积累量均高于 CK。初荚后 50~60 d,只有 La18、Ce9 干物质积累量高于 CK。

大豆成熟后,干物质积累总量随着镧、混合稀土溶液浓度的升高而递减,随着铈处理浓度的升高先减少后增加,在 La12、Ce3、Ce9、LC3 处理下干物质积累量高于 CK,但差异不显著。在 La15、La18、Ce6、LC4、LC6 处理下干物质积累总量较 CK 分别显

著减少 11.25%、15.01%、20.37%、10.11% 和 15.81%,由此可见东农 52 对于浓度的升高较为敏感,即便是促进东农 42、东农 47 干物质积累的浓度,也可能会对东农 52 造成不利影响。

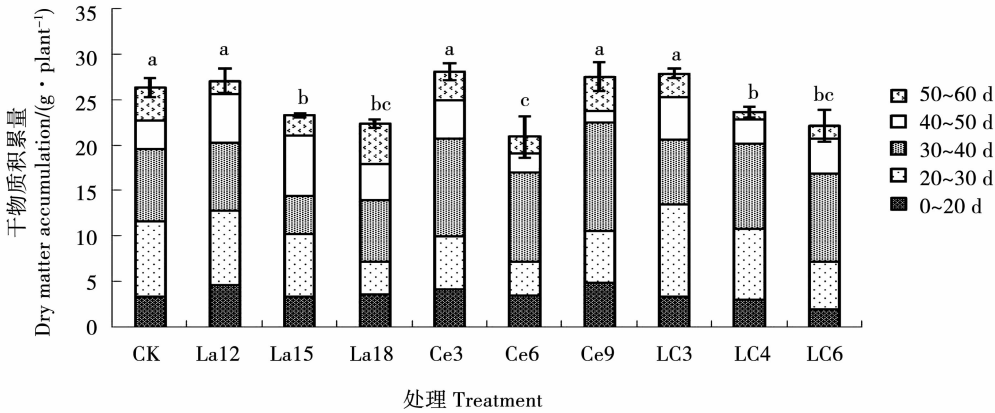


图3 稀土对大豆东农 52 荚果干物质积累的影响
Fig. 3 Effect of rare earth elements on the accumulation of dry matter in soybean pod of Dongnong 52

2.2 稀土对大豆籽粒氮积累的影响

如图 4~6 所示,在初荚后 20 d 内,大豆籽粒氮积累量相对较小,氮积累的主要时期在初荚后的 20 ~ 40 d,之后积累量减小。不同品质型的大豆间并无差异,这与干物质积累的趋势相一致。而喷施稀土后也并未改变这种积累规律。

2.2.1 稀土对大豆东农 42 籽粒氮积累的影响 如图 4 所示,在初荚后 20 d 内,稀土铈处理组可明显提高此阶段氮积累。初荚后 20 ~ 40 d, Ce3、Ce6、

LC3、LC4 处理组较 CK 更有利于氮素的积累,其中 Ce6 氮积累量最大。初荚后 40 ~ 50 d,各处理组氮积累量均高于 CK。初荚后 50 ~ 60 d,除 La15、Ce6 外,其它处理氮积累量均小于 CK。

大豆成熟后,籽粒氮积累总量随稀土镧、铈及混合稀土溶液浓度的升高均先增加后减少。除稀土镧处理组及 Ce9 外,其它处理氮积累总量均高于 CK,但只有在 Ce6 处理下,氮积累总量较 CK 显著增加,增加 38.41%。

