

烯效唑对苗期低温胁迫下红小豆产量及茎部抗逆生理指标的影响

李 琬,项洪涛,何 宁,王雪扬,王彤彤,王曼力,唐晓东,李一丹

(黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所,黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要:以耐冷性不同的 2 个红小豆(*Vigna angularis*)品种宝清红(耐冷型)和天津红(冷敏型)为材料,盆栽条件下于苗期在人工气候室进行低温(15℃,分别持续 1、2、3、4、5 d)及喷施烯效唑(S₃₃₀₇)处理,研究苗期低温胁迫下烯效唑对红小豆产量和茎部逆境生理指标的影响。结果表明:幼苗期低温引起红小豆茎部 SOD 活性提高,宝清红在处理第 2 天达到最高,较 CK(室外常温)高 15.35%;而天津红在处理第 3 天时达到最高,较 CK 高 20.73%。POD 和 CAT 活性也有所提高,处理 3 d 时酶活性最高,与 CK 相比较,宝清红和天津红分别提高了 75.31%和 4.55%、63.50%和 22.22%。低温处理也导致红小豆植株茎部 MDA 含量增加,低温处理 5d 后,天津红和宝清红茎部 MDA 含量分别达到 0.052 μmol·g⁻¹和 0.053 μmol·g⁻¹,与处理 1d 相比,增加了 0.033 μmol·g⁻¹和 0.027 μmol·g⁻¹,分别提高了 1.74 倍和 1.04 倍。低温处理 5 d,宝清红和天津红的产量分别下降了 19.39%和 41.69%。S₃₃₀₇具有抵御低温的作用,能有效增加红小豆植株茎部可溶性蛋白含量,宝清红和天津红都是在处理 3 d 时含量达到最高,与喷施清水相比,分别提高了 3.45%和 3.74%;S₃₃₀₇显著降低 MDA 含量,处理 5 d 时,与喷施清水相比,宝清红和天津红分别下降了 4.25%和 4.55%;同时显著提高 POD 活性,宝清红和天津红都是在处理 3d 时活性达到最高,与喷施清水相比,分别提高了 3.52%和 11.16%。低温处理 5 d,喷施 S₃₃₀₇提高宝清红和天津红的产量,提高幅度分别为 23.06%和 43.88%。综上,低温胁迫下,不同品种红小豆茎部逆境生理响应存在显著差异;喷施 S₃₃₀₇能够缓解低温胁迫对红小豆的伤害。

关键词:低温胁迫;烯效唑;红小豆;茎部;逆境生理指标;产量

中图分类号:S521;Q945.78 **文献标志码:**A

Effects of uniconazole on yield and stem anti-stress physiology of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

LI Wan, XIANG Hongtao, HE Ning, WANG Xueyang, WANG Tongtong,
WANG Manli, TANG Xiaodong, LI Yidan

(Institute of Crop Cultivation and Tillage, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086, China)

Abstract: In order to investigate the resistance physiology and yield of different adzuki bean varieties and the mitigation effect of uniconazole under low temperature, a pot experiment resrch was conducted in artificial climate chamber. The crop cultivars included cold tolerant and cold sensitive, Baoqinghong and Tianjinhong. The treatment of low temperature (15℃) and spraying S₃₃₀₇ in seedling period of adzuki bean were applied. The lasting days of low temperature (15℃) in the experiment were 1, 2, 3, 4, 5 days, respectively. The purpose was to analyze the effect of uniconazole on the anti-stress physiological index and yield of adzuki bean against low temperature. The result showed that the physiological indexes in stem of adzuki bean under low temperature were changed during seedling stage, the SOD activities in stem of adzuki bean increased due to the low temperature stress during seedling stage, Baoqinghong increased 15.35% compare with CK at the 2d while Tianjinhong increased 20.73% at the 3 d. The activities of POD and CAT also increased, and the activities were the highest when treated for 3 days. Com-

pared with CK, the activities of POD and CAT of Baoqinghong and Tianjinhong increased by 75.31% and 4.55%, 63.50% and 22.22%, respectively. The content of MDA was also increased, and after 5 days of low temperature treatment, Tianjinhong and Baoqing reached $0.052 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.053 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Compared with treated 1 day, it increased $0.033 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.027 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, that is, 1.74 times and 1.04 times, respectively. When the stress lasted 5 d, the yield of Baoqinghong and Tianjinhong decreased by 19.39% and 41.69%. Uniconazole had the effect of enhancing low temperatures and reducing crop damage. It effectively increased the content of soluble proteins, and the content in Baoqinghong and Tianjinhong reached the highest when treated for 3 days, Compared with water, it increased by 3.45% and 3.74%, and it significantly reduced the MDA content. When treated for 5 d, compared with spraying water, MDA in Baoqinghong and Tianjinhong decreased by 4.25% and 4.55%, respectively. Meanwhile, POD activity significantly improved. Both of Baoqinghong and Tianjinhong reached the highest at 3 d, which were 3.52% and 11.16% higher than that of spraying water treatment, respectively. Spraying uniconazole increased the yield of Baoqinghong and Tianjinhong by 23.06% and 43.88%, respectively. This study concluded that there were significant differences in physiological responses between different adzuki bean varieties, and spraying uniconazole can effectively mitigate damage of low temperature stress on adzuki bean.

