

激素预处理对低温胁迫下西瓜幼苗活性氧含量和抗氧化酶活性的影响

刘晓辉, 张显*, 郑俊骞, 马建祥, 张勇

(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西杨陵 712100)

摘要:以冷敏感型西瓜品种‘玲珑王’幼苗为试验材料, 采用 50 mg/L NAA、25 mg/L 6-BA、25 mg/L GA₃、25 mg/L ABA 4 种外源激素进行外施预处理, 研究激素在 10 ℃低温胁迫下对西瓜幼苗冷害指数、主要活性氧含量和抗氧化酶活性的影响。结果显示: (1) 适宜浓度的 6-BA、GA₃、ABA 预处理可以明显降低西瓜幼苗冷害指数, NAA 作用则相反。 (2) GA₃、ABA、6-BA 预处理的西瓜幼苗 O₂⁻ 产生速率和 MDA 含量在低温胁迫第 3 天时较对照分别显著降低了 9.0%、9.4%、7.7% 和 38.1%、40.1%、45.9%, 它们的 H₂O₂ 含量在低温胁迫第 5 天时较对照分别显著降低了 11.9%、18.9%、22.7%。 (3) 6-BA、GA₃、ABA 预处理的西瓜幼苗叶片在低温胁迫第 7 天时 SOD 活性分别比对照显著提高了 15.95%、17.87%、18.33%, POD 活性分别显著提高 36.36%、73.74%、145.45%, CAT 活性分别提高 115.22%、116.28%、161.63%。研究表明, 在低温胁迫条件下, 适宜浓度的外源 6-BA、GA₃ 和 ABA 预处理可有效提高西瓜幼苗叶片中 SOD、POD、CAT 的活性, 减缓西瓜幼苗中 H₂O₂ 含量和 O₂⁻ 产生速率的增加及膜脂过氧化产物 MDA 的积累, 缓解低温造成的氧化伤害, 从而增强幼苗的抗寒性, 并以 25 mg/L 6-BA 处理的效果最佳, 可以应用于生产。

关键词: 外源激素; 西瓜; 抗氧化酶; 抗寒性

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

Effect of Exogenous Hormones on the Content of Active Oxygen and Activity of Antioxidant Enzymes of Watermelon Seedling under Low Temperature Stress

LIU Xiaohui, ZHANG Xian*, ZHENG Junxian, MA Jianxiang, ZHANG Yong

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

Abstract: With chilling sensitive watermelon ‘linglongwang’ as the tested material, we investigated the effects of exogenous 50 mg/L NAA, 25 mg/L 6-BA, 25 mg/L GA₃, 25 mg/L ABA on chilling injury index, the main content of active oxygen and the activity of antioxidant enzymes of watermelon seedlings under low temperature stress. The results showed that: (1) The appropriate concentration of 6-BA, GA₃ and ABA could significantly reduce the chilling injury index of watermelon seedling, while NAA worked in the opposite direction. (2) At the third day of cold stress, the generation rate of O₂⁻ and the content of MDA in watermelon seedling that GA₃, ABA and 6-BA pretreated were significantly reduced by 9.0%, 9.4%, 7.7% and 38.1%, 40.1%, 45.9%, respectively; and the content of H₂O₂ of watermelon seedling were reduced by 11.9%, 18.9% and 22.7% at the fifth day of cold stress. (3) 6-BA, GA₃ and ABA pretreatment made SOD activity significantly increased by 15.95%, 17.87% and 18.33% at the seventh day of cold stress, respec-

收稿日期: 2013-12-24; 修改稿收到日期: 2014-03-20

基金项目: 国家西甜瓜产业技术体系(CARS-26-NO. 18)

作者简介: 刘晓辉(1988—), 女, 硕士, 主要从事西瓜抗寒性研究。E-mail: lixiaohui0209@163.com

* 通信作者: 张显, 教授, 博士生导师, 主要从事水分管理和旱作栽培研究。E-mail: zhangxian098@126.com

tively; POD activity significantly increased by 36.36%, 73.74% and 145.45%, respectively; CAT activity significantly increased by 115.22%, 116.28% and 161.63%, respectively. Hence, it was indicated that appropriate concentration of exogenous 6-BA, GA₃ and ABA could effectively improve the activities of SOD, POD and CAT, slow down the accumulation of H₂O₂ and O₂⁻ as well as MDA, mitigate the damage of low temperature in watermelon seedling under low temperature stress, then strengthen the cold resistance of watermelon seedling. Furthermore, 25 mg/L 6-BA showed the best effect, could be applied to production.