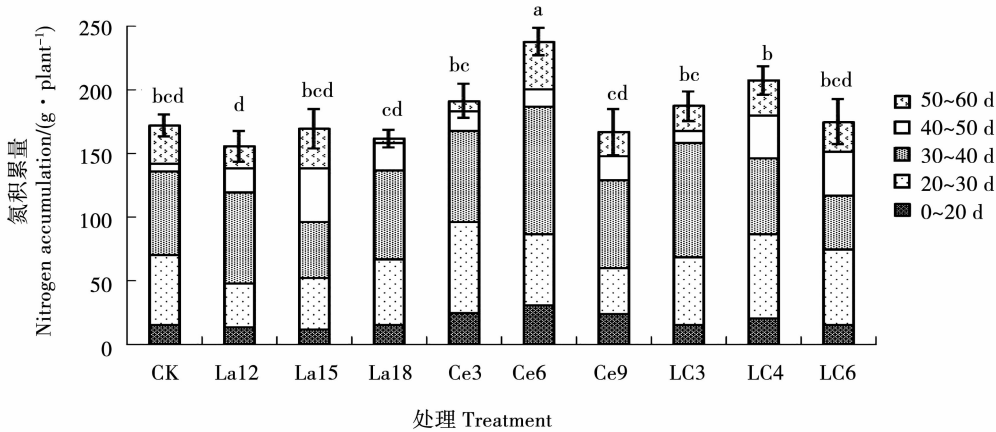


图4 稀土对大豆东农 42 籽粒氮积累的影响
Fig. 4 Effect of rare earth elements on the accumulation of nitrogen in soybean seed of Dongnong 42

2.2.2 稀土对大豆东农 47 籽粒氮积累的影响 如图 5 所示,初荚后 20 d,各处理组的氮积累量较 CK

并未有明显的提升。初荚后的 20 ~ 40 d,在 Ce3、Ce6 处理下可以明显提高此时期的氮积累量,其中

Ce3 氮积累量最大。初荚后的 40 ~ 50 d,除 La15、Ce3、Ce6 处理以外,其它处理氮积累量均高于 CK。初荚后的 50 ~ 60 d,CK 籽粒氮积累基本停滞,各稀土处理组的籽粒氮积累量均高于明显 CK。

大豆成熟后,籽粒氮积累总量随着镧和混合稀土溶液处理浓度的升高先减少后增加,随着铈处理

浓度的升高而递减。除 La15 籽粒氮积累总量小于 CK 外,其它各处理籽粒氮积累总量均高于 CK。其中 La12、La18、Ce3、Ce6、LC3 处理氮积累总量显著高于 CK, 分别较 CK 增加 16. 91%、24. 48%、31. 62%、19. 27% 和 20. 13%。

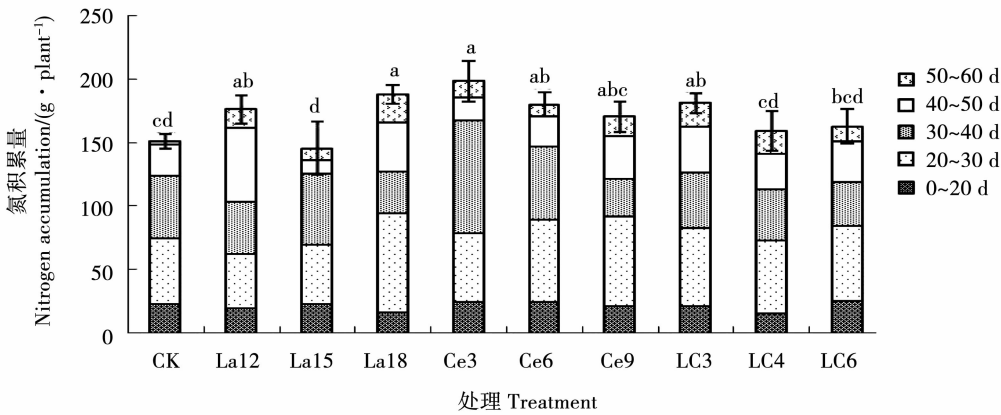


图 5 稀土对大豆东农 47 籽粒氮积累的影响

Fig. 5 Effect of rare earth elements on the accumulation of nitrogen in soybean seed of Dongnong 47

2. 2. 3 稀土对大豆东农 52 籽粒氮积累的影响 如图 6 所示,在初荚后 20 d 内,除 La15、La18、Ce6 处理外,其它处理组的氮积累量均高于 CK。初荚后 20 ~ 40 d, LC3 处理氮积累量最大。初荚后 40 ~ 50 d,除 La12、La15、LC3 外,其它处理氮积累量均低于 CK。初荚后 50 ~ 60 d,除 La18 及稀土铈处理外,其它处理组的氮积累量均低于 CK。

大豆成熟后,籽粒氮积累总量随着稀土铈与混合稀土处理浓度的升高均先减少后增加,随着稀土镧处理浓度的升高而递减。其中只有 Ce3 处理下,氮积累总量较 CK 显著增加,增加量为 13. 10%。而在 La18、Ce6 处理下分别较 CK 显著减少 16. 84% 和 13. 99%。