Keywords: low temperature stress; uniconazole; adzuki bean; stem; stress physiological index; yield

温度是作物生长的重要环境条件,每种植物都有其独特的最佳生育温度,低于该温度被认为是一种胁迫^[1]。在各种非生物胁迫中,低温是制约植物生长发育和作物产量的主要环境因素之一^[2]。低温在植物生长全过程中均可发生,是严重影响农业生产的主要自然灾害,尤其在种子萌发和幼苗建植期^[3]。低温影响植物生长和代谢,使植株体内活性氧(ROS)自由基大量积累,自由基的累积会诱发植株体内相应的抗氧化酶系统反应^[4],激活植物体内的防御机制,通过调节自身的生理代谢以增强对低温的耐受性^[1]。但是未被及时清除的 ROS 积累在植物体内,会加剧植物细胞膜脂过氧化伤害,并对细胞膜系统产生损害^[4],干扰作物的生理生化过程,最终影响作物产量和品质^[5]。

施用植物生长调节剂是缓解作物非生物胁迫重要措施之一^[6],相关研究表明:多效唑能够提高金属胁迫下大豆抗氧化酶活性,并显著降低丙二醛(MDA)含量,缓解重金属胁迫对膜系统的氧化损伤^[7];油菜素内酯(BR)能够缓解大豆幼苗在干旱条件下所遭受的氧化伤害,增加抗旱性^[8];外源脱落酸(ABA)能够显著提高涝渍条件下小麦叶片内保护酶活性,并显著降低 MDA 含量和相对外渗电导率,提高耐涝性^[9];6-苄基腺嘌呤(6-BA)可以缓解盐胁迫对老芒麦草幼苗的伤害,提高耐盐性^[10];茉莉酸甲酯(MeJA)在一定程度上能缓解高温高湿对紫苏造成的氧化损伤^[11]。

烯效唑(Uniconazole) S_{3307} 是一种经实践证明有效的植物生长延缓剂^[12],具有提高产量和品质的作用,常被应用在调控作物生长和发育、增强抗逆性

等方面^[13]。逆境条件下, S_{3307} 可有效增强作物的抗氧化酶活性,进而提高抗逆性和产量^[14];曲亚英等^[15]研究得出 S_{3307} 浸种可显著增强低温下甜椒幼苗的可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量,降低膜脂过氧化程度;郑春芳等^[16]得出 S_{3307} 能显著提高低温胁迫下 SOD 和 POD 活性,进而提高作物的抗逆能力,减少低温对细胞的伤害,从而提高幼苗的抗冷性。姜英等^[17]研究得出低温条件下,烯效唑灌根处理能提高苗木木质膜相对透性,并正向调控叶绿素荧光参数 Fv/Fm 的变化幅度,有助于提高苗木的抗寒能力。

红小豆(*Vigna angularis*),又名红豆、赤小豆、小豆等,是豆科豇豆属一年生草本植物,属药食兼用作物。红小豆对环境的适应性很强,在瘠薄地、盐碱地、干旱地均可生长,是喜光不耐冷、短日照作物,在东亚地区有较长的栽培历史^[18]。红小豆对温度条件较为敏感,最适生育温度是 $20 \sim 24^{\circ}\text{C}$ 。在生育进程中如果遭遇低温产生冷害,对产量会产生不同程度的损失。茎部是红小豆植株重要的营养器官,起到支撑和运输养分的重要作用,当红小豆受到低温胁迫时,茎的形态和生理代谢会受到较大影响,同化物通过韧皮部向下运输、无机养分通过木质部向上运输都会不同程度受阻,同时植株倒伏率提高,最终导致产量下降。因此本试验于幼苗期对红小豆进行低温处理,开展低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆植株茎部逆境生理及产量的影响研究,旨在分析 S_{3307} 对抵御低温胁迫的作用,丰富东北地区红小豆抗冷技术工程体系,为红小豆耐冷栽培、高产优质生产提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用宝清红和天津红为红小豆试验品种。宝清红为耐冷品种、天津红为冷敏品种。供试材料由国家食用豆产业技术体系栽培生理岗位实验室提供。

供试植物生长调节剂为烯效唑(S_{3307}),由黑龙江八一农垦大学化控研究中心提供。

1.2 试验设计与处理

试验于 2017、2018 年在黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所盆栽场及人工气候室内进行,由于 2017 年和 2018 年规律一致,本研究选用 2018 年数据。采用盆栽方式,试验用盆高 30 cm、直径 25 cm,每盆装自然风干土 7.0 kg,播种后覆土 200 g,每盆保苗 3 株。试验用土取自哈尔滨市道外区民主乡,土壤类型为草甸黑土。供试土壤的理化性质:土壤容重约为 $1.67\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,最大田间持水量约为 26.88%,有机质含量 $29.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、缓效钾 $341.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $151.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $49.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $149.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、土壤 pH 值 6.77。4 月 30 日播种,每品种分别播种 150 桶,选取长势均匀的样本进行试验,试验共设 6 个处理,每个处理设 3 次重复,具体设计见表 1。待植株生长至幼苗期时(5 月 13 日,此时真叶完全展开,第一片复叶露头)进行低温处理,处理温度为恒定 15°C 。进行低温处理当天上午 10:00 点,采取叶面喷施方式施用 S_{3307} ,使用浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,折合每 hm^2 用量为 225 L。喷施完毕后随即进入人工气候室内进行低温处理,持续时间分别是 1、2、3、4、5 d。本试验以室外常温为对照,2018 年 5 月 13 日到 5 月 18 日试验地区室外昼夜温度依次为: $26/16^{\circ}\text{C}$ 、 $26/20^{\circ}\text{C}$ 、 $27/18^{\circ}\text{C}$ 、 $21/12^{\circ}\text{C}$ 、 $22/12^{\circ}\text{C}$ 、 $24/15^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 取样方法 处理期间,连续取样 5 次,每天上午 10:30 取样一次,各处理分别进行取样,将红小豆植株根系迅速剪下并去掉叶片,对剩余茎部样品进行取样,并立即放入液氮中,而后置于 -80°C 冰箱中保存,供测定逆境生理指标使用。

