



噻苯隆对大豆籽粒建成和氮代谢生理指标的影响

何 瑞¹,王庆燕^{1,2},樊 琦¹,方淑梅²,梁喜龙^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院,黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江省植物生长调节剂工程技术研究中心,黑龙江 大庆 163319)

摘 要:为探究植物生长调节剂噻苯隆(Thidiazuron)对大豆籽粒建成及氮代谢的影响,本研究以大豆品种东农豆 252 为材料,在盆栽条件下,设置盛花期喷施不同浓度(0.2、1.0 和 5.0 mg·L⁻¹)噻苯隆处理,测定不同浓度处理下的大豆单株产量、籽粒形态、氮代谢关键酶活性、可溶性蛋白含量和氨基酸含量,并分析噻苯隆对大豆氮素代谢和籽粒建成的影响。结果表明:噻苯隆处理可显著提高大豆单株籽粒产量,0.2、1.0 和 5.0 mg·L⁻¹ 处理分别比对照显著提高 14.28%、14.89% 和 14.29%。噻苯隆处理对大豆单株产量的提高,一方面归因于单株荚数的增加;另一方面归因于粒重的提高,处理后 45 d,0.2、1.0 和 5.0 mg·L⁻¹ 处理籽粒干重分别比对照显著提高 11.15%、11.51% 和 10.08%。对于氮素代谢,0.2~1.0 mg·L⁻¹ 噻苯隆处理,一方面可提高大豆叶片氮代谢关键酶活性,促进籽粒形成前期(噻苯隆处理后 9~18 d)叶片可溶性蛋白和游离氨基酸的积累;另一方面可促进氮素由叶片向籽粒的转运,籽粒形成后期(处理后 36~45 d)大豆叶片游离氨基酸含量比对照显著降低;进而提高籽粒氮素代谢水平,籽粒氮素代谢关键酶活性提高,籽粒可溶性蛋白和游离氨基酸积累增加。综上,噻苯隆处理可以促进大豆叶片氮素代谢,强化氮素向籽粒的转运和积累,提高大豆籽粒干重,达到增产效果。其中 0.2~1.0 mg·L⁻¹ 浓度范围的噻苯隆处理效果较佳。

关键词:噻苯隆;大豆;籽粒建成;氮代谢;产量

Effects of Thidiazuron on Soybean Seeds Morphogenesis and Physiological Indexes of Nitrogen Metabolism

HE Rui¹, WANG Qing-yan^{1,2}, FAN Qi¹, FANG Shu-mei², LIANG Xi-long^{1,2}

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Heilongjiang Plant Growth Regulator Engineering Technology Research Center, Daqing 163319, China)

Abstract: To explore the effects of plant growth regulator thidiazuron on soybean seeds formation and nitrogen metabolism, the effects of plant growth regulator thidiazuron on soybean seeds formation and nitrogen metabolism were explored in this study. Soybean cultivar Dongnongdou 252 was used as the material. The different concentrations (0.2, 1.0 and 5.0 mg·L⁻¹) of thidiazuron were sprayed on the foliar surface under pot conditions. Soybean yield, seed shape, key enzyme activities of nitrogen metabolism, soluble protein content and amino acid content were measured. The results showed that thidiazuron treatment significantly increased the soybean seeds yield per plant, and the treatments of 0.2, 1.0 and 5.0 mg·L⁻¹ significantly increased by 14.28%, 14.89% and 14.29% compared with the control, respectively. The improvement of soybean yield per plant of thidiazuron treatment was attributed to the increase of the pods number per plant on the one hand, and the increase of seeds weight on the other hand. At 45 d after treatment, the dry weight of seeds in the treatments of 0.2, 1.0 and 5.0 mg·L⁻¹ increased significantly by 11.15%, 11.51% and 10.08%, respectively, compared with the control. In terms of nitrogen metabolism, thidiazuron treatment, especially 0.2–1.0 mg·L⁻¹ concentration treatments, on the one hand, improved the activity of key enzymes in nitrogen metabolism in soybean leaves and promoted the early stage of seeds formation (9–18 d after thidiazuron treatment), accumulation of soluble protein and free amino acids in leaves. On the other hand, the transfer of nitrogen from leaves to seeds was promoted, and the free amino acid content of soybean leaves at the later stage of seeds formation (36–45 d after treatment) was significantly lower than that of the control. In turn, the level of seed nitrogen metabolism was improved, the activity of key enzymes in seed nitrogen metabolism was increased, and the accumulation of seed soluble protein and free amino acids were increased. In conclusion, thidiazuron treatment can improve soybean leaf nitrogen metabolism, promote nitrogen transfer to seeds and accumulate, increase soybean seeds dry weight, and achieve the effect of yield increasing. Among them, the treatment effect of thidiazuron in the concentration range of 0.2–1.0 mg·L⁻¹ was the best.

Keywords: thidiazuron; soybean; seeds formation; nitrogen metabolism; yield

大豆既是重要的食用油和蛋白食品原料,也是重要的饲料蛋白来源,在我国工农业生产中占有重要地位^[1]。对于大豆的生长发育过程而言,氮代谢是其体内最基本的代谢过程之一,决定着大豆的生

收稿日期:2022-05-03

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0201004-6);黑龙江八一农垦大学研究生科研创新资助项目(YJSCX2021-Y43);黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA20B103-3)。

第一作者:何瑞(1997—),硕士研究生,主要从事植物化学调控研究。E-mail:1161743188@qq.com。

通讯作者:梁喜龙(1976—),教授,博导,主要从事植物化学调控研究。E-mail:xilongliang@126.com。

长发育状态,并影响其产量与品质^[2]。而在大豆的生殖生长阶段,籽粒内部的能量物质如氨基酸和糖转运合成速度加快,此阶段维持氮代谢的平衡能够促进大豆籽粒产量的增加和品质的提升^[3]。因此研究籽粒形成过程中的形态特征和氮代谢动态变化规律对于产量提升具有重要生产意义。