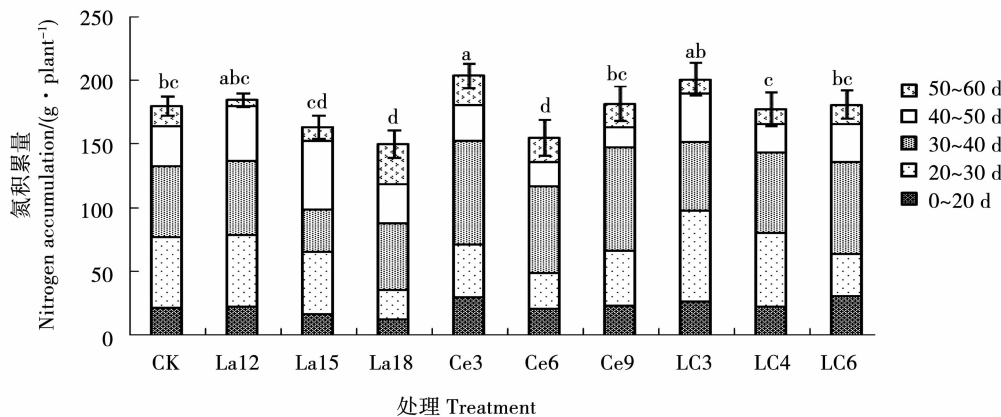


图 6 稀土对大豆东农 52 籽粒氮积累的影响

Fig. 6 Effect of rare earth elements on the accumulation of nitrogen in soybean seed of Dongnong 52

2. 3 稀土对不同品质型大豆产量的影响

如图 7 所示,随着稀土镧、铈及镧铈混合溶液浓度的升高,大豆东农 42 产量先增加后减少,即在同种类稀土处理组中,产量均在中间浓度达最大值,其中只有在 La15、Ce6、LC3、LC4 处理下产量显著高

于 CK,较 CK 分别增多 23. 23%、39. 48%、14. 55% 和 36. 61%。在高浓度 LC6 处理下产量最少,较 CK 显著降低 19. 72%。

对于东农 47 产量随着稀土镧变化为 La18 > La12 > CK > La15,只有在 La18 处理产量显著高于

CK,较 CK 增高 28.42%。在稀土铈处理下产量表现为 Ce3 > Ce9 > Ce6 > CK,只有 Ce3 处理产量显著高于 CK,较 CK 增高 29.62%。在混合稀土处理下产量表现为 LC3 > LC4 > CK > LC6。在高浓度 LC6 处理下产量最少,较 CK 显著降低 12.52%。

对于大豆东农 52 产量随着稀土镧变化为 La12 > CK > La15 > La18。在稀土铈处理下产量变化为 Ce3 > CK > Ce9 > Ce6。在混合稀土处理下产量变化

为 LC3 > CK > LC4 > LC6。东农 52 所有处理组的产量较 CK 差异均不显著。

综上所述,不同稀土处理对大豆产量的影响各不相同,且存在品种间的差异。喷施稀土溶液使东农 42 产量增加最多,而对东农 52 的产量则无显著影响。东农 42 和东农 47 均在稀土铈处理下产量最高,且稀土对产量的影响存在剂量效应,在高浓度的混合稀土处理下的产量较 CK 均显著降低。

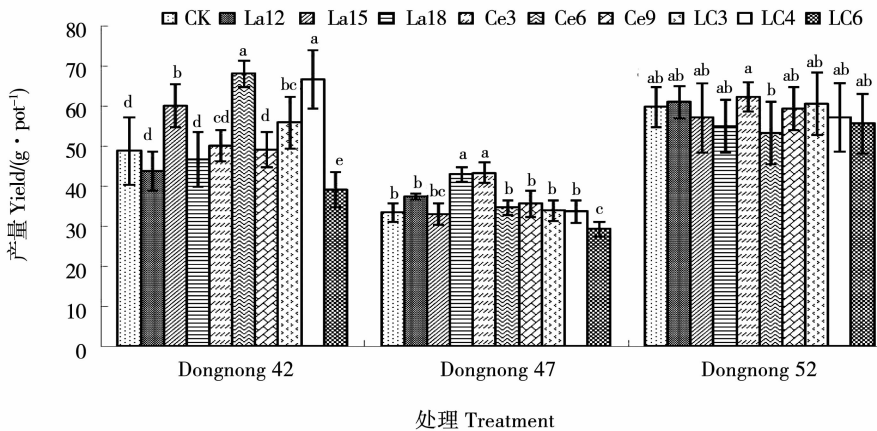


图 7 稀土对不同品质类型大豆产量的影响

Fig. 7 Effect of rare earth treatment on yield of soybean of different quality types

