

外源调节剂包衣对低温胁迫下棉花种子萌发及幼苗耐寒性的影响

李防洲,冶军,侯振安

(新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室 石河子大学农学院,新疆 石河子 832003)

摘要:为探讨外源调节剂包衣对低温胁迫棉花幼苗耐寒性的调控效应,通过室内砂培试验,研究了外源调节剂包衣处理对低温下棉花种子萌发的影响,分析了5℃低温胁迫下以及恢复常温后外源调节剂包衣对棉花幼苗耐寒性的生理响应。结果表明:低温胁迫下棉花种子的萌发和幼苗生长受到抑制,水杨酸以及外源调节剂复配包衣处理均能显著提高低温胁迫下棉花种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数,其中发芽指数和活力指数达到极显著水平,增幅分别为41.2%~44.4%和51.2%~63.9%;外源调节剂包衣处理叶片的相对电导率(REC)和MDA含量显著降低,可溶性蛋白和可溶性糖等渗透调节物质的含量显著提高,SOD、POD和CAT等抗氧化酶的活性也显著增强;5 mmol·L⁻¹水杨酸+45 mmol·L⁻¹氯化钙+60 mg·L⁻¹亚硒酸钠复配包衣处理的叶片REC、MDA含量显著低于其它包衣处理,可溶性蛋白含量及其增幅显著高于其它包衣处理。说明水杨酸、氯化钙和亚硒酸钠三元复配包衣在缓解棉花幼苗低温逆境中具有协同效应,可以缓解低温胁迫对棉花种子萌发及幼苗生长的抑制作用,提高植物的耐寒性。

关键词:棉花;种子萌发;外源调节剂包衣;低温胁迫;幼苗耐寒性

中图分类号:S562 **文献标志码:**A

Effects of seed film coating with exogenous regulating substances on cotton germination rate and cold tolerance of seedlings

LI Fang-zhou, YE Jun, HOU Zhen-an

(The Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture of Xinjiang Production Construction Group/
College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: The aim of this experiment was to study the effects of seed film coating with exogenous regulating substances on the cotton seed germination and physiological response of cold tolerance in cotton seedlings under low temperature stress of 5℃ by sand culture method. The results showed that the low temperature stress inhibited the cotton seed germination and growth of seedlings. Seeds coated with salicylic acid and exogenous regulator compound had better germination potential, and higher germination rate, germination index and vigor index. Compared with CK, seeds coated with exogenous regulator compound had germination index increased by 41.2%~44.4%, vigor index 30.9%~63.9%. The coating treatments with exogenous regulating substances decreased leaf REC and MDA content. It also increased sharply the soluble protein and soluble sugar contents. The activity of SOD, POD and CAT were significantly increased. The coating treatment with a compound preparation of 5 mmol·L⁻¹ salicylic acid, 45 mmol·L⁻¹ calcium chloride and 60 mg·L⁻¹ sodium selenite which REC and MDA content were significantly higher than other coating treatment, and soluble protein content were significantly higher than other coating treatment. These results demonstrated that seed film coating with salicylic acid, calcium chloride and sodium selenite has a synergistic effect of improving low temperature resistance of cotton seedling by promoting seed germination and seedling growth.

Keywords: cotton; germination rate; film coating with exogenous regulating substances; low temperature stress; cold resistance of seedlings

收稿日期:2016-01-10

基金项目:国家科技支撑计划“低温灾害防控关键技术研究与应用”项目(2012BAD20B03)

作者简介:李防洲(1987—),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事植物营养生理生态研究。E-mail:tianshuilifangzhou@163.com。