大豆可将环境中的硝态氮经硝酸还原酶和亚硝酸还原酶作用依次还原为亚硝态氮与氨态氮^[4],氨态氮再经过谷氨酰胺合成酶催化,与谷氨酸形成谷氨酰胺,谷氨酰胺在谷氨酸合成酶催化下与 α -酮戊二酸结合生成谷氨酸,进而被植株吸收利用^[5]。谷氨酸作为硝态氮同化的最终产物,用来合成生命活动所需的含氮有机化合物,是氮代谢的关键物质^[6]。在大豆籽粒发育过程中,氮素积累呈“S”型曲线变化,随着生长发育的进行,植株各器官全部吸收氮量的70%左右会转向籽粒当中,使荚皮和籽粒的氮素比重逐渐增大,其中叶片转移的氮量最多^[7]。前人研究表明大豆总粒重与氮素含量和氮素代谢的相关参数均呈现显著正相关性,尤其是在大豆的生长发育后期^[8]。

近年来,有关化控技术在大豆生产上的应用越来越受到重视,通过应用植物生长调节剂可以影响植物内源激素系统,进而调节植物的生长发育^[9]。植物生长调节剂噻苯隆(Thidiazuron)是一种苯脲类化合物,常用于棉铃的机械化收获,目前已成为许多植物组织培养中的高效形态发生植物生长调节剂^[10]。现有研究表明噻苯隆可以调节植物内源激素水平和各激素间的平衡关系,尽管其结构与生长素或嘌呤类细胞分裂素不同,但细胞内的许多生理生化反应都可受到噻苯隆的影响,包括改变细胞膜的形态、营养吸收和同化能力等^[11]。前人研究结果显示,在大豆籽粒建成过程中,植物生长调节剂可以促进籽粒内同化物的代谢水平,影响籽粒建成,但目前关于噻苯隆对大豆氮代谢的调控作用鲜有报道。本研究通过叶面喷施噻苯隆,探讨其对大豆籽粒形态建成和氮代谢的调控作用,进而为噻苯隆在大豆高产栽培中的推广应用及大豆相应氮代谢规律研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为东农豆252,该品种百粒重25 g左右,蛋白质含量42.47%,脂肪含量20.37%,生育期118 d左右,结荚习性为亚有限,由东北农业大学农学院提供;植物生长调节剂噻苯隆,购于四川润尔科技有限公司。

1.2 试验设计

试验于2020年在黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心实验场内进行。采用盆栽方式,盆栽所用白色塑料桶高43 cm,直径30 cm,桶底均钻5个直径为1 cm的小孔,种植基质为混合土(土:沙=3:1),每桶装土16 kg。于5月16日用自来水将盆土浇透,次日选取大小饱满、颜色健康且均匀一致的大豆种子8粒播种,然后覆盖2 kg相同土壤(覆土深度为3 cm),V1期定苗,每盆保苗4株。待大豆植株生长至盛花期(R2期),叶面喷施不同浓度的噻苯隆。设置3个叶面喷施浓度,分别为0.20 mg·L⁻¹(T1)、1.00 mg·L⁻¹(T2)和5.00 mg·L⁻¹(T3),对照喷施清水(T-CK),喷药时确保大豆植株的整株叶片均匀分布药剂,共设4个处理,每处理30桶,共120桶,并于喷药后在大豆植株自上向下的第三节完全展开的三出复叶上用细绳做标记,以此作为固定取样点进行取样,分析研究籽粒形态的动态变化。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 大豆籽粒形态 喷药后9,18,27,36和45 d进行取样,取用固定取样点的大豆20粒,测量籽粒鲜重,用精度为1 mm的游标卡尺测量籽粒的长、宽、高,将新鲜籽粒放于装有酒精的刻度试管中,上升高度表示为籽粒体积,并将籽粒于105℃烘箱中杀青30 min,然后于80℃烘干至恒重,测量籽粒干重。

1.3.2 氮代谢相关酶活性与产物 喷药后9,18,27,36和45 d进行取样,取样时间为晴天8:30—9:30,取固定取样点上籽粒和叶片速冻于液氮中并保存于-40℃冰箱。参照王小纯等^[12]方法测定大豆叶片及籽粒谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合成酶(GOGAT)活性及氨基酸含量,参照徐亚会等^[13]方法测定谷氨酸-丙酮酸转氨酶(GPT)活性,参照邹琦等^[14]方法测定硝酸还原酶(NR)活性,参照Bradford^[15]的考马斯亮蓝G-250法测定可溶性蛋白含量。

1.3.3 大豆单株产量及其构成因素 秋季收获时每个处理随机选择10株,测量单株荚数、单株粒数、单株粒重及百粒重。

1.4 数据分析

采用统计分析软件SPSS 20.0进行数据方差分析和显著性检验,并用Excel 2019进行图表处理。

2 结果与分析

2.1 噻苯隆对大豆单株产量及其构成因素的影响

由表1可知,T1~T3处理的单株荚数较T-CK分别增长了4.61%、4.98%和13.89%,且差异均达

到了显著水平,其中 T3 处理的单株荚数最高;T1 ~ T3 处理的单株粒数较 T-CK 分别增加了 5.66%、6.66%和 14.31%,其中 T3 处理与对照差异显著;T1 ~ T3 处理的单株粒重与 T-CK 相比分别增长了

14.28%、14.89%和 14.29%,均显著高于对照;与 CK 相比,T1 处理对大豆百粒重有显著的促进效果,T2 和 T3 处理高于对照,但差异不显著。

表 1 噻苯隆对大豆单株产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of thidiazuron on soybean plant yield and its constituent factors				
处理 Treatment	单株荚数 Pods number per plant	单株粒数 Seeds number per plant	单株粒重 Seeds weight per plant/g	百粒重 100-seed weight/g
T-CK	24.80 ± 3.68 b	53.30 ± 4.61 b	13.08 ± 2.21 b	25.27 ± 0.36 b
T1	26.00 ± 4.67 a	56.50 ± 3.61 ab	15.26 ± 2.67 a	26.84 ± 0.60 a
T2	26.10 ± 3.70 a	57.10 ± 3.86 ab	15.37 ± 2.84 a	25.86 ± 0.64 b
T3	28.80 ± 4.47 a	62.20 ± 4.21 a	15.26 ± 1.59 a	25.34 ± 0.38 b

注:同列不同小写字母代表 0.05 水平差异显著,下同。
Note:Different lowercase in the same line indicate significant difference at 0.05 level, the same below.