Key words: exogenous hormones; watermelon; anti-oxidative enzyme; cold resistance

全球土地面积的三分之一具有耕作潜力,然而因为非生物逆境胁迫使耕地利用率只有 10% 左右^[1]。低温是限制作物生长、产量和分布的主要非生物胁迫因子之一,每年的倒春寒与晚秋的突然霜降均严重影响着农作物产量^[2]。研究表明,低温胁迫下,木薯幼苗相对电导率和丙二醛(MDA)含量增加^[3],茄子幼苗的叶绿素含量、叶绿素 a/b、光合作用参数(P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i)均降低^[4],西瓜幼苗中的非酶促抗氧化剂抗坏血酸(AsA)、谷胱甘肽(GSH)含量及其抗氧化酶中的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、脱氢抗坏血酸还原酶(DR)活性均下降^[5]。

西瓜(*Citrullus lanatus*)喜高温干燥,较不耐寒。近年来,随着设施技术的快速发展和产业结构的调整,西瓜反季节及提早栽培面积逐年增加^[6],但是反季节及提早栽培极易受到早春低温及天气的影响。外源激素可直接或间接地影响植物内源激素的含量和平衡,影响相关基因的表达,进而在植物适应逆境中起积极作用^[7]。任旭琴等^[8]的研究表明不同浓度外源 ABA 均能显著缓解低温对辣椒叶片的伤害,其中以 150 mg/L ABA 作用效果最好; 10 μ mol/L 6-BA 可以提高‘东农冬麦 1 号’抵御低温的能力^[9]。

目前外源激素对作物抗寒性影响的研究主要集中在单一激素不同浓度效应方面,难以对不同激素效应进行统一评定。针对这一现象,本试验利用生长素、细胞分裂素、赤霉素、脱落酸 4 种激素对西瓜幼苗进行外施处理,研究其相关生理生化指标在低温下变化特征,以期得到经济高效提高西瓜幼苗耐冷性的方法,为早春西瓜生产提供理论保障。

1 材料和方法

1.1 材料

供试西瓜品种为冷敏感品种‘玲珑王’,其种子为本实验室自繁。所使用的外源激素 NAA(粉剂,纯度 $\geq 98\%$)、6-BA(粉剂,纯度 $\geq 98\%$)、GA₃(粉剂,纯度 $\geq 98\%$)、ABA(粉剂,纯度 $\geq 98\%$)为中国

医药上海化学试剂公司产品。

1.2 处理方法及采样

试验共设计蒸馏水(对照,CK)、NAA 50 mg/L(NAA)、6-BA 25 mg/L(6-BA)、GA₃ 25 mg/L(GA₃)和 ABA 25 mg/L(ABA)5 个处理,各处理的浓度经预实验确定。在温室大棚中用 10 cm $\times$ 10 cm 的小盆育苗,待幼苗长至三叶一心时,挑选生长健壮且长势一致,无病虫害的幼苗进行喷雾处理。每个处理 15 株,3 次重复。连续喷雾 7 d(以叶面凝成水滴,又不滴下为准),然后在人工生长箱中(光周期 12 h/暗 12 h,光照度 4 000 lx)进行 10 $^{\circ}$ C 低温处理,并在处理的 0、1、3、5、7 d 采集幼苗功能叶进行各项生理指标的测定。

1.3 生理指标测定

冷害指数的测定参照范小玉等^[10]的分级方法,即 0 级,无症状;1 级,老叶边缘黄化或皱缩,花叶,变形;2 级,少数功能叶边缘黄化或皱缩花叶,变形,其它部分完好;3 级,功能叶缘以至全部皱缩或失绿,新叶完好;4 级,功能叶完全变黄,失绿,萎蔫,新叶受伤害;5 级,新叶受害严重,植株受冷害而全部萎蔫或死亡。