通信作者:冶军(1974—),男,山东牟平人,副教授,主要从事新型肥料与现代施肥技术。E-mail:yejun.shz@163.com。

低温是影响作物产量的重要环境因子之一,也是限制农业生产发展的主要自然灾害之一^[1],全球每年因低温危害造成的农作物损失高达数千亿元^[2]。近些年来,随着全球气温的升高,极端气候频现,尤其在棉花(*Gossypium hirsutum*)等喜温作物的播种和幼苗生长期经常遭遇连雨雪、寒潮等低温气象灾害^[3-5],从而导致棉花烂种、烂芽、弱苗甚至死苗,严重影响植株生长发育和产量品质形成^[6],最终造成减产减收。种子包衣以种子为载体,以包衣设备为手段,将包衣剂按照一定比例均匀地包敷到种子表面的处理技术,在作物增产等方面具有很大的作用。阿里甫·艾西等^[7]两年的试验研究表明,抗低温种衣剂对低温造成的烂种、烂芽具有明显防治效果,在棉花生产中使用棉花抗低温种衣剂具有明显的增产效果。

目前关于植物耐寒性机理的研究表明,植物在低温胁迫下会发生一系列生理生化紊乱,首先细胞内活性氧水平升高,诱发脂膜过氧化链式反应,导致细胞膜完整性破坏、透性增加,继而叶片青枯死亡^[8]。Suzuki N等^[9]研究表明,低温胁迫下,MDA含量增加,而SOD、POD等酶活性增强,以清除逆境引起的活性氧,降低其对膜蛋白的影响。已有研究表明一些外源调节剂(水杨酸、氯化钙、亚硒酸钠等)参与调节植物的许多生理生化过程。水杨酸(Salicylic acid, SA)作为诱导植物对非生物逆境反应的抗逆信号分子^[10],通过减轻膜脂过氧化、提高渗透物质含量、提高抗氧化酶活性等途径来提高玉米^[11]、黄瓜^[12]、大豆^[13]等的耐寒性。钙不仅是一种植物必需的大量元素,而且作为偶联胞内信号与胞外生理生化的第二信使,在植物逆境生理生态中发挥着增强植物生理功能的作用^[14]。Rickauer等^[15]研究表明钙能维持细胞壁、细胞膜及膜结合蛋白的稳定性。由继红等^[16]、廖金柯等^[17]研究表明钙处理能显著缓解植物幼苗的低温伤害。硒作为植物生长发育的有益元素,现有研究表明,适量硒有清除过量自由基的功能,在一定程度上硒能缓解胁迫对植物的损伤^[18]。

有关外源调节物在提高植物耐寒性方面的研究已有较多的研究且多集中于浸种或叶面喷施,而通过种子包衣处理技术,探讨能够调节植物生理机制的调节剂,在改善植物生理过程与低温胁迫的关系、提高抗低温胁迫能力方面的生理机制报道较少。为此,本文通过前期预备试验,优选水杨酸、氯化钙和亚硒酸钠三种外源调节剂及其复配包衣处理研究外源调节剂包衣处理对棉花种子萌发及幼苗耐寒性的

调控效应,为农业生产上使用简单的化学调控和包衣技术相结合提高棉花对低温冷害的耐受性以及在生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试棉花品种为生产上大面积推广的新陆早48号,由石河子棉花研究所提供;水杨酸、氯化钙由天津市盛奥化学试剂有限公司生产;亚硒酸钠由天津市光复精细化工研究所生产;基础种衣剂为“锦华种衣剂”,由新疆锦华农药有限公司生产。

1.2 试验方法

1.2.1 种子包衣处理 试验共设5个处理,(1)基础种衣剂包衣处理;(2)5 mmol·L⁻¹水杨酸包衣处理;(3)5 mmol·L⁻¹水杨酸+45 mmol·L⁻¹氯化钙包衣处理;(4)5 mmol·L⁻¹水杨酸+60 mg·L⁻¹亚硒酸钠包衣处理;(5)5 mmol·L⁻¹水杨酸+45 mmol·L⁻¹氯化钙+60 mg·L⁻¹亚硒酸钠包衣处理,依次记为CK、T1、T2、T3、T4。挑选均匀一致的棉花种子,将其外源调节剂添加到基础种衣剂中,配置成以上不同浓度的外源包衣剂,以基础种衣剂包衣处理作为对照(CK),按药种比1:40进行种子包衣处理,将包好的棉花种子放在通风干燥处阴干进行萌发和早期幼苗生长试验。