2.2 噻苯隆对大豆籽粒建成的影响

2.2.1 籽粒形态 如表 2 所示,在喷施噻苯隆处理后籽粒的长、宽、厚度较 T-CK 均不同程度提升,表现为籽粒体积增大。籽粒长度,T2 处理 27,36,45 d 较 T-CK 分别增长了 8.48%、8.22%和 4.44%,差异达到显著水平;喷药处理后,籽粒宽度在生育后期同样显著增长,其中 T2、T3 处理在 45 d 较 T-CK 分

别增长了 3.10%和 2.45%,且差异显著;各处理的籽粒厚度在 36 d 与 T-CK 相比,分别明显增长 4.42%、3.10%和 2.95%,在 45 d 时的增长幅度为 1.45%~3.36%,其中 T1 和 T3 处理达到显著差异水平;各处理与 T-CK 相比,籽粒体积分别增长 7.14%、13.33%和 14.51%,达到显著差异水平,说明噻苯隆处理能够促进籽粒体积增长。

表 2 噻苯隆对大豆籽粒形态的影响

Table 2 Effects of thidiazuron on soybean seed morphology					
籽粒形态指标 Seed shape index	处理 Treatment	处理时间 Treatment time			
		18 d	27 d	36 d	45 d
长度 Length/mm	T-CK	4.941 ± 0.512 a	6.691 ± 0.882 b	10.163 ± 0.756 b	13.340 ± 0.611 b
	T1	5.312 ± 0.420 a	7.261 ± 0.503 ab	10.764 ± 0.620 ab	13.675 ± 0.612 ab
	T2	5.564 ± 0.451 a	7.316 ± 0.260 a	11.071 ± 0.533 a	13.963 ± 0.486 a
	T3	5.065 ± 0.627 a	7.167 ± 0.371 ab	10.512 ± 0.323 ab	13.687 ± 0.263 ab
宽度 Width/mm	T-CK	3.502 ± 0.481 a	4.513 ± 0.324 a	7.489 ± 0.242 a	8.763 ± 0.341 b
	T1	2.629 ± 0.352 b	4.951 ± 0.341 a	7.563 ± 0.303 a	8.892 ± 0.380 ab
	T2	3.312 ± 0.449 a	4.952 ± 0.278 a	7.648 ± 0.292 a	9.041 ± 0.165 a
	T3	3.068 ± 0.347 ab	4.950 ± 0.334 a	7.452 ± 0.315 a	8.982 ± 0.194 a
厚度 Thickness/mm	T-CK	1.883 ± 0.481 a	2.366 ± 0.312 b	6.262 ± 0.140 b	7.472 ± 0.311 b
	T1	1.838 ± 0.352 a	2.593 ± 0.343 ab	6.557 ± 0.154 a	7.656 ± 0.434 a
	T2	2.091 ± 0.456 a	2.837 ± 0.270 a	6.469 ± 0.183 a	7.580 ± 0.178 ab
	T3	1.945 ± 0.357 a	2.652 ± 0.331 ab	6.453 ± 0.146 a	7.734 ± 0.236 a
体积 Volume/mL	T-CK	0.050 ± 0.001 a	0.100 ± 0.020 a	0.430 ± 0.020 a	0.520 ± 0.030 b
	T1	0.050 ± 0.001 a	0.100 ± 0.020 a	0.450 ± 0.020 a	0.560 ± 0.030 a
	T2	0.050 ± 0.001 a	0.100 ± 0.020 a	0.455 ± 0.020 a	0.600 ± 0.030 a
	T3	0.050 ± 0.001 a	0.100 ± 0.020 a	0.450 ± 0.020 a	0.555 ± 0.030 a

2.2.2 粒重 在籽粒的形成过程中,其形态与质量的变化趋势常呈“S”型曲线,在籽粒建成初期与末期生长缓慢,在中期营养物质的转化与积累迅速。如表 3 所示,籽粒在建成过程中其鲜重与干重的变化呈相同的趋势,在形成初期(处理 18 d),各噻苯隆浓度处理间差异不显著,处理 45 d,籽粒的鲜重与

干重进一步提高。T1 ~ T3 处理籽粒鲜重与 T-CK 相比分别增长了 4.58%、6.39%和 6.39%,达到显著差异水平;同一处理时间下干重变化趋势与其相同,处理 45 d,籽粒干重明显增长,T1 ~ T3 处理分别增长了 11.15%、11.51%和 10.08%。由此可以看出,叶面喷施噻苯隆可促进籽粒干物质积累。