低温处理后每天各处理移至室外 6 盆,直至成熟,供产量调查使用。

1.3.2 测定方法 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)的酶活性及 MDA 含量按照李合生等^[19]的方法;可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[19];可溶性糖含量

表 1 试验设计方案			
Table 1 Experiment design			
品种 Variety	处理编号 Treatment number	药剂处理 Pesticide treatment	温度处理 Temperature treatment
宝清红 Baoqinghong	T1(CK)	清水喷施 Spray water	室外常温 Outdoor normal temperature
	T2	清水喷施 Spray water	室内低温 Indoor low temperature
	T3	烯效唑喷施 Spray S_{3307}	室内低温 Indoor low temperature
天津红 Tianjinhong	T4(CK)	清水喷施 Spray water	室外常温 Outdoor normal temperature
	T5	清水喷施 Spray water	室内低温 Indoor low temperature
	T6	烯效唑喷施 Spray S_{3307}	室内低温 Indoor low temperature

测定采用硫酸蒽酮比色法^[20];脯氨酸含量测定采用茚三酮比色法^[20]。

1.3.3 产量测定方法 产量测定采用称量法,待红小豆完全成熟后,按盆摘荚收获,并用天平进行称量(g)。

1.4 数据处理

试验所有数据利用 Excel 2010 进行处理和作图,使用 DPS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆植株茎部抗性相关生理指标的影响

2.1.1 对 MDA 含量的影响 由图 1 可知,幼苗期低温处理后,红小豆植株茎部 MDA 含量随低温处理时间延长呈增加趋势。低温处理 1 d 时,天津红和宝清红茎部 MDA 含量分别为 $0.019\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.026\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,低温处理 5 d 后,天津红和宝清红茎部 MDA 含量分别达到 $0.052\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.053\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,与处理 1 d 相比,增加了 $0.033\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.027\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,分别增加了 1.74 倍和 1.04 倍。 S_{3307} 能够明显抑制低温条件下 MDA 含量的增加,尤以低温处理 4 d 开始更为明显。经方差分析可知:低温处理 3 d 内,T3 与 T2、T6 与 T5 之间没有显著差异。天津红处理 4 d 时,MDA 含量高低顺序为 $T5>T6>T4$,方差结果表明 T6 极显著低于 T5,T5 和 T6 极显著高于 T4;处理第 5 天,MDA 含量高低顺序也为 $T5>T6>T4$,其中 T5 较 T6 和 T4 分别高出 13.55% 和 138.33%,T6 显著低于 T5,但都极显著高于 T4。宝清红低温处理 4~5 d 时,MDA 含量高低顺序均为 $T2>T3>T1$,经方差分析可知,T3 极显著低于 T2,T3 和 T2 都显著或极显著高于 T1。

2.1.2 对脯氨酸含量的影响 由图 2 可知,幼苗期低温处理后,红小豆植株茎部脯氨酸含量呈先升后

降变化规律。低温处理 3 d 时,脯氨酸含量达到最高值;其中,T2 和 T1 脯氨酸含量分别为 $14.69\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $12.93\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,方差分析结果表明 T2 显著高于 T1;T5 和 T4 脯氨酸含量分别为 $13.58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $11.68\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,经方差分析可知两者之间无显著性差异。叶面喷施 S_{3307} 提高了低温条件下红小豆植株茎部脯氨酸含量,尤其是处理 3 d 开始更为明显,处理 3~5 d 时,T3 较 T2 分别高出 11.61%、8.11%和 31.33%;T6 较 T5 分别高出 16.52%、3.43%和2.27%。方差分析结果表明,低温处理 3~5 d,T3 显著高于 T2,T6 和 T5 之间没有显著性差异。

2.2 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆茎部抗氧化酶活性的影响

2.2.1 对 SOD 活性的影响 由图 3 可知随着幼苗期低温处理时间的延长,红小豆植株茎部 SOD 活性呈先升后降的变化趋势。宝清红在处理第 2 天达到最高,T2 较 T1 高出 15.35%;而天津红在处理第 3 天时达到最高,T5 较 T4 高出 20.73%。方差分析结果表明,T2 处理在处理第 2 天时显著高于 T1,其他取

样时期两者之间差异不显著;T5 和 T4 之间,在各取样时期均未达到显著差异水平。 S_{3307} 能明显提高 SOD 活性,宝清红 T3 各取样时期均高于 T2,方差分析结果表明,处理 1 d 时,T3 显著高于 T2,处理 3 d 和 4 d 时,T3 极显著高于 T2。天津红处理 3 d 开始 T6 处理 SOD 活性明显高于 T5,但方差分析结果表明 T6 和 T5 之间没有显著性差异。