1.2.2 种子萌发试验 模拟中国北方春季气温变化,设置5℃~20℃棉花种子萌发条件。采用20 cm×14 cm×5 cm的发芽盒,用洗净经高压蒸汽灭菌消毒后的湿润河沙做发芽床。试验选择以上包衣处理的种子,每个处理3次重复,每盒40粒种子,种子整齐置床后上覆约1.5 cm的湿沙,摆放于温度为5℃培养箱处理24 h,然后于昼夜温度20℃/10℃、光暗周期为12 h/12 h的培养箱继续培养。萌发过程中,以胚芽露土为出苗,逐日观察记录萌发种子数。第7天测定发芽势,第14天测定发芽率。

1.2.3 幼苗培养及低温处理 采用盆栽试验,基质为洗净的河沙,将洗净的湿沙装入盆钵中,每个处理播种5盆,每盆播种20粒,播种后上覆约2 cm的湿沙。在RXZ型智能人工气候箱进行培养,光暗周期为14 h/10 h,昼/夜温度25℃/25℃。待子叶展平后定期浇灌定量Hoagland营养液,一叶一心期定苗,每盆留苗15株,培养至两叶一心时,挑选生长一致的幼苗进行低温胁迫试验。先在常温下培养1 d,然后在5℃低温下胁迫处理2 d,之后恢复常温培养1 d(R1d)。分别于低温胁迫0 d(即常温下)、1 d、2 d以及恢复常温1 d(R1d)时采样,测定相关生理生化指

标。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 种子萌发参数测定 发芽势 = 第 7 天的发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$, 发芽率 = 第 14 天的发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$ 。发芽指数 (GI) = $\sum(G_i/D_i)$, 式中 G_i 为 t 日内的发芽数, D_i 为相应的发芽天数。活力指数 (VI) = $GI \times S$, 式中 GI 为发芽指数, S 为单株幼苗干物质质量 (g), 用称量法测定干物质质量。

1.3.2 生理指标的测定 相对电导率 (REC) 采用 DDS-307 型电导率仪测定^[19]; 丙二醛 (MDA) 含量的测定参照高俊凤的方法用硫代巴比妥酸 (TBA) 法^[19]测定; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法^[20]测定; 可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[20]测定; 抗氧化酶活性测定采用陈建勋^[21]的方法稍加修正, 酶液提取: 准确称取棉花幼苗叶片样品 0.5 g 于预冷的研钵中, 加 1 ml $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{pH} = 7.8$ 的磷酸缓冲液在冰浴上研磨成浆, 加缓冲液使终体积为 5 ml。将提取液于 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 冷冻 (4°C) 离心 20

min, 上清液即为粗提液, 然后将上清液倒入试管中 $0 \sim 4^\circ\text{C}$ 下保存, 用于测定超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 以及过氧化氢酶 (CAT) 活性。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 进行数据处理及作图, 运用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析及差异显著性检验。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花种子萌发的影响

由表 1 可知, 在低温条件下, 外源调节剂包衣处理棉花种子的发芽势、发芽率与 CK 差异显著, 外源调节剂包衣处理间差异不显著。T2、T3 和 T4 处理对棉花种子的发芽指数、活力指数较 CK 差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 其发芽指数分别提高了 41.2%、41.7% 和 44.4%, 活力指数分别提高了 62.4%、51.2% 和 63.9%。说明外源调节剂包衣对低温胁迫下棉花种子的萌发起到了促进作用。

表 1 外源调节剂包衣处理对棉花种子萌发的影响

Table 1 Effect of seed film coating with exogenous regulating substances on seed germination of cotton

处理 Treatment	发芽势/% Germination power	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
CK	54.17 \pm 3.81b	85.00 \pm 1.44b	27.29 \pm 1.47c	2.85 \pm 0.23c
T1	73.33 \pm 1.44a	89.17 \pm 3.81a	36.33 \pm 1.14b	3.73 \pm 0.19b
T2	72.50 \pm 5.00a	89.17 \pm 1.44a	38.54 \pm 1.12a	4.63 \pm 0.46a
T3	73.33 \pm 5.20a	90.00 \pm 2.50a	38.67 \pm 1.16a	4.31 \pm 0.18a
T4	74.17 \pm 3.81a	90.00 \pm 2.50a	39.42 \pm 0.60a	4.67 \pm 0.29a

注: 同列不同字母表示同一温度不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different letters in the same column mean significant difference among treatments for the same temperature at $P < 0.05$ level. The same below.