表 3 噻苯隆对大豆籽粒重量的影响
Table 3 Effects of thidiazuron on soybean seed weight

籽粒形态指标 Seed shape index	处理 Treatment	处理时间 Treatment time			
		18 d	27 d	36 d	45 d
鲜重 Fresh weight/g	T-CK	0.010 ± 0.001 a	0.053 ± 0.015 b	0.321 ± 0.064 b	0.546 ± 0.600 b
	T1	0.010 ± 0.001 a	0.068 ± 0.016 ab	0.361 ± 0.034 ab	0.575 ± 0.610 a
	T2	0.010 ± 0.001 a	0.078 ± 0.015 a	0.382 ± 0.031 a	0.585 ± 0.480 a
	T3	0.010 ± 0.001 a	0.069 ± 0.015 ab	0.353 ± 0.025 ab	0.580 ± 0.360 a
干重 Dry weight/g	T-CK	0.005 ± 0.000 a	0.015 ± 0.001 a	0.096 ± 0.019 b	0.221 ± 0.026 b
	T1	0.005 ± 0.000 a	0.015 ± 0.001 a	0.106 ± 0.018 a	0.246 ± 0.023 a
	T2	0.005 ± 0.000 a	0.016 ± 0.001 a	0.108 ± 0.018 a	0.252 ± 0.013 a
	T3	0.005 ± 0.000 a	0.015 ± 0.001 a	0.101 ± 0.013 ab	0.249 ± 0.019 a

2.3 噻苯隆对大豆叶片氮素代谢的影响

2.3.1 关键酶活性 大豆能够将环境中的硝态氮经硝酸还原酶还原为亚硝态氮,再经亚硝酸还原酶还原成氨态氮,由图 1A 可知,叶片 NR 活性整体呈先上升后下降的趋势,在 9 和 27 d 时,各处理 NR 活性相较于对照分别增长了 3.84%、6.80%、6.06% 和 5.18%、6.11%、1.63%。

GS 能够催化氨态氮与谷氨酸形成谷氨酰胺,如图 1B 所示,叶片 GS 活性随喷药处理时间的推进呈先升高再降低的趋势,噻苯隆对大豆叶片 GS 活性调控主要表现在生育前期,在处理 9 d 时 T1~T3 处理与 T-CK 相比 GS 活性分别提高了 5.83%、11.49% 和 4.22%,其中 T2 处理差异显著,在 18 d 时 T1~T3 处理与 T-CK 分别增长了 4.91%、5.65% 和 4.16%,T1、T2 处理与对照均差异显著。

谷氨酰胺在 GOGAT 催化下与 α-酮戊二酸结合生成谷氨酸,进而被植株所吸收利用,如图 1C 所示,叶片 GOGAT 活性整体呈先上升后下降的趋势,噻苯隆对其活性调控发生在生育中期,在 18 d 时 T1、T2 处理与 T-CK 差异显著,且分别增长了 12.31% 和 9.24%,在 27 d 时 T1~T3 处理分别增长了 12.99%、9.74% 和 4.32%。

叶片 GPT 活性随喷药处理时间的推进呈现逐渐下降趋势,噻苯隆对 GPT 活性的调控主要发生在生育前中期,在喷药处理后 9、18、27 d,T1、T2 处理与 T-CK 相比均差异显著,分别增长了 8.89%、13.34%、7.82%、10.16% 和 6.59%、10.37%。与对照相比,喷施噻苯隆促进了功能叶片中铵根离子同化,进而使合成氨基酸所需的 GS、GOGAT 以及 GPT 酶活性被显著促进,进而提升了氮代谢能力(图 1D)。

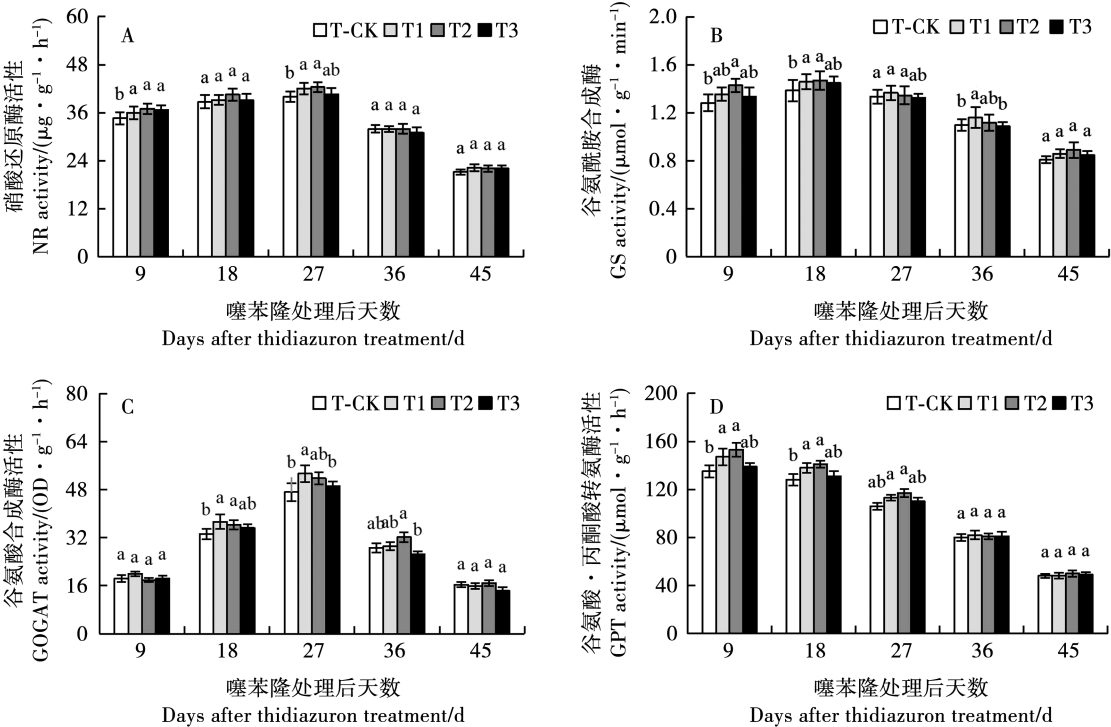


图 1 噻苯隆对大豆叶片氮素代谢关键酶活性的影响
Fig.1 Effects of thidiazuron on the activity of key enzymes of nitrogen metabolism in soybean leaves