2.2.2 对 POD 活性的影响 从图 4 可以看出,幼苗期低温处理后,红小豆植株茎部 POD 活性呈单峰曲线变化规律,T2 和 T5 都是在处理后第 3 天达到最高值,此时 T2 较 T1 高出 75.31%,T5 较 T4 高出 63.50%,方差分析可知 T2 极显著高于 T1,T5 极显著高于 T4;低温处理第 5 天,T2 和 T5 的 POD 活性分别低于 T1 和 T4,方差分析结果表明 T2 显著低于 T1,T5 极显著低于 T4。喷施 S_{3307} 提高了红小豆 POD 活性,尤其是低温处理 4~5 d 效果更为明显。低温处理期间,T3 均高于 T2 处理,T6 均高于 T5 处理。经方差分析可知:宝清红低温处理 4d 时,T3 极显著高于 T2,处理第 5 天,T3 显著高于 T2。天津红低温处理 4~5 d,T6 极显著高于 T5。

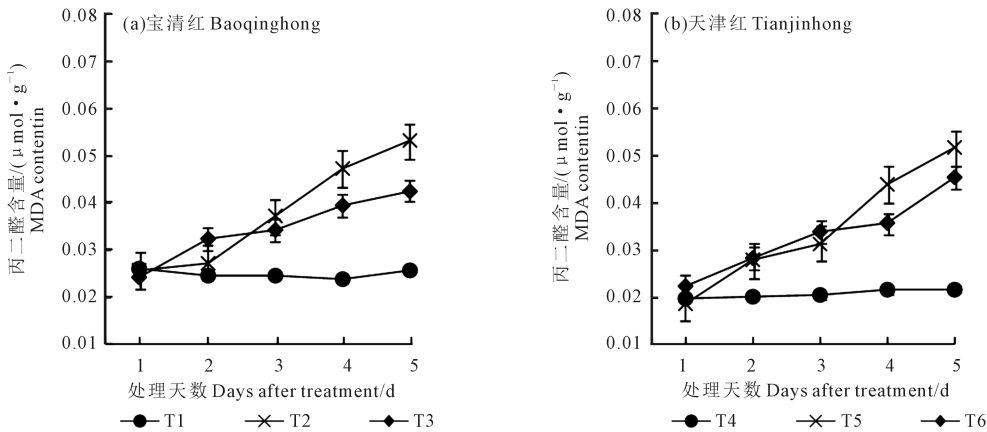


图 1 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆植株茎部丙二醛含量的影响

Fig.1 Effect of S_{3307} on MDA content in stem of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

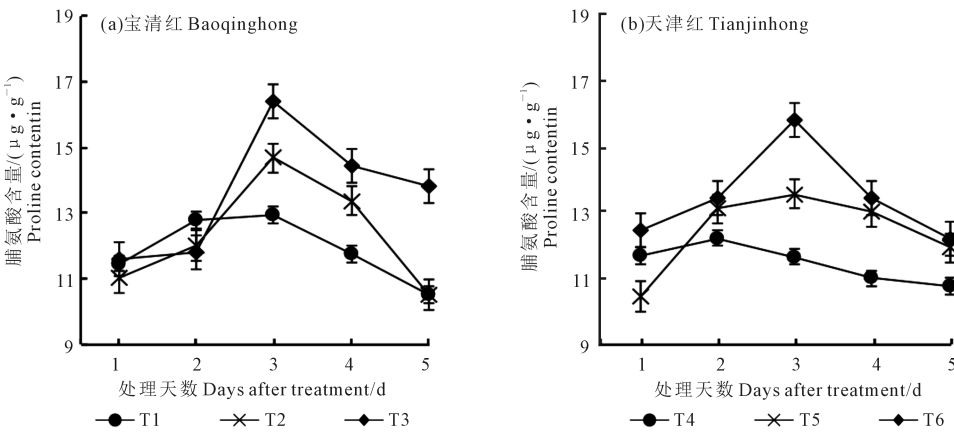
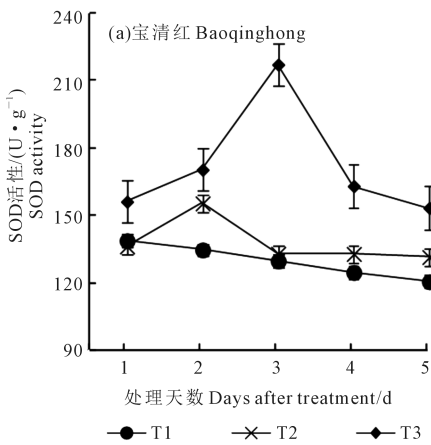


图 2 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆植株茎部脯氨酸含量的影响

Fig.2 Effect of S_{3307} on proline content in stem of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

2.2.3 对 CAT 活性的影响 由图 5 可知,幼苗期低温处理后,红小豆植株茎部 CAT 活性呈先升高后降低的变化趋势。CAT 活性峰值出现在低温处理后第 3 天,此时 T2 的 CAT 活性为 $153.33 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,较 T1 高出 4.55%;T5 的 CAT 活性为 $146.67 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,较 T4 高出 22.22%。整体来看,低温条件下,红小豆植株茎部 CAT 活性有所提高,经方差分析可知,天津红处理 3 d 时,T5 显著高于 T4,其他取样时间 T5 和 T4 之间无显著性差异;宝清红所有取样时间内 T2 和 T1 之间均无显著性差异。喷施 S_{3307} 能够明显促进低温条件下红小豆植株茎部 CAT 活性的提高,处理期间,T3 高于 T2,T6 高于 T5。方差分析结果表明:宝清红低温处理 4 d 时,T3 显著高于 T2,其他取样时期各处理之间差异不显著。天津红低温处理 3 d 时,T6 显著高于 T5,其他取样时期各处理间差异不显著。