2.2 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花幼苗细胞膜系统的影响

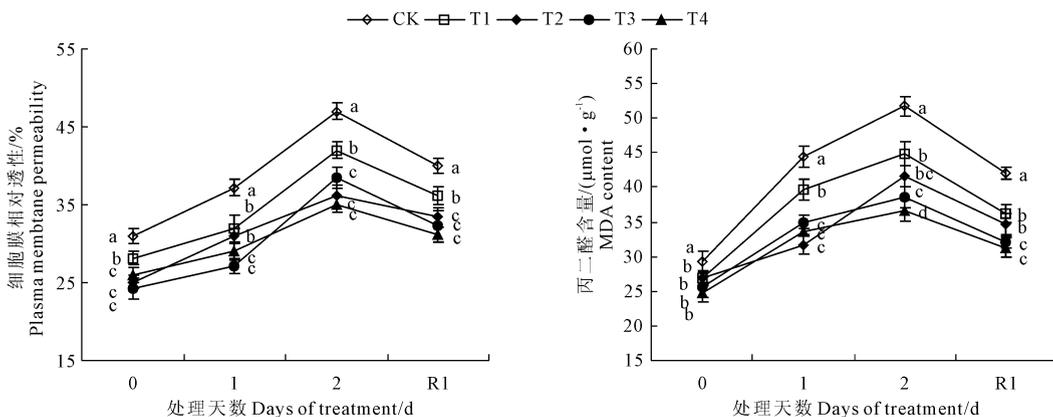
图 1 表明, 低温胁迫前, 与 CK 相比, 外源调节剂包衣处理不同程度地降低了 REC 和 MDA 含量。随低温胁迫时间的延长 REC 和 MDA 含量不断升高, 外源调节剂包衣处理与 CK 相比显著降低叶片的 REC 和 MDA 含量 ($P < 0.05$), 低温胁迫 1 d, 降幅分别为 15.8% ~ 27.2% 和 10.8% ~ 24.5%。低温胁迫 2 d, REC 和 MDA 含量达到峰值, T4 处理的叶片 REC 和 MDA 与 CK 相比分别降低 25.5% 和 29.2%, 差异达到极显著。恢复常温后, T3 和 T4 处理间棉花叶片 REC 和 MDA 含量差异不显著且均呈现下降趋势, 各处理的 REC 和 MDA 含量均高于低温胁迫前。说明低温胁迫使幼苗叶片细胞膜透性增大, 膜脂过氧化程度加剧, 而外源调节物质包衣处理

叶片中 REC 和 MDA 含量较 CK 明显降低, 从而缓解低温对棉花幼苗的伤害。

2.3 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花幼苗渗透调节系统的影响

由图 2 可以看出, 低温胁迫前后, 可溶性蛋白和可溶性糖含量呈先增后减的趋势, 其中可溶性蛋白含量在低温胁迫 2 d 达到最大值, T2 和 T4 包衣处理的可溶性糖含量在胁迫 1 d 达到峰值。说明外源调节剂包衣处理对调节低温胁迫下叶片可溶性蛋白和可溶性糖可能有不同的作用机制。T1 ~ T4 处理均能显著提高低温胁迫后叶片中可溶性蛋白和可溶性糖含量 ($P < 0.05$), T4 处理与 CK 相比, 叶片中可溶性蛋白和可溶性糖含量在低温胁迫 1 d 时提高 35.8% 和 48.2%, 胁迫 2 d 时提高 27.8% 和 28.1%, 恢复常温后提高 20.7% 和 23.9%。表明外源调节剂

包衣能显著增加可溶性有机物的积累,增强了低温胁迫下的渗透调节能力,且以 T4 包衣处理效果最好。



注:R1 为恢复常温后 1 天,下同。

Note: R1 for 1 day after the restoration of normal temperature. The same below.