2.3.2 叶片可溶性蛋白和游离氨基酸含量 由图 2A 可知,大豆叶片的可溶性蛋白含量随着喷药处理时间的推进呈现下降趋势,在喷药后 18 和 45 d,与 T-CK 相比,T1、T2 处理的作用效果达到显著差异,喷药后 18 d 分别提高了 9.34% 和 8.41%,喷药后 45 d 分别提高了 4.45% 和 4.27%。由图 2B 可知,各处理叶片的氨基酸含量均在 27 d 时达到最高并

随后下降。在喷药后 9 和 18 d,与 T-CK 相比,各处理分别提高了 10.71%、11.50%、13.04%、8.57% 和 7.76%、6.84%,达到显著差异水平;T1、T2 处理与 T-CK 相比处理 36 d,氨基酸含量分别降低了 5.38% 和 6.92%,处理 45 d 分别降低 11.11% 和 8.89%,且差异显著。说明在大豆生育后期,T1、T2 处理加快了叶片内氨基酸的转化与分解。

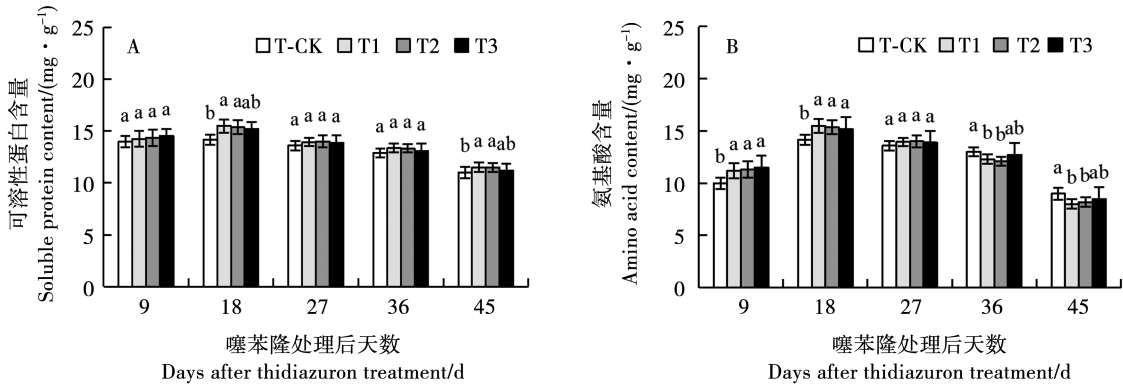


图 2 噻苯隆对大豆叶片可溶性蛋白和游离氨基酸含量的影响

Fig. 2 Effects of thidiazuron on soluble protein and free amino acids in soybean leaves

2.4 噻苯隆对大豆籽粒氮素代谢的影响

2.4.1 氮素代谢关键酶活性 由图 3A 可知,籽粒内 NR 活性与叶片相比较低,其随处理时间延长而逐渐升高并在生育末期下降。与 T-CK 相比,叶面喷施噻苯隆能使籽粒内部 NR 活性维持在较高水平,在处理后 18,27 和 36 d 分别增长了 15.89% ~ 73.16%、11.09% ~ 29.30% 和 4.2% ~ 11.11%,其中 T2 处理差异显著。籽粒内 GS 活性整体变化平缓,在喷药后 18 和 27 d 时 T2 处理与 T-CK 相比分别提升了 7.22% 和 7.53%,达到显著差异水平

(图 3B)。籽粒内 GOGAT 活性随处理时间推进呈下降趋势,各处理较 T-CK 在 18 d 分别增长了 14.42%、9.13% 和 15.41%,有显著性差异(图 3C)。由图 3D 可知,籽粒 GPT 活性在生育中期达到最高后随生育时间延长逐渐下降,籽粒内 GPT 活性对噻苯隆的响应发生在处理后 18 d,T1、T2、T3 处理较 T-CK 分别增长了 14.34%、14.34% 和 7.19%,其中 T1、T2 处理差异显著。结果说明噻苯隆处理使籽粒氮素代谢关键酶活性提高,进而提高了籽粒氮素代谢水平。

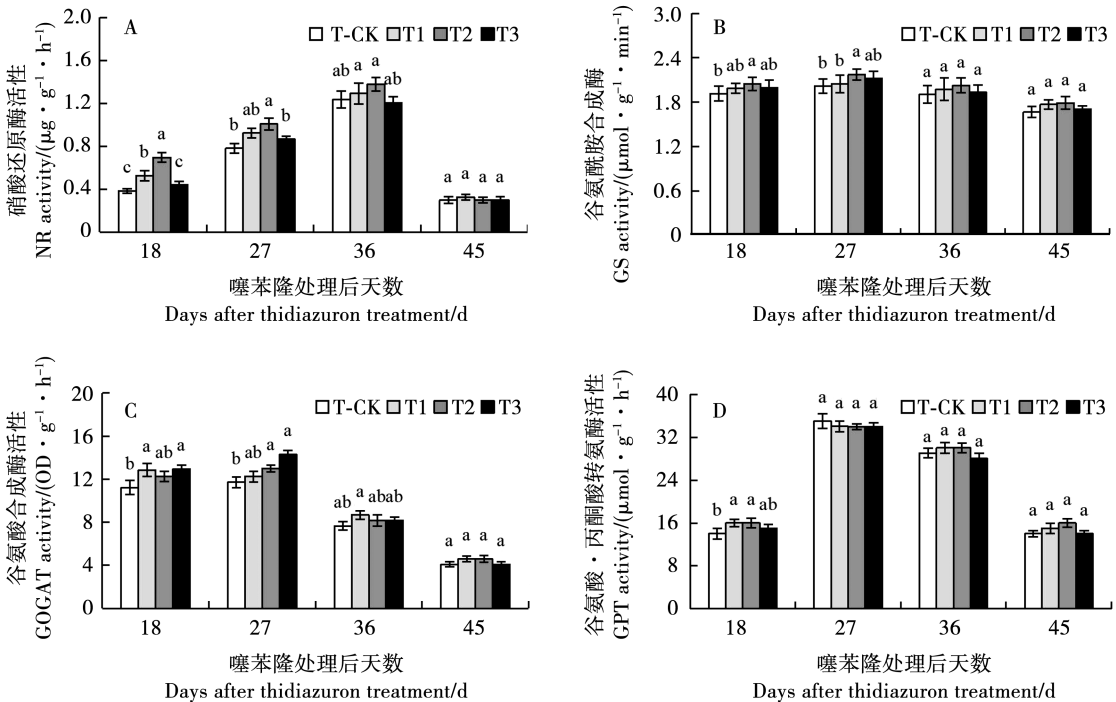


图 3 噻苯隆对大豆籽粒氮素代谢关键酶活性的影响

Fig. 3 Effects of thidiazuron on the activity of key enzymes of nitrogen metabolism in soybean seeds