2.3 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆茎部可溶性物质含量的影响

2.3.1 对可溶性糖含量的影响 由图 6 可知,幼苗期低温处理后,不同品种红小豆植株茎部可溶性糖含量变化趋势不同,其中宝清红呈先升高后降低的变化规律,天津红变化规律不明显。整体来看低温促进红小豆植株茎部可溶性糖含量增加,经过方差分析可知,天津红处理 3 d 时,T5 极显著高于 T4;处理 5 d 时,T5 显著高于 T4;其他取样时间 T5 和 T4 之间差异不显著。对宝清红来说,处理 3 d 时,T2 显著高于 T1,其他取样时期 T2 和 T1 之间差异不显著。喷施 S_{3307} 对红小豆植株茎部可溶性糖含量作用效果不明显,经方差分析可知:宝清红低温处理 4 d 时,T3 极显著高于 T2,其他取样时期 T3 和 T2 之间差异不显著。喷施 S_{3307} 对天津红植株茎部可溶性糖含量没有显著性影响。

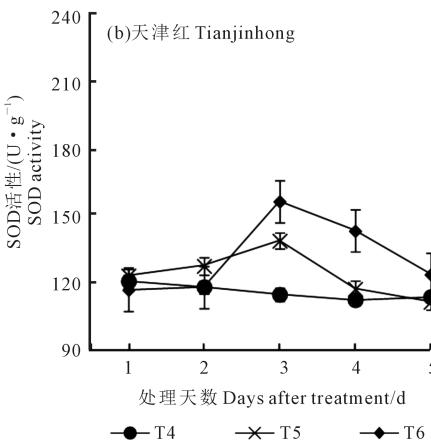


图 3 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆植株茎部 SOD 活性的影响

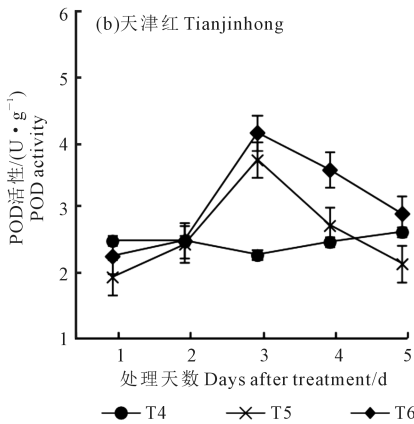
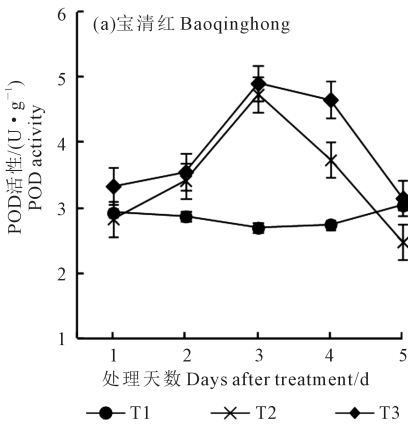


图 4 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆植株茎部 POD 活性的影响

Fig.3 Effect of S_{3307} on SOD activity in stem of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

Fig.4 Effect of S_{3307} on POD activity in stem of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

2.3.2 对可溶性蛋白含量的影响 由图 7 可知,幼苗期低温处理后,红小豆植株茎部可溶性蛋白质含量呈单峰曲线变化规律,T2 和 T5 均在低温第 3 天时达到最高值。方差分析结果表明:宝清红在低温处理第 3 天时,T2 极显著高于 T1;天津红在低温处理第 3 天时,T5 显著高于 T4,处理第 4 天时,T5 极显著高于 T4。喷施 S_{3307} 可提高红小豆植株茎部可溶性蛋白质含量,经方差分析可知:宝清红低温处理 4~5 d 时,T3 显著高于 T2;天津红低温处理 3 d

时,T6 显著高于 T5,其他取样时期可溶性蛋白含量无显著性差异。

2.4 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆产量的影响

由表 2 可知,幼苗期低温处理后,红小豆产量降低。T2 产量低于 T1,T5 低于 T4。处理 5 d,T2 较 T1 下降了 19.39%、T5 较 T4 下降了 41.69%。方差分析结果表明,宝清红处理 3 d 开始,T2 与 T1 差异显著或极显著降低;天津红处理 2 d 和 3 d 时,T5 显著低于 T4,处理 4 d 和 5 d,T5 极显著低于 T4。

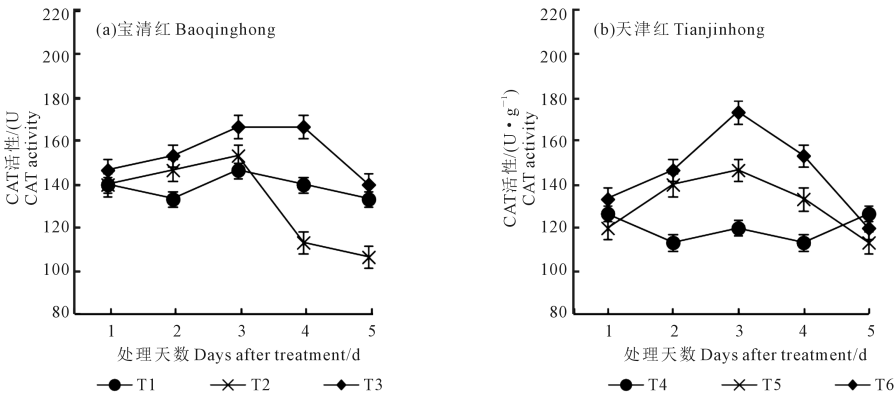


图 5 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆茎部 CAT 活性的影响

Fig.5 Effect of S_{3307} on CAT activity in stem of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