图 1 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花幼苗细胞膜系统的影响

Fig.1 Effects of seed film coating with exogenous regulating substances on membrane systems of cotton seedling under low temperature stress

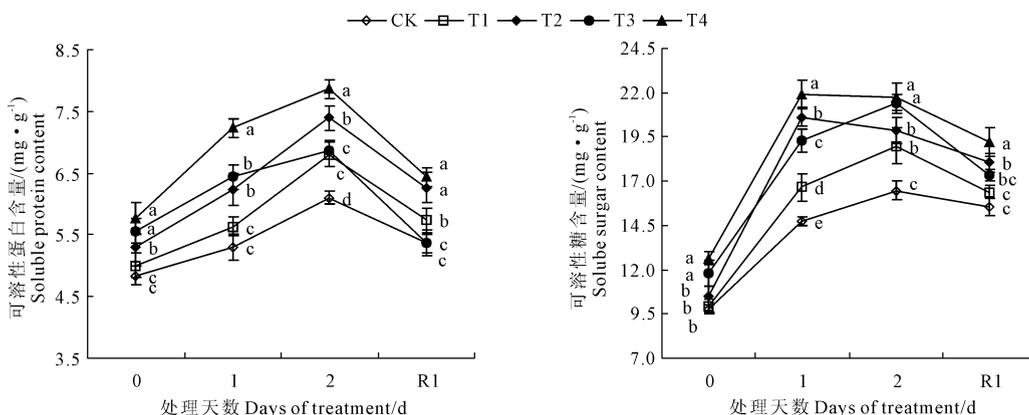


图 2 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花幼苗渗透调节物质含量的影响

Fig.2 Effects of seed film coating with exogenous regulating substances on osmotic regulation substances of cotton seedling under low temperature stress

2.4 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花幼苗抗氧化酶系统的影响

从图 3 可以看出,低温胁迫下,与 CK 相比,T1 ~ T4 处理均能显著提高棉花幼苗叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性。POD 和 CAT 活性分别在低温胁迫 2 d 和 1 d 时出现最大值,其中 T3 和 T4 与 CK 相比,差异均达极显著水平,但 T3 和 T4 处理间差异不显著。低温胁迫 1 d 时与 CK 相比,T4 处理的棉花叶片 SOD 活性提高 16.6%,T3 处理的棉花叶片 CAT 活性提高 28.3%。低温胁迫 2 d 时,T3 和 T4 处理的棉花叶片 SOD 活性与 CK 相比分别提高 10.2% 和 11.6%,POD 活性分别提高 12.7% 和 14.0%。恢复常温处理,POD 和 CAT 活性在 T1 ~ T4 处理之间差异不显著。说明外源调节剂包衣处理可以提高棉花幼苗叶片抗氧化酶活性,增强植株的抗寒性。

3 讨论

3.1 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花种子萌发的影响

植物整个生长周期中种子萌发作为生理代谢最旺盛的阶段,容易受到逆境刺激。棉花生产上,为防止或降低由于播期提前和早春低温,造成的烂种、烂芽问题,卫秀英等^[22]使用抗低温种衣剂包衣的棉花种子,结果棉花种子在低温条件下也保持较高的活力,有效降低低温冷害对出苗带来的危害。本研究表明,在低温条件下,棉种萌发期各项指标都有不同程度降低,说明低温对棉花种子萌发有抑制效应,而用生理调节剂包衣处理的棉种与基础包衣相比,不同程度地显著提高了棉种的发芽势、发芽率,发芽指数和活力指数增幅分别为 33.1% ~ 44.4% 和 51.5% ~ 63.9%。