2.4.2 可溶性蛋白和游离氨基酸含量 如图4A所示,籽粒内可溶性蛋白变化趋势平稳,噻苯隆对籽粒的调控主要发生在18,27和36 d,在18 d时T1处理较T-CK增长了10.80%,达到显著差异水平,在27和36 d时T1、T2处理有显著差异,处理27 d分别增长了10.29%和12.31%,处理36 d分别增

长了2.43%和3.31%。籽粒内氨基酸含量,27 d时,T1、T2处理较T-CK增长了10.96%和9.32%,达到显著差异,在36 d、45 d时T1、T2处理有显著差异,处理36 d分别增长了7.17%和6.81%,处理45 d分别增长了9.01%和8.18%(图4B)。T1、T2处理下籽粒可溶性蛋白和游离氨基酸积累增加。

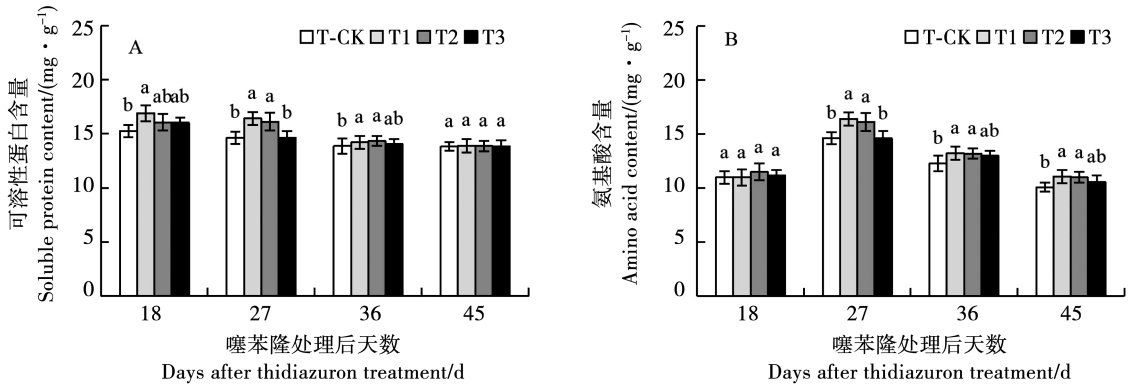


图4 噻苯隆对大豆籽粒可溶性蛋白和游离氨基酸含量的影响
Fig.4 Effects of thidiazuron on soluble protein and free amino acids in soybean seeds

3 讨论

植物体不能直接吸收利用从土壤中获得无机氮,无机氮需要通过一系列转化作用才能被植物吸收,NR 作为氮代谢调控的限速酶,其活性强弱对氮代谢水平起关键调控作用,有研究表明大豆叶片中 NR 的活性与硝态氮的含量呈正相关^[16]。本研究经噻苯隆处理后,NR 活性在前中期显著提升,这是大豆籽粒形成的关键阶段,需要合成大量含氮化合物,在此阶段叶片和籽粒 GS 活性同样显著提升,由于 GS 也是植物氮代谢的关键酶,所有氮化合物几乎都通过 GS 的调节才能进入其他氮代谢途径。鼓粒期大豆籽粒对氮素需求不断增大,是产量形成的重要时期,氮代谢 GS 活性不断增强,有利于籽粒干物质的积累。GS 活性的强弱在一定程度上是氮素同化能力的反映,而 GOGAT 活性则在一定程度上反映蛋白质的合成能力^[17],二者协同作用完成氮的同化。陈丽华等^[18]研究认为,大豆叶片中蛋白质含量在始花期后呈下降趋势,其中茎和荚皮随生育期的推进,蛋白质含量逐渐下降,籽粒充实后期蛋白质则逐渐积累,本研究中蛋白含量变化也表现出相同规律。在使用植物生长调节剂噻苯隆处理后 GOGAT 与 GPT 活性显著提升,在二者共同作用下氨基酸的合成加快并被植物吸收利用。

氮代谢对大豆的氮素积累和转移有重要作用,品质形成同样受其影响,王华美^[19]研究发现,随生育进程的推进,除籽粒氮素积累呈不断上升趋势外,其他大豆植株各器官均呈现下降趋势,且叶片中的氮素积累量始终高于茎秆和叶柄,结荚至鼓粒

期的氮素吸收速率最高^[20]。杜艳丽等^[8]研究认为随着大豆生殖生长进程的推进,叶片中的氮含量随生育进程的推进呈现降低趋势,这可能与叶片中的氮素被大量转运到籽粒中,以满足大豆籽粒生长和发育需求有关。在双子叶作物的叶片衰老过程中,叶片以氨基酸为主要氮源,通过韧皮部的装载、运输和卸载系统转运到籽粒,用于种子的蛋白质储存和次生代谢^[21]。本研究在籽粒充实过程中,叶片氨基酸含量在处理36和45 d时大幅度下降,同时T1、T2处理与T-CK相比叶片氨基酸含量显著降低,籽粒内含量显著升高,原因是在植株衰老过程中叶片成为了新的氮源,氨基酸向籽粒内部转运,而噻苯隆可能加快了其转运速度,所以氮代谢相关酶活性在噻苯隆的调控作用下均有所提升,使籽粒内部氮素同化进程加快,营养物质积累增加。