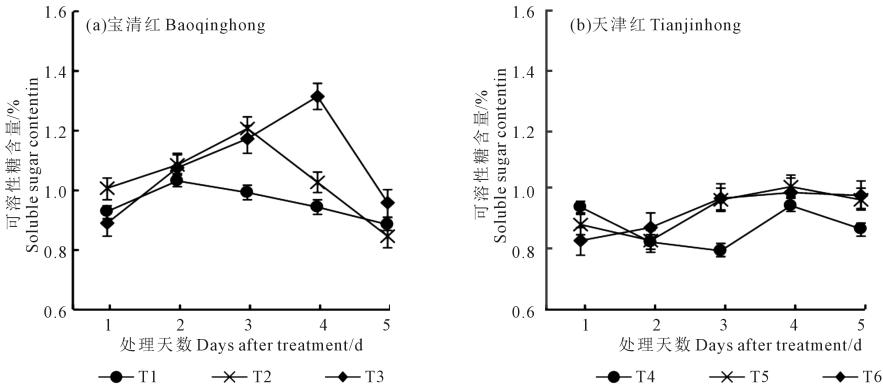


图 6 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆茎部可溶性糖含量的影响

Fig.6 Effect of S_{3307} on soluble sugar content in stem of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

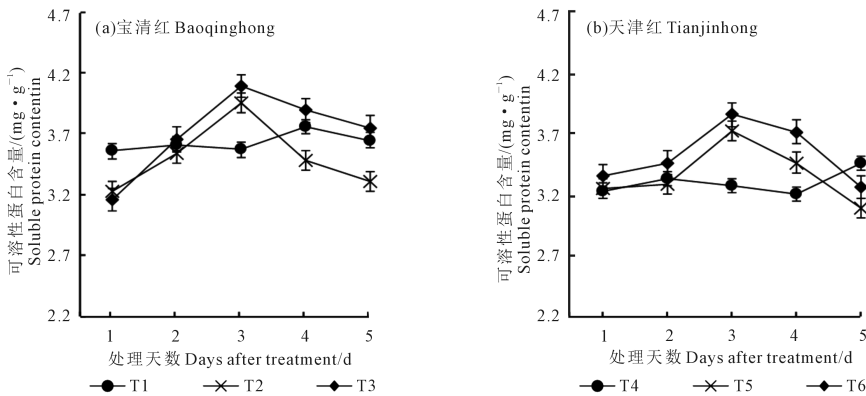


图 7 幼苗期低温胁迫下 S_{3307} 对红小豆茎部可溶性蛋白质含量的影响

Fig.7 Effect of S_{3307} on soluble protein content in stem of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

表 2 幼苗期低温条件下 S₃₃₀₇ 对红小豆产量的影响/(g·pot⁻¹)
Table 2 Effect of S₃₃₀₇ on yield of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	处理天数 Processing days/d				
		1	2	3	4	5
宝清红 Baoqinghong	T1	44.55±1.29Aa	44.55±1.29Aa	44.55±1.29Aa	44.55±1.29Aa	44.55±1.29Aa
	T2	40.60±5.40Aa	38.60±4.42Aa	39.67±1.78Ab	36.98±0.52Bb	35.91±3.68Ab
	T3	45.63±1.87Aa	43.45±2.53Aa	45.10±4.30Aa	43.29±4.10ABa	44.19±5.47Aa
天津红 Tianjinhong	T4	44.98±2.07Aa	44.98±2.07Aa	44.98±2.07Aa	44.98±2.07Aa	44.98±2.07ABa
	T5	44.18±1.65Aa	39.16±2.42Ab	36.09±3.25Ab	32.11±4.76Bb	26.23±0.71Cc
	T6	44.54±1.15Aa	42.48±1.45Aab	38.50±6.09Aab	39.82±4.15ABa	37.74±3.74Bb

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。
Notes: Lowercase and capital letters within each column were used to indicate difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels of probability, respectively.

低温条件下,喷施 S₃₃₀₇ 可提高红小豆产量,尤其是低温处理 3~5 d 更加明显,低温处理 5 d, T3 较 T2 提高了 23.06%, T6 较 T5 提高了 43.88%。经方差分析可知:宝清红低温处理 3 d 以上, T3 显著高于 T2, 但未达到极显著差异水平。天津红低温处理 4 d 时, T6 显著高于 T5; 低温处理 5 d 时, T6 极显著高于 T5。