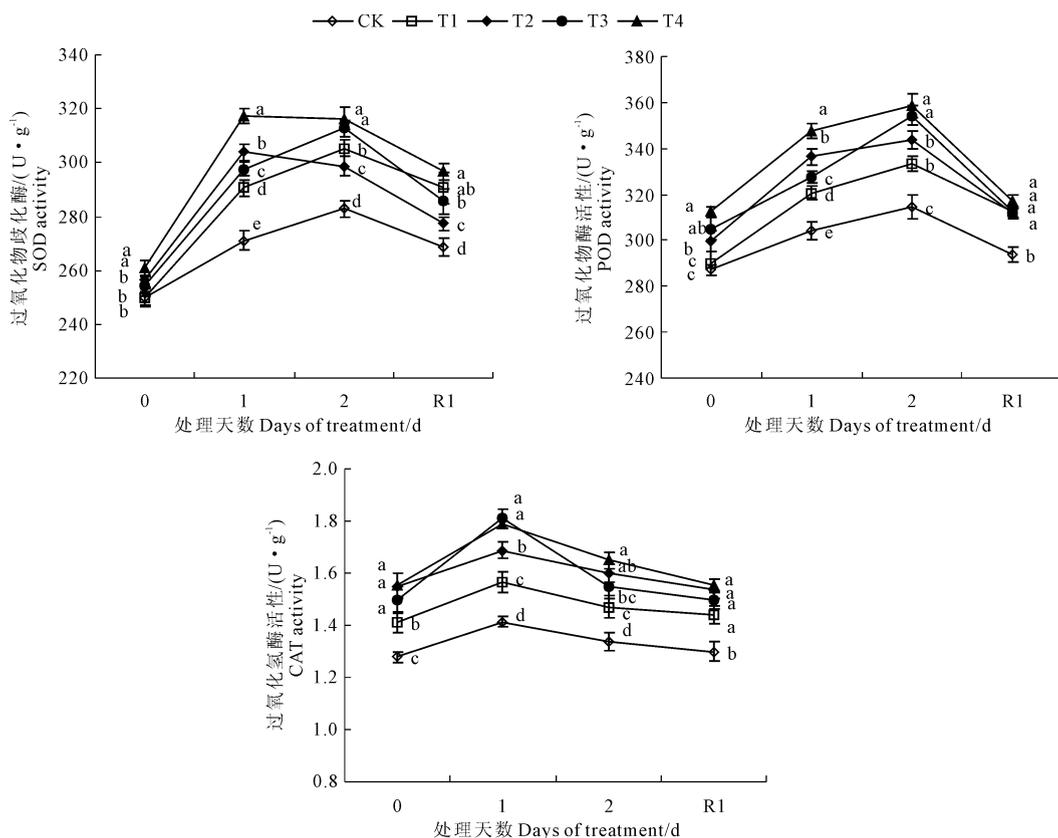


图 3 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.3 Effects of seed film coating with exogenous regulating substances on antioxidant enzyme activities of cotton seedling under low temperature stress

3.2 低温胁迫对棉花幼苗抗寒性的作用机制

植物在低温等逆境条件下细胞内自由基代谢平衡被破坏而使自由基不断增加,引发或加剧膜脂过氧化,导致细胞膜结构和功能遭到破坏,膜脂过氧化产物 MDA 含量增加^[23],进而引起一系列生理生化代谢紊乱,导致伤害发生^[24]。为了避免或减轻自由基对细胞造成伤害,植物体内可溶性蛋白质和可溶性糖等渗透调节物质的含量增加,从而降低细胞渗透势,增强植物自身适应逆境的能力^[20],同时植物细胞形成相应的酶促保护系统(SOD、POD 和 CAT)^[25]。本研究为证明低温胁迫下外源调节剂包衣降低 REC 是否由于减少了膜系统的氧化伤害水平,对叶片抗氧化物质含量进行测定表明,低温胁迫使棉花幼苗细胞膜的透性发生改变,进而使 REC 升高,同时产生过多的自由基,导致活性氧增加,MDA 含量明显增加,使抗氧化酶活性下降,细胞的膜结构和功能受到影响,从而使棉花幼苗代谢途径发生紊乱。