3 讨论

大豆生产的主要过程为碳氮的积累、分配、转移及最终产量的形成^[18]。氮积累依赖于根对土壤氮和化肥氮的吸收以及根瘤的固氮能力^[19]。已有试验证明,施用适宜浓度的稀土溶液可以通过提高植物体氮代谢相关酶的活性,促进植物内部硝态氮的还原性反应,有利于植株吸收的无机态氮离子转化为有机态的含氮化合物,进而促进了氮素积累^[20]。而碳积累取决于整个冠层的光合能力和叶片截获的有效辐射^[21]。碳素代谢主要通过光合作用、呼吸作用及糖代谢等途径来影响作物的生长发育、有机物的合成、积累和转运^[22]。前人研究表明,适量的稀土元素能增加大豆叶片中叶绿素的含量,促进植株的光合作用^[23]。

碳氮积累最终形成植物的干物质量,干物质积累的水平决定着最终产量的高低。植株的碳氮积累能力、环境因素以及土壤养分的利用率是影响生物量的综合因素。适宜浓度的稀土处理可以提高作物体内多种保护酶活性,快速清除体内活性氧和过多自由基,降低细胞膜的过氧化作用和丙二醛的含量,增强抗逆境胁迫能力^[24]。光合作用是植物干物质积累的来源,植物地上部 90% ~ 95% 的干物质来源于光合作用^[25-26],提高作物光合效率,也对提

高作物产量起着至关重要的作用。张万萍等^[27]的研究表明,适当浓度的稀土溶液能够增加黄瓜根系的活力,提高植株对土壤中养分的吸收利用率,黄瓜的氮磷钾含量较 CK 显著增加。因此,喷施稀土溶液后是通过作物生理活性等多方面的共同影响,促进了其产量品质的提高。

大豆不同生育阶段对氮素的吸收及分配速率存在差异。孙太靖等^[28]研究发现,从出苗至花期,大豆氮素的积累量占总积累量的 15.89%,花期至结荚期的氮素积累量占总积累量的 29.72%,鼓粒期是大豆氮素积累高峰期,占总积累量的 50.71%,成熟期占总积累量的 36.9%。本试验结果也表明,大豆初荚期后,籽粒氮积累过程与荚果干物质的积累过程分为快速增长期和缓慢增长期,呈“S”形曲线变化,无品种差异。这与前人研究结果相一致^[29],且喷施稀土后并未改变这种积累趋势。

喷施不同浓度的 LaCl₃、CeCl₃ 和 LaCl₃ + CeCl₃ 溶液后,在 60 mg · L⁻¹ CeCl₃ 处理下东农 42 的荚果干物质、籽粒氮积累总量和产量均达最大值,分别为 28.53 g · 株⁻¹、237.62 mg · 株⁻¹、67.97 g · 盆⁻¹;在 30 mg · L⁻¹ CeCl₃ 处理下东农 47 的上述 3 个指标均达到最大值,分别为 26.71 g · 株⁻¹、198.22 mg · 株⁻¹、43.28 g · 盆⁻¹。在 30 mg · L⁻¹ CeCl₃ 处理下东农 52 的上述 3 个指标均达到最大值,分别为 28.10 g · 株⁻¹、

203.42 mg·株⁻¹、62.26 g·盆⁻¹。由此看来,喷施同种类稀土溶液达到最佳处理效果的浓度范围因大豆品种不同而存在差异。

4 结 论

大豆荚果干物质积累和籽粒氮积累均呈现慢-快-慢的“S”形趋势,初荚后 20~40 d 是荚果干物质积累和籽粒氮积累的关键时期。此时期喷施 60 mg·L⁻¹ CeCl₃对东农 42 的荚果干物质和氮含量的积累效果最佳,而东农 47 喷施 30 mg·L⁻¹ CeCl₃的效果最佳,对于东农 52 喷施 90 mg·L⁻¹ CeCl₃和 30 mg·L⁻¹ LaCl₃ + CeCl₃时分别对于干物质积累和氮积累的效果最好。