3 讨 论

温度是影响作物生长发育的重要气象因素之一^[21], 生育期遭受低温会引起植物体内生理代谢发生明显变化^[22]。郭数进等^[23]研究表明苗期冷害导致豆类作物减产的原因主要是延迟了植株前期的生长发育。张勇^[24]研究表明冷害使单株粒数及百粒重降低明显, 致使产量明显降低, 减产幅度与受冷害程度呈正相关。S₃₃₀₇ 是一种重要的植物生长调节剂, 在改善植物生长性能、增强植物抗逆性、提高作物产量中发挥着重要作用^[25]。S₃₃₀₇ 通过降低贝壳杉烯氧化酶活性, 减少赤霉素(GA)合成前体原料的形成, 从而阻抑 GA 的生物合成, 降低内源 GA 水平, 并能够降低生长素(IAA)水平, 同时提高脱落酸(ABA)水平; S₃₃₀₇ 通过上述理化功能, 使植物体内产生一系列的生理效应, 对促进植株抗倒伏、延迟衰老具有明显效果, 尤其在作物面对逆境(干旱、低温等)的胁迫时, S₃₃₀₇ 能显著增强作物对逆境的抵抗能力, 从而达到增产的目的^[25]。

MDA 是细胞膜过氧化产物, 其含量高低是质膜受损严重与否的重要指标^[26], MDA 含量与植物耐寒性间呈负相关, 胁迫程度越强, MDA 积累量越多。低温条件下, 作物体内积累大量脯氨酸充当能量库来协调细胞氧化还原势的生理生化作用^[27], 对作物抗逆生长具有较好作用。李宁毅等^[28]研究指出, S₃₃₀₇ 处理能够提高叶片中脯氨酸含量, 同时减少 MDA 含量的积累, 维持逆境条件下膜系统的稳定性, 减少对细胞的毒害作用, 提高逆境条件下的适应性。马艳华^[29]也提出叶面喷施 S₃₃₀₇ 能够提高脯

氨酸含量, 而 MDA 含量减少, 提高作物的抗逆性。本试验表明, 苗期低温条件下喷施 S₃₃₀₇, 可显著抑制红小豆植株茎部 MDA 含量的增加, 并小幅提高脯氨酸含量。这可能是因为喷施 S₃₃₀₇ 能够影响植物体内自由基和 Δ -二氢吡咯-5-羧酸合成酶(P5C synthetase, P5CS)的合成。自由基作用于脂质发生过氧化反应, 氧化最终产物是 MDA, 喷施 S₃₃₀₇ 抑制了自由基的合成, 进而降低了 MDA 合成的量, 增加了作物抗冷性。P5CS 基因在胁迫条件下对植物中脯氨酸合成水平起着重要作用, P5CS 的转基因烟草中产生了大量的 P5CS 酶蛋白, 脯氨酸合成量比正常植株升高 10 倍。积累的脯氨酸通过参加细胞内的渗透调节, 起到了防冻剂或膜稳定剂的作用, 对细胞起到保护作用, 进而提高了小豆的抗冷性。植物处于逆境时, 细胞内自由基产生和清除的平衡系统受到破坏, 植物体内存在清除自由基的多种途径, 其中最主要的就是抗氧化酶系统, 通过 SOD、POD 和 CAT 三者协同作用, 使体内的氧自由基维持在较低水平, 可以在一定程度上减缓或防御低温胁迫^[30]。低温条件下, 植物体内活性氧自由基含量明显增加, 如果保护酶活性受到抑制, 多余的自由基无法及时清除, 导致在细胞内大量积累, 对植物产生伤害^[31]。郑春芳等^[16]研究得出 S₃₃₀₇ 能显著提高低温胁迫下 SOD 和 POD 活性, 进而提高作物的抗逆能力, 减少低温对细胞的伤害, 刘丽琴等^[14]也得出 S₃₃₀₇ 处理可有效促进逆境胁迫下红小豆根系 SOD 和 POD 活性。本试验表明, 低温导致红小豆植株茎部 SOD、POD 和 CAT 活性相对增加, 喷施 S₃₃₀₇ 可显著提高 POD 活性, 笔者认为这与 S₃₃₀₇ 促进内源激素 CTK 含量有关, 朱木兰等^[32]报道过 S₃₃₀₇ 能够促进作物体内 CTK 水平增加, 增加的 CTK 能够促进过氧化物酶体的分裂, 而 POD 主要存在于过氧化物酶体中。S₃₃₀₇ 通过促进过氧化物酶体分裂的方式, 增加了植物体内的 POD 的含量, 进而提高 POD 活性, 从而降低了膜脂过氧化程度, 减少低温带来的伤害。

植物为了减缓由逆境胁迫造成的生理代谢不平衡,会大量积累一些小分子有机化合物,通过渗透调节来降低水势,以维持较高的渗透压,保证细胞的正常生理功能^[33]。低温胁迫下可溶性糖和可溶性蛋白在植物体内会大量积累,可溶性糖通过某些糖代谢途径形成保护性物质,提高植物抵抗低温的能力^[34]。有报道提出 S_{3307} 能提高逆境条件下叶片中可溶性糖和可溶性蛋白含量的增加^[28],本试验研究结果表明 S_{3307} 提高了低温条件下红小豆植株茎部可溶性蛋白含量,但对可溶性糖含量影响不大,这可能与苗期叶片需要大量碳素用来建立碳结构促进叶片快速发育以抵御逆境有关。

有报道表明 S_{3307} 通过显著增加同化物的积累和运输,促进豆荚的建成,提高了大豆产量^[35],王畅等^[36]也得出 S_{3307} 处理能极显著增加芸豆单株荚数,显著提高芸豆产量。本研究表明,低温处理可降低红小豆产量,低温条件下 S_{3307} 处理能够显著提高红小豆的产量。