3.3 外源调节剂包衣处理对低温胁迫下棉花幼苗抗寒性的影响

逆境不仅提高细胞活性氧水平,同时也诱发植物防御体系的建立,从而避免或减轻活性氧对植物

的伤害。多数研究认为,外源调节剂在缓解植物逆境胁迫中具有重要作用。刘忠国等^[26]对黄瓜幼苗耐热性的研究发现水杨酸和氯化钙的复配制剂具有拮抗性。而刘雪琴等^[27]研究表明水杨酸和硝酸钙复配处理对盐胁迫下玉米幼苗具有缓解作用。辛慧慧等^[28]研究表明水杨酸、壳聚糖和硝酸钙在诱导棉花幼苗耐寒性中具有协同效应且水杨酸、壳聚糖、硝酸钙三元复配的效果比水杨酸和壳聚糖两元复配的效果好。本试验研究表明,将种子包衣技术和化控技术相结合,通过研究低温胁迫对棉花幼苗生理生化特性的影响,5 mmol·L⁻¹水杨酸包衣处理棉花幼苗叶片的 REC 和 MDA 含量及 SOD、POD、CAT 活性与 CK 差异不显著;低温胁迫后,外源调节剂包衣处理棉花幼苗叶片的 REC 和 MDA 含量显著降低,可溶性蛋白和可溶性糖含量以及抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性均显著高于 CK;恢复常温后,REC 和 MDA 含量,可溶性蛋白和可溶性糖含量以及抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性均有所下降,但外源调节剂包衣处理幼苗叶片的 REC 和 MDA 含量始终低于对照,而抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性均显著高于对照,其中以 5 mmol·L⁻¹水杨酸 + 45 mmol·L⁻¹氯化钙 +

60 mg·L⁻¹亚硒酸钠包衣处理对缓解幼苗耐寒性具有显著效果。

4 结 论

1) 外源调节剂包衣处理是一种安全、有效、经济、以抗低温制剂和种衣剂为一体的、可促进棉花生长,增强种子抗逆能力的一种包衣剂,在种子萌发过程中,各种外源调节剂以及营养成分缓慢释放,通过诱导细胞内部酶的活性,促进萌发期种子内营养物质的转化与合成,同时还诱导抗寒物的合成,从而激活棉种活力,增强了棉花萌发期的抗寒性。

2) 低温胁迫使棉花幼苗细胞膜的透性发生改变,进而使 REC 升高,同时产生过多的自由基,导致活性氧增加,MDA 含量明显增加,使抗氧化酶活性下降,细胞的膜结构和功能受到影响,从而使棉花幼苗代谢途径发生紊乱。

3) 低温胁迫下,水杨酸、氯化钙和亚硒酸钠三元复配包衣和二元包衣处理的可溶性糖含量和 SOD 出现不同的峰值,说明不同外源调节剂对调控棉花幼苗逆境胁迫可能有不同的机制,也揭示了外源调节剂在调节棉花幼苗体内渗透调节物质含量和抗氧化酶活性水平等方面的复杂性。外源调节剂包衣通过激活棉花种子生物酶活性,从而提高细胞膜结构和功能的稳定性和细胞质浓度,从根本上可提高棉花对低温冷害等不利环境的适应与抵抗能力,从而表明水杨酸、氯化钙和亚硒酸钠在缓解棉花幼苗耐寒性中具有协同效应。然而,有关外源调节剂缓解棉花幼苗低温胁迫是一个复杂的调控机制,还待做进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 刘祖祺,张石城.植物抗寒分子生物学研究进展[J].南京农业大学学报,1993,16(1):113-120.

[2] Guyic C L. Cold acclimation and freezing stress tolerance: Role of protein metabolism[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1990,41:187-223.

[3] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等.近 50 年新疆气候变化对环境的影响评估[J].干旱区地理,2001,24(2):97-103.