冷害指数 = $\sum$ (各级株数 $\times$ 级数)/总株数

SOD 活性的测定采用 NBT 法^[11],POD 活性的测定采用愈创木酚法^[12],CAT 活性的测定参照李合生^[13]的方法。H₂O₂ 含量的测定采用林植芳等^[14]的方法,MDA 含量参照高俊凤^[15]的方法测定,O₂⁻ 产生速率的测定采用 Ke 等^[16]的方法。

1.4 数据处理

采用 DPS 软件进行方差分析;用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 外源激素预处理对低温胁迫下西瓜幼苗冷害指数的影响

表 1 显示,对照、NAA 和 GA₃ 处理的西瓜幼苗在低温胁迫第 1 天就表现出冷害症状,6-BA 和 ABA 处理的西瓜幼苗在胁迫第 3 天时才开始表现

出冷害症状;在胁迫第 5 天时,对照、NAA 和 GA_3 处理的西瓜幼苗开始全株萎蔫,且 NAA 处理的冷害指数明显高于对照,而 6-BA 和 ABA 处理的西瓜幼苗在胁迫第 7 天时才开始全株萎蔫,但两者的冷害指数明显低于同期的对照和 NAA 处理。可见,在低温胁迫下,外源 6-BA、 GA_3 、ABA 预处理均可以有效降低西瓜幼苗冷害指数,且 6-BA、ABA 预处理效果更好一些,而外源 NAA 处理不能降低西瓜幼苗冷害指数,反而使其有所升高。

2.2 外源激素预处理对低温胁迫下西瓜幼苗 MDA、 H_2O_2 含量及 O_2^- 产生速率的影响

图 1 结果显示,随着低温胁迫时间的延长,西瓜幼苗叶片中膜脂过氧化产物 MDA 的含量呈上升趋势。其中,在低温胁迫条件下,NAA 处理的西瓜幼苗叶片 MDA 含量在各处理时间均略高于对照(CK)但无显著差异($P>0.05$),且显著或者极显著高于其余激素处理;6-BA、 GA_3 、ABA 处理的 MDA 含量较对照显著或极显著降低,但它们之间多无显著差异,如在低温处理第 3 天时的降幅分别为 45.9%、38.1%和 40.1%($P<0.01$)。

同时,随着低温胁迫时间延长,对照和各外源激素处理西瓜幼苗叶片的 H_2O_2 含量均呈先增后降的趋势;它在低温胁迫的第 5 天达到最大值,且此时处理之间差异最明显,所有激素处理均极显著低于对照($P<0.01$),此时 GA_3 、ABA、6-BA 处理的 H_2O_2 含量较对照分别降低了 11.9%、18.9%、22.7%;NAA、6-BA 处理 H_2O_2 含量仅在第 5 天时极显著低于对照($P<0.01$),其余时间均与对照无显著差异($P>0.05$);而 GA_3 和 ABA 处理的 H_2O_2 含量在低温处理第 1 天、第 3 天和第 5 天均较对照显著降低($P<0.05$)。

另外,西瓜叶片 O_2^- 产生速率同样随低温胁迫时间呈先增后降的趋势,6-BA 处理幼苗叶片的 O_2^-

产生速率在低温处理第 1 天即达到最大值,而其余处理和对照均在第 3 天达到最大值,但各时间处理间差异相对较小;NAA 处理的 O_2^- 产生速率除第 5 天比对照显著降低外,其余时间均与对照无显著差异;6-BA 处理的 O_2^- 产生速率除第 1 天与对照无显著差异外,其余处理间均较对照显著降低,而 GA_3 、ABA 处理西瓜幼苗叶片中 O_2^- 产生速率在所有处理时间均比对照显著降低($P<0.05$);如在低温胁迫第 3 天时, GA_3 、ABA、6-BA 处理的 O_2^- 产生速率较对照分别显著降低了 9.0%、9.4%、7.7%。