4 结 论

幼苗期低温导致红小豆茎部逆境生理指标发生变化,低温明显促进红小豆植株茎部 MDA 含量增加,但对脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量影响较小;低温 3 d 导致红小豆植株茎部 POD 活性显著提高,但 SOD 和 CAT 活性提高的不明显,耐冷品种的整体效果好于冷敏品种。 S_{3307} 具有抵御低温,降低作物受损的作用,其能有效增加茎部可溶性蛋白含量,降低 MDA 含量,同时能够显著提高 POD 活性。

幼苗期低温导致红小豆产量下降, S_{3307} 能缓解低温对红小豆产量的影响。上述结果说明耐冷品种能迅速响应低温胁迫,并通过调节自身的抗逆生理代谢来抵御伤害, S_{3307} 通过调节作物抗逆生理代谢进而提高作物的抗低温能力,降低产量损失,本试验为进一步研究红小豆幼苗抵御低温伤害的生理机制提供了参考,并得出 S_{3307} 能够缓解低温对小豆造成的伤害。今后将通过研究非酶抗氧化系统的变化情况进一步揭示 S_{3307} 抵御低温的生理机制,并通过研究内源激素水平的变化、分子机理等,系统揭示 S_{3307} 抵御逆境的全面机制。

参 考 文 献:

[1] 秦文斌,山溪,张振超,等. 低温胁迫对甘蓝幼苗抗逆生理指标的影响[J].核农学报,2018,32(3):0576-0581.

[2] Khan T A, Fariduddin Q, Yusuf M. Low temperature stress: Is phytohormones application a remedy? [J]. Environmental Sciences and Pollution Research, 2017, 24:21574-21590.

[3] 周杰,黄婷婷,赵光武,等.水杨酸调控种子低温萌发能力的机制研究[J].核农学报,2018,32(8):1649-1655.

[4] 陈汇林,侯伟. 低温对豇豆幼苗抗氧化酶系统的影响[J].气象与环境科学,2018,41(3):47-50.

[5] Nahar K, Hasanuzzaman M, Alam M M, et al. Exogenous spermidine alleviates low temperature injury in mung bean (*Vigna radiata* L.) seedlings by modulating ascorbate-glutathione and glyoxalase pathway [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16: 30117-30132.

[6] Peleg Z, Blumwald E. Hormone balance and abiotic stress tolerance in cropplants [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2011, 14(3): 290-295.

[7] 李志强, 朱雪梅, 邵继荣, 等.多效唑对大豆养分、锌铬吸收及抗氧化酶的影响[J].核农学报,2018,32(4):0771-0778.

[8] 魏鑫,倪虹,张会慧,等.外源脱落酸和油菜素内酯对干旱胁迫下大豆幼苗抗旱性的影响[J].中国油料作物学报,2016, 38(5): 605-610.

[9] 郑舒文,徐其隆,邹华文. 脱落酸对涝渍胁迫下小麦产量的影响[J].江苏农业学报,2015,31(5):967-970.

[10] 何丽娟,祁娟,马红萍,等.6-BA 对盐胁迫下老芒麦幼苗生长及生理特性的影响[J].草业科学,2018,35(9):2174-2182.

[11] 李荣冲,沈亮余,梁晶龙,等.高温高湿胁迫下茉莉酸甲酯对紫苏种子萌发及生理特性的影响[J].西北植物学报, 2012,32(2): 312-317.

[12] 王景伟. 奶花芸豆对干旱胁迫及烯效唑调控的相应[D].沈阳:沈阳农业大学,2014.

[13] 刘国宁,李茂盛,刘冰,等.叶面喷施烯效唑对红小豆叶片生理特性及产量的影响[J].天津农业科学,2017,24(2):72-75.

[14] Ahmad I, Kamran M, Yang X, et al. Effects of applying uniconazole alone or combined with manganese on the photosynthetic efficiency, antioxidant defense system, and yield in wheat in semiarid regions [J]. Agricultural Water Management, 2019, 216:400-414.

[15] 曲亚英,郁继华,陶兴林,等. S_{3307} 和 IBA+NAA 浸种对低温胁迫下甜椒幼苗抗冷性的影响 [J].甘肃农业大学学报,2006,41(4): 52-55.

[16] 郑春芳,陈继浓,仇建标,等. 烯效唑对低温胁迫下秋茄幼苗光合作用与抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2016,52(1): 109-116.

[17] 姜英,彭彦,李志辉,等.植物生长延缓剂对金钱树抗寒性指标的影响[J].草业科学,2010, 27(9):51-56.

[18] Kin S, Beak S K, Go E, et al. Application of adzuki bean starch in antioxidant films containing cocoa nibs extract[J].Polymers, 2018, 10(11):1210-1221.

[19] 李合生,孙群,赵世杰. 植物生理生化试验原理和技术[M].北京:高等教育出版社, 2000:167-169,184-185.

[20] 张宪政. 作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992:201-202.

[21] Aakash C, Angelica L, Björn O, et al. Global expression profiling of low temperature induced genes in the chilling tolerant japonica rice Jumli Marshi [J]. Plos One, 2013, 8(12):e81729.

[22] Howell K A, Narsai R, Carroll A, et al. Mapping metabolic and transcript temporal switches during germination in rice highlights specific transcription factors and the role of RNA instability in the germination process[J]. Plant Physiology, 2009, 149(2):961-980.