稀土种类不同或不同稀土混合施用时对大豆荚果干物质积累量、籽粒氮积累和产量的影响效果不同。单一稀土铈处理最有利于干物质、氮素的积累及产量的提高,且对不同品质型大豆作用效果不同,对东农 42 的作用效果要优于东农 47 和东农 52。在 60 mg·L⁻¹ CeCl₃处理下东农 42 的荚果干物质、籽粒氮积累总量和产量达最大值,分别较 CK 显著增加 22.66%、38.41% 和 39.48%;在 30 mg·L⁻¹ CeCl₃处理下东农 47 的上述 3 个指标均达到最大值,分别较 CK 显著增加 18.71%、31.62% 和 29.62%。在 30 mg·L⁻¹ CeCl₃处理下东农 52 的籽粒氮积累总量最多,较 CK 显著增加 13.10%,干物质总量和产量最高,分别较 CK 增加 6.80% 和 4.20%。

参考文献

[1] 侯国梅. 追施氮肥对大豆体内氮素运转与分配的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2009:14-37. (Hou G M. Effects of nitrogen application on translocation and distribution of nitrogen in soybean[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009:14-37.)

[2] 裴宇峰, 韩晓增, 祖伟, 等. 水氮耦合对大豆生长发育的影响 I. 水氮耦合对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2005, 24(2):106-111. (Pei Y F, Han X Z, Zu W. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on growth and develop of soybean I. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on yield and quality of soybean[J]. Soybean Science, 2005, 24(2):106-111.)

[3] 杨萍, 李杰, 剡斌, 等. 胡麻/大豆间作体系下施氮对胡麻干物质积累和产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(4):489-497. (Yang P, Li J, Yan B, et al. Effects of applied nitrogen on dry matter accumulation and oil flax yield in flax/soybean intercropping system [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(4):489-497.)

[4] 高小丽, 孙健敏, 高金锋, 等. 不同绿豆品种花后干物质积累

与转运特性[J]. 作物学报, 2009, 35(9):1715-1721. (Gao X L, Sun J M, Gao J F, et al. Accumulation and transportation characteristics of dry matter after anthesis in different mung bean cultivars. [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9):1715-1721.)

[5] 吕春晖, 刘美玲, 齐菲, 等. 稀土元素铈对盐胁迫下小麦种子萌发的影响[J],农产品加工,2014(5):63-64,69. (Lyu C H, Liu M L, Qi F, et al. Physiological effects of cerium on wheat seed under salt stress[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(5):63-64,69.)

[6] 刘利杉, 黄楚瑜, 黄运湘, 等. 稀土微肥对烟草镉胁迫的缓解效应[J]. 中国农学通报, 2016, 32(6):113-118. (Liu L S, Huang C Y, Huang Y X, et al. Mitigative effect of ree fertilizer on cadmium stress of tobacco [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(6):113-118.)

[7] 任红玉, 王亮, 赵慧莉, 等. 稀土对东北大豆叶片脯氨酸含量的影响[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(4):480-486. (Ren H Y, Wang L, Zhao H L, et al. Effect of rare earth on proline levels in the northeast soybean [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2015, 33(4):480-486.)

[8] Huang H, Liu X Q, Qu C X, et al. Influences of calcium deficiency and cerium on the conversion efficiency of light energy of spinach[J]. Biometals, 2008, 21:553-561.

[9] 任红玉, 刘曦, 朱晓鑫, 等. 镧和铈对大豆开花期叶绿素含量的影响[J]. 中国稀土学报, 2013, 31(3):363-367. (Ren H Y, Liu X, Zhu X X, et al. Effect of lanthanum and cerium on chlorophyll content in soybean efflorescence [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2013, 31(3):363-367.)

[10] Gao Y S, Huang W F, Zhu L Y, et al. Effects of LaCl₃ on the growth and photosynthetic characteristic of Fny-infected tobacco seedlings [J]. Journal of Rare Earths, 2012, 30(7):725-730.

[11] 罗连光, 黄若玲, 何录秋, 等. 大豆施用含稀土生物有机肥应用效果研究[J]. 作物研究, 2009, 23(3):205-207. (Luo L G, Huang R L, He L Q, et al. Study on the effect of using rare earth bio organic fertilizer on soybean [J]. Crop Research, 2009, 23(3):205-207.)

[12] 任红玉, 刘曦, 高振宇, 等. 开花期喷施镧和铈对东北大豆化学品质的影响[J]. 中国稀土学报, 2014, 32(1):94-100. (Ren H Y, Liu X, Gao Z Y, et al. Effect of spraying rare earth on chemical quality of northeast soybean in efflorescence [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2014, 32(1):94-100.)