以上结果表明外源 6-BA、 GA_3 、ABA 处理都可以有效降低低温胁迫下西瓜幼苗叶片中 O_2^- 产生速率

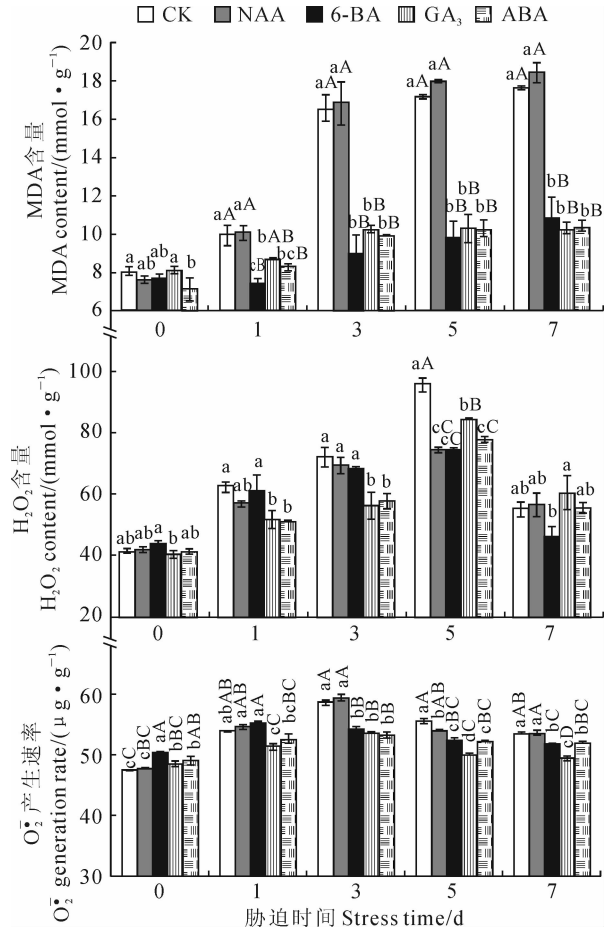


图 1 外源激素预处理对低温胁迫下西瓜幼苗 MDA、 H_2O_2 、 O_2^- 含量的影响
不同小写和大写字母分别表示同期处理之间的差异达 0.05 和 0.01 显著性水平;下同

Fig. 1 Effects of exogenous hormone treatments on MDA, H_2O_2 and O_2^- contents in the leaves of watermelon seedling during low temperature stress
The different normal letters and capital letters indicated significant difference among treatments at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as below

表 1 外源激素预处理对低温胁迫下西瓜幼苗冷害指数的影响

Table 1 Effects of exogenous hormone treatments on chilling injury index in the leaves of watermelon seedling during low temperature stress

处理 Treatment	胁迫时间 Stress time/d			
	1	3	5	7
CK	0.200 0	1.300 0	2.033 3	2.566 7
NAA	0.233 3	1.466 7	2.466 7	2.800 0
6-BA	0.000 0	0.466 7	0.866 7	1.766 7
GA_3	0.100 0	0.733 3	1.133 3	2.000 0
ABA	0.000 0	0.433 3	0.900 0	1.800 0

和 MDA、 H_2O_2 含量,显著缓解细胞膜的氧化损伤,从而减轻低温对植物的伤害,并以 6-BA 处理效果相对较好。但 NAA 处理没有表现出缓解效应,甚至受到的氧化伤害比对照稍重。

2.3 外源激素对低温胁迫下西瓜幼苗抗氧化酶的影响

由图 2 可知,西瓜幼苗叶片中 SOD 活性随低温处理时间的延长呈先升高后降低的趋势。其中,在低温胁迫条件下,NAA 处理的西瓜幼苗叶片 SOD 活性在各处理时间均低于对照(CK),且在第 3 天和第 7 天时达到显著水平($P < 0.05$); GA_3 、ABA 处理 SOD 活性在低温处理第 5 和第 7 天时较对照极显著提高($P < 0.01$),6-BA 处理 SOD 活性在低温胁迫