噻苯隆被归为细胞分裂素类调节剂,是因为它能诱导天然的细胞分裂素样反应,另外内源生长素、乙烯和 ABA 浓度在噻苯隆处理后也出现增长^[22],植物籽粒建成中激素的调控较为复杂,但细胞分裂素却广泛参与籽粒建成的胚胎早期发育、细胞分化、胚乳发育及籽粒充实等过程^[23]。刘晓双等^[24]发现噻苯隆-乙烯利复配剂可以增加灌浆后期春玉米籽粒中 IAA 和 GA 含量,降低 ABA 和 CTK 含量,调节激素比例。噻苯隆在功能上可能通过调节内源植物生长激素直接或间接调节植物生长,张睿^[25]通过外源施用细胞分裂素观察其对平邑甜茶幼苗生长和氮代谢的影响,发现氮代谢相关酶活性在处理后有显著上升,氮代谢产物含量增长。本研究表明噻苯隆能够调控大豆氮代谢相关酶活性,原

因可能是噻苯隆表现出细胞分裂素能力,从而调节大豆内源激素含量及各激素间的平衡关系。细胞分裂素是一类能促进胞质分裂的物质,在细胞生长、分化及其他相关生理活动过程中,合理使用细胞分裂素可以调节大豆生长发育,促进大豆籽粒建成^[26],并提高叶片碳氮代谢能力^[27]。同样细胞分裂素对果实的生长发育有重要的调控作用^[28],苹果树在外源施加细胞分裂素后,果实的体积增大,但苹果形状未发生改变,对梨树进行同样的处理也获得相同的试验结果^[29]。本研究中籽粒受噻苯隆调节剂调节后形态发生变化,并且单株荚数显著增长,这可能与噻苯隆发挥的细胞分裂素功能有关。

噻苯隆目前主要的应用是促进棉花落叶,或与其他调节剂复配提高坐果率、改善品质,而噻苯隆诱导植物细胞分裂的作用是其他细胞分裂素类调节剂的100倍,与目前在农业上常用的调节剂相比,它的使用效果表现微量而高效。本研究解析了噻苯隆对大豆生育过程中的籽粒形态、氮代谢和产量表现,为噻苯隆在大豆优质高效生产中的科学利用及广泛推广提供重要基础与理论依据。

4 结论

叶面喷施噻苯隆可以调控大豆生殖生长期氮代谢相关酶活性,促进氮素转化和籽粒干物质积累,使籽粒体积增大、干重提高,从而增强植株源库协调供应能力,具体表现为叶片和籽粒中NR、GS、GOGAT、GPT这4种氮代谢关键酶活性均显著提升,蛋白质与氨基酸含量升高,单株荚数与产量显著提高,其中噻苯隆喷施的最优浓度为0.20~1.00 mg·L⁻¹。

参考文献

[1] 赵勇, 司伟, 田国强, 等. 大豆生产及市场动态监测报告[J]. 大豆科技, 2018(4): 12-21. (ZHAO Y, SI W, TIAN G Q, et al. Soybean production and market dynamic monitoring report [J]. Soybean Science and Technology, 2018(4): 12-21.)

[2] SAITO A, TANABATA S. Effect of nitrate on nodule and root growth of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2014, 15(3): 4464-4480.

[3] WEI S, WANG X, SHI D, et al. The mechanisms of low nitrogen induced weakened photosynthesis in summer maize (*Zea mays* L.) under field conditions [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 20(105): 118-128.

[4] 崔毅, 蒋尚明, 金菊良, 等. 基于水分亏缺试验的大豆旱灾损失敏感性评估[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 50-61. (CUI Y, JIANG S M, JIN J L, et al. Assessment of drought loss sensitivity of soybean based on water deficit test [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 36(11): 50-61.)

[5] 董守坤. 大豆吸收利用氮素规律及相关酶活性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008. (DONG S K. Study on the law of

soybean absorption and utilization of nitrogen and related enzyme activities [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008.)

[6] RANATHUNGE K, EL-KEREAMY A, GIDDA S, et al. AMT11 transgenic rice plants with enhanced NH₄⁺ permeability show superior growth and higher yield under optimal and suboptimal NH₄⁺ conditions [J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(4): 965-979.

[7] 姚玉波, 张树权, 柴永山, 等. 不同生育期大豆品种氮素积累特性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 169-175. (YAO Y B, ZHANG S Q, CHAI Y S, et al. Nitrogen accumulation characteristics of soybean varieties at different growth stages [J]. China Soil and Fertilizer, 2021(5): 169-175.)

[8] 杜艳丽. 水分胁迫对大豆生长和籽粒性状的影响机制研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. (DU Y L. Effects of water stress on growth and grain traits of soybean [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.)

[9] ANKET SHARMA, BINGSONG ZHENG. Molecular responses during plant grafting and its regulation by auxins, cytokinins, and gibberellins [J]. Biomolecules, 2019, 9(9): 397.

[10] GUPTA S, MAO A A, SARMA S. Effects of Thidiazuron (TDZ) on direct shoot organogenesis of *Gymnocladus assamica*: A threatened and critically endangered species from northeast India [J]. National Academy Science Letters, 2019, 43(1): 85-91.

[11] PASA M S, SILVA C P, CARRA B, et al. Thidiazuron (TDZ) increases fruit set and yield of ‘Hosui’ and ‘Packham’s Triumph’ pear trees [J]. Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 2017, 89(4): 3103-3110.

[12] 王小纯, 熊淑萍, 马新明, 等. 不同形态氮素对专用型小麦花后氮代谢关键酶活性及子粒蛋白质含量的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 802-807. (WANG X C, XIONG S P, MA X M, et al. Effects of different nitrogen forms on key enzyme activities of nitrogen metabolism and grain protein content in wheat [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 802-807.)