[4] 赖先齐,刘月兰,徐腊梅,等.北疆棉区棉花低温冷害的初步分析及对策探讨[J].新疆农业科学,2008,45(5):782-786.

[5] 贾宏涛,赵成义,巴特儿·巴克,等.新疆气候变化影响的观测事实及其对农牧业生产的影响[J].干旱区资源与环境,2009,23(11):72-76.

[6] 赵强,徐腊梅,王磊,等.2006年5月上旬新疆石河子棉区低温危害分析[J].新疆农业科学,2007,44(1):23-26.

[7] 阿里甫·艾尔西,孙良斌,张少民,等.棉花抗低温种衣剂田间筛选及效果分析[J].种子,2002,31(3):90-92.

[8] Boyer J S. Plant productivity and environment[J]. Science, 1982, 218:443-448.

[9] Suzuki N, Mittler R. Reactive oxygen species and temperature stresses: a delicate balance between signaling and destruction[J]. Physiol Plant, 2006,126:45-51.

[10] Agarwal S, Sairam R K, Srivasa G C, et al. Changes in antioxidant enzymes activity and oxidative stress by abscisic acid and salicylic acid in wheat genotypes[J]. Biologia Plantarum, 2005,49(4):541-550.

[11] 张富平,张蕊.低温下外源水杨酸对玉米幼苗保护酶活性的影响[J].玉米科学,2007,15(4):83-85.

[12] 刘伟,艾希珍,梁文娟,等.低温弱光下水杨酸对黄瓜幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响[J].应用生态学报,2009,20(2):441-445.

[13] 常云霞,徐克东,陈璨,等.水杨酸对低温胁迫下大豆幼苗生长抑制的缓解效应[J].大豆科学,2012,31(6):927-931.

[14] Batistic O, Kudla J. Calcium: Not just another ion[C]//Hell R, Mendel R R. Cell Biology of Metals and Nutrients. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010:17-54.

[15] Rickauer M, Taner W. Effects of Ca²⁺ on amino acid transport and accumulation in roots of phaseolus vulgaris[J]. Plant Physiology, 1986,82(1):41-46.

[16] 由继红,陆静梅,杨文杰.钙对低温胁迫下小麦幼苗光合作用及相关生理指标的影响[J].作物学报,2002,28(9):693-696.

[17] 廖金柯,朱新霞,胡小燕,等.低温胁迫下棉花幼苗对外源钙的生理响应[J].西北农业学报,2013,22(2):60-64.

[18] Feng R, Wei C, Tu S. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012,58(3):105-110.

[19] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.

[20] 张治安,陈展宇.植物生理学实验技术[M].吉林:吉林大学出版社,2008.

[21] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2006.

[22] 卫秀英,鲁玉贞,单长卷.不同棉花品种的抗低温性研究[J].安徽农业科学,2006,(12):2786-2787.

[23] Jane L, Bingru H. Changes of lipid composition and saturation level in leaves and roots for heat-stressed and heat-acclimated creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera*) [J]. Environ. Exp. Bot, 2004, 51(1):57-67.

[24] Lagriffoul A, Mocquot B, Mench M, et al. Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in young maize plant (*Zea mays* L.) [J]. Plant and Soil, 1998,200:241-250.

[25] Tsang E W T, Bowler C, Herouart D, et al. Differential regulation of superoxide dismutases in plants exposed to environmental stress[J]. Plant Cell, 1991,3:783-792.

[26] 刘忠国,曹辰兴,王涛,等.水杨酸与氯化钙单一及复配诱导对黄瓜幼苗耐热性的影响[J].山东农业科学,2010,4(4):27-30.

[27] 刘雪琴,李勇慧,仝瑞建,等.硝酸钙和水杨酸复配处理对盐胁迫下玉米幼苗生长的影响[J].广东农业科学,2011,16(1):11-12.

[28] 辛慧慧,李志强,李防洲,等.外源调节物质对棉花幼苗耐寒生理特性的效应[J].棉花学报,2015,27(3):254-259.