第 3 天、第 5 天和第 7 天较对照极显著提高($P < 0.01$)。6-BA、 GA_3 、ABA 处理 SOD 活性在低温胁迫第 7 天时增幅最大,分别为 15.95%、17.87%、18.33%。

同时,随着低温胁迫时间延长,对照和各外源激素处理西瓜幼苗叶片中 POD 活性呈先升后降的趋势;在低温胁迫条件下,NAA 处理的西瓜幼苗叶片 POD 的活性除第 7 天外各处理时间较对照均显著降低($P < 0.05$);ABA 处理 POD 活性较对照极显著提高($P < 0.01$),6-BA 处理 POD 活性在低温胁迫第 3 天和第 7 天较对照显著升高($P < 0.05$), GA_3 处理 POD 活性在低温处理第 5 和第 7 天时较对照极显著提高($P < 0.01$)。6-BA、 GA_3 、ABA 处理 POD 活性最大增幅分别为 36.36%、73.74%、145.45%。

另外,西瓜幼苗叶片中 CAT 的活性也随低温胁迫时间呈先升后降的趋势。NAA 处理的西瓜幼苗叶片 CAT 活性在低温胁迫第 5 天和第 7 天时较对照显著降低($P < 0.05$);6-BA 处理 CAT 活性在低温胁迫第 3 天和第 5 天较对照极显著提高($P < 0.01$); GA_3 处理 CAT 活性在低温胁迫第 1 天、第 3 天和第 5 天较对照显著或极显著提高($P < 0.01$);ABA 处理 CAT 活性在低温胁迫第 1 天和第 3 天较对照极显著提高($P < 0.01$)。6-BA 处理 CAT 活性在低温胁迫第 5 天达到最大值, GA_3 、ABA 处理则第 1 天达到最大值,分别提高了 115.22%、116.28%、161.63%。

上述研究结果表明,6-BA、 GA_3 、ABA 预处理均可以有效提高西瓜幼苗叶片中 SOD、POD、CAT 活性来抵御低温对其造成的伤害,提高其抗寒性,并以 ABA 处理效果相对较好。而 NAA 处理没有提高幼苗保护酶活性,甚至使其活性降低。

3 讨论

冷害指数是鉴定西瓜幼苗抗寒性的有效指标之一,能够从形态上反应低温胁迫对西瓜幼苗的伤害程度,与植物的抗寒性负相关^[17]。研究表明,10℃是大多数喜温作物的冷害临界温度^[18]。本试验表明,外源 6-BA、 GA_3 、ABA 预处理均可以降低西瓜幼苗冷害指数,且 6-BA、ABA 预处理效果较好一些,而外源 NAA 处理不能降低西瓜幼苗冷害指数,反而使其有所升高。