[13] 徐亚会, 董守坤, 李雪凝, 等. 干旱胁迫对春大豆氮代谢关键酶活性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(1): 164-170. (XU Y H, DONG S K, LI X N, et al. Effects of drought stress on the activities of key enzymes in nitrogen metabolism in spring soybean [J]. Chinese Journal of Nuclear Agronomy, 2016, 30(1): 164-170.)

[14] 邹琦. 植物生理生化实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995. (ZOU Q. Plant physiological and biochemical experiment guide [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995.)

[15] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1): 248-254.

[16] 王华美, 任春元, 金喜军, 等. 外源褪黑素对高氮下大豆氮代谢及生长发育的影响[J]. 中国油料作物学报, 2021, 43(5): 872-882. (WANG H M, REN C Y, JIN X J, et al. Effects of exogenous melatonin on nitrogen metabolism and growth and development of soybean under high nitrogen [J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2021, 43(5): 872-882.)

[17] 刘业丽, 刘丽君, 栾怀海, 等. 不同基因型大豆GS活性动态规律研究[J]. 黑龙江农业科学, 2011, 10(12): 10-13. (LIU Y L, LIU L J, LUAN H H, et al. Dynamics of GS activity in different genotypes of soybean [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2011, 10(12): 10-13.)

[18] 陈丽华, 李杰, 刘丽君, 等. 大豆蛋白质的积累动态及其与产质量形成的关系[J]. 东北农业大学学报, 2002, 10(2): 116-124. (CHEN L H, LI J, LIU L J, et al. Protein accumulation dynamics and its relationship with yield and quality formation of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2002, 10(2): 116-124.)

[19] 王华美. 不同氮水平下外源褪黑素对大豆生长及氮同化能力的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021. (WANG H M. Effects of exogenous melatonin on soybean growth and nitrogen assimilation ability under different nitrogen levels[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021.)

[20] ZHOU W G, CHEN F, ZHAO S H, et al. DA-6 promotes germination and seedling establishment from aged soybean seeds by mediating fatty acid metabolism and glycometabolism[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(1): 101-114.

[21] 符小文, 徐文修, 李亚杰, 等. 施氮量对夏大豆干物质积累、转运规律及产量的影响[J]. 国农学通报, 2019, 35(35): 79-86. (FU X W, XU W X, LI Y J, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation, transport law and yield of summer soybean[J]. Bulletin of National Agronomy, 2019, 35(35): 79-86.)

[22] FANG S, GAO K, HU W, et al. Foliar and seed application of plant growth regulators affects cotton yield by altering leaf physiology and floral bud carbohydrate accumulation[J]. Field Crops Research, 2019, 2(31): 105-114.

[23] 梁喜龙, 邱凯华, 何瑞, 等. 植物籽粒建成的调控与细胞分裂素[J]. 植物生理学报, 2020, 56(4): 635-642. (LIANG X L, QIU K H, HE R, et al. The regulation of plant grain formation and cytokinins[J]. Chinese Journal of Plant Physiology, 2020, 56(4): 635-642.)

[24] 刘晓双, 顾万荣, 朴琳, 等. 噻苯隆-乙烯利复配对春玉米籽粒灌浆特性的影响及其激素调控机理[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3526-3534. (LIU X S, GU W R, PU L, et al. Thidiazuron-ethephon pairing effect on grain filling characteristics of spring maize and its hormone regulation mechanism[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(12): 3526-3534.)

[25] 张睿. 局部施氮和根施 6-BA 对平邑甜茶幼苗生长及氮代谢的调控[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. (ZHANG R. Regulation of local nitrogen application and root application of 6-BA on the growth and nitrogen metabolism of Pingyi sweet tea seedlings[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.)

[26] 肖郁绵. 植物生长调节剂对换锦花等石蒜属植物小鳞茎发育影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (XIAO Y M. Research on the effect of plant growth regulators on the development of small bulbs of *Lycoris genus* such as Huajinhua[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.)

[27] 李彦生. 菜用大豆食用品质形成及调控研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013. (LI Y S. Research on the formation and regulation of edible quality of vegetable soybean[D]. Harbin: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology), 2013.)

[28] 李小艳, 许晖, 朱同生, 等. 细胞分裂素对玉米产量性状的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 219-223. (LI X Y, XU H, ZHU T S, et al. Effects of cytokinins on corn yield traits[J]. China Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(36): 219-223.)

[29] 陈洁. 细胞分裂素对植物生长发育的影响[J]. 现代园艺, 2012(14): 14. (CHEN J. Effects of cytokinins on plant growth and development[J]. Modern Horticulture, 2012(14): 14.)

《大豆科学》正式加入 OSID 开放科学计划

《大豆科学》于 2019 年 8 月 1 日起正式加入 OSID(Open Science Identity)开放科学标识计划。将通过在文章上添加开放科学二维标识码(OSID 码),为读者和作者提供一个与业界同行和专家学术交流的平台,同时提供一系列增值服务,提升论文的科研诚信。

读者可以通过微信扫描论文的 OSID 码,在手机上听论文作者的语音介绍,可以看到论文的重点彩图和实验视频,也可直接与作者进行一对一的交流、关注作者的研究动向等。这些功能有助于读者深入了解该研究的实际状况与实现过程。

作者可以通过专属的 OSID 码对所著论文添加语音,介绍写作背景、动机、趣事以及研究灵感。添加无法在传统印刷出版展示的附加说明,以便更好地展现研究成果,拓展论文的传播方式。同时,通过 OSID 平台每位作者都能拥有所著论文的学术圈和问答,与读者进行交流互动。此外,作者还可以在学术圈发布感兴趣的话题、最新的研究观点、问题征集、学术推荐等,扩大作者自身的影响力,增强与读者的联系。