[13] 王宪泽. 稀土农用的效果, 影响因素及其作用的生理基础[J]. 稀土, 1994, 15(1):47-49. (Wang X Z. Production affecting factors and physiological basis of rare earth using in agricultural [J]. Rare Earths, 1994, 15(1):47-49.)

[14] Wang X, Lin Y S, Liu D W, et al. Cerium toxicity, uptake and translocation in *Arabidopsis thaliana* seedlings[J]. Journal of Rare Earths, 2012, 30(6):579-585.

[15] Wahid P A, Valiathan M S, Kamalam N V. Effect of rare earth elements on growth and nutrition of coconut palm and root competition for these elements between the palm and calotropis gigantean [J]. Journal of Plant Nutrition, 2000, 23(3):329-338.

[16] Wang C, He M, Shi W, et al. Toxicological effects involved in risk assessment of rare earth lanthanum on roots of *Vicia faba* L.

seedlings [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23 (10):1721-1728.

[17] 张韞. 土壤·水·植物理化分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社,2011:203-210. (Zhang Y. Soil·Water·Plant chemical analysis tutorial[M]. Beijing: Chinese Forestry Publisher, 2011:203-210.)

[18] 胡琳, 许为钢, 赵新西, 等. 论作物高产的遗传基础及实现产量突破的技术与途径[J]. 河南农业科学, 2008, 37(11):29-32. (Hu L, Xu W G, Zhao X X, et al. Genetic basis of high-yield and technology of improving yield in crops[J]. Henan Agricultural Sciences, 2008,37(11): 29-32.)

[19] Burias N, Planchon C. Increasing soybean productivity through selection for nitrogen fixation [J]. Agronomy Journal, 1999, 82: 1031-1034.

[20] 张小红, 赵依杰, 林强, 等. 钼对无籽西瓜叶片氮代谢关键酶活性的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2017, 32 (6):1072-1078. (Zhang X H, Zhao Y J, Lin Q, et al. Effects of neodymium on the activity of the nitrogen metabolism related enzyme in seedless watermelon leaves[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32 (6): 1072-1078.)

[21] Burkey K O, Wells R. Response of soybean photosynthesis and chloroplast membrane function to canopy development and mutual shading[J]. Plant Physiology, 1991, 97: 245-252.

[22] 张玉平, 刘强, 荣湘民, 等. 不同水稻品种(组合)碳代谢关键酶活性比较[J]. 中国稻米, 2007(4):15-19. (Zhang Y P, Liu Q, Rong X M, et al. Comparison of key enzyme activities of carbon metabolism in different rice varieties (combinations) [J]. China Rice, 2007(4):15-19.)

[23] Liang C J, Zhang G S, Zhou Q. Effect of cerium on photosynthetic pigments and photo chemical reaction activity in soybean seedling under ultraviolet-B radiation stress[J]. Biological Trace Element Research, 2011, 142(3):796-806.

[24] Challaraj E S, Emmanuel B, Anandkumar M, et al. Efficacy of rare earth elements on the physiological and biochemical characteristics of *Zea mays* L [J]. Australian Journal of Crop Science, 2010, 4(4): 289-294.

[25] Specht J E, Hume D J, Kumudini S V. Soybean yield potential a-gented and physiological perspective [J]. Crop Science, 1999, 39:1560-1570.

[26] Saratha K D, Kumudini S, Hume D J. Genetic improvement in short season soybeans in dry matter accumulation partitioning leaf area duration[J]. Crop Science, 2001, 41(2):141-145.

[27] 张万萍, 须海丽, 张燕, 等. 喷施稀土对黄瓜幼苗根系活力和矿质元素吸收的影响[J]. 山地农业生物学报, 2003, 22(6): 512-515. (Zhang W P, Xu H L, Zhang Y, et al. Effects of spraying rare-earth elements on root activity and main mineral elements of cucumber seedlings[J]. Journal of Mountain Agriculture & Biology, 2003,22(6):512-515.)

[28] 孙太靖, 龚振平, 马春梅. 大豆植株氮素积累与转运动态的研究[J]. 东北农业大学学报, 2004, 35(5):517-521. (Sun T J, Gong Z P, Ma C M. Study on accumulation and translocation of nitrogen in soybean plant [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2004, 35 (5):517-521.)

[29] 罗翔宇. 应用(15)N 示踪技术对大豆氮积累与分配规律的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2012:16-33. (Luo X Y. Application of (15) N tracer technique to nitrogen accumulation and distribution in soybean[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012:16-33.)