正常情况下,植物细胞中活性氧(ROS)的产生与清除保持动态平衡,低温胁迫能引起细胞膜损伤,

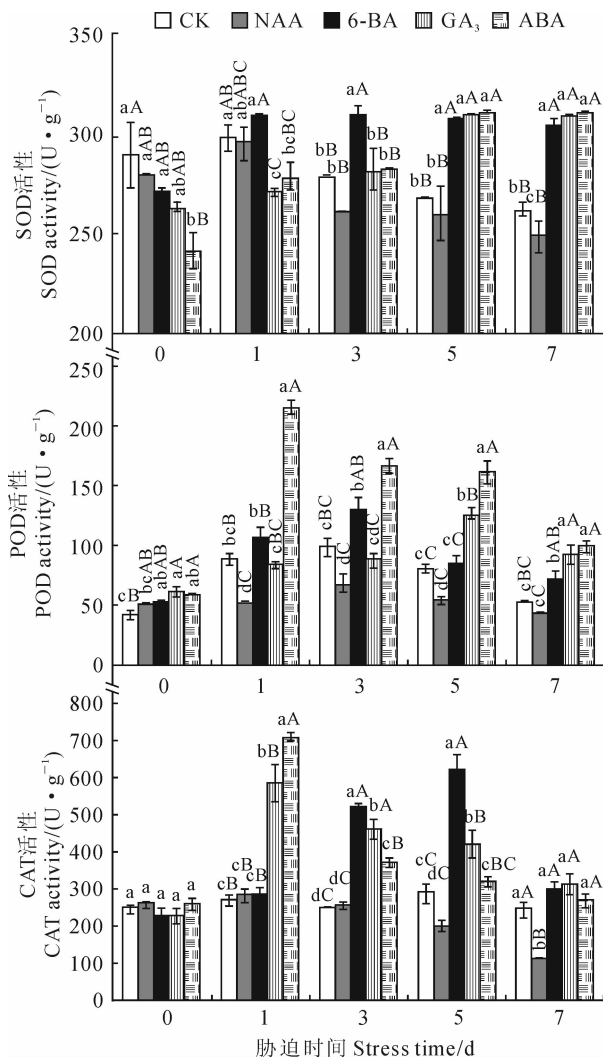


图2 外源激素预处理对低温胁迫下西瓜幼苗 POD、SOD、CAT 活性的影响

Fig. 2 Effects of exogenous hormone treatments on the activities of POD, SOD and CAT in the leaves of watermelon seedling during low temperature stress

致使细胞质外渗,活性氧清除系统活性下降^[19],活性氧的产生速率急剧升高^[20-21],导致活性氧水平升高,使膜脂过氧化和 MDA 积累^[22]。近年来,许多研究表明施用一定浓度的外源激素可以提高植物的抗逆(寒)性,如外源 ABA 处理可减缓鹰嘴豆^[23]和茄子^[24]幼苗叶片中丙二醛和过氧化氢的积累;外源 6-BA 处理可以有效控制或者防止水稻^[25-26]、网纹甜瓜^[27]、沟叶结缕草^[28]、油菜^[29]叶片中活性氧的积累和氧化伤害的发生,减少 MDA 的积累;IBA+NAA 浸种处理降低了低温胁迫下甜椒幼苗叶片的相对电导率,减少了 MDA 的积累^[30];外施 NAA 使甜瓜幼苗电导率增加,导致其抗寒性降低^[29];外施 GA₃ 能减缓北美海蓬子幼苗超氧阴离子的产生速率和 MDA 的积累^[31]。本试验表明,适宜浓度的 6-BA、GA₃、ABA 预处理能使低温胁迫下西瓜幼苗叶片中 MDA 含量、O₂⁻ 产生速率显著降低,GA₃、ABA 预处理则显著降低了各处理时间 H₂O₂ 含量,6-BA 处理则使胁迫第 5 天和第 7 天时 H₂O₂ 含量显著降低。但外施 NAA 对西瓜幼苗叶片中 H₂O₂ 含量和 O₂⁻ 产生速率的增加及膜脂过氧化产物 MDA 的积累无显著影响。表明外施适宜浓度 6-BA、GA₃、ABA 都可以缓解低温胁迫下活性氧(ROS)的积累和对细胞膜的氧化损伤,降低 MDA 含量,从而减轻低温对植物的伤害,而且以 6-BA 处理效果最佳。

SOD、POD 和 CAT 是植物体内活性氧清除系统主要保护酶,可高效清除细胞内的 H₂O₂ 和 O₂⁻,使细胞内活性氧的产生与清除保持平衡^[32-33]。因此,提高植物体内清除活性氧的保护酶的活性,就可以维持膜系统的完整性,增强其抗逆性。本研究中,外源 ABA 预处理极显著地提高了低温胁迫下西瓜幼苗叶片的 POD 活性和 CAT 活性;而且随着胁迫时间的延长,2 种酶活性增大幅度减小。这表明外源 ABA 可以提高西瓜幼苗的抗寒性,而且随着胁迫时间的延长,提高程度减缓。这与辣椒^[34]、番茄^[35-36]、茉莉^[37]等作物上的研究结果相符。其原因可能是外源 ABA 能够诱导抗寒相关基因表达^[38],从而提高清除活性氧的酶活性。

外源 6-BA 可以降低植物体内 ABA 含量,保持气孔的一定开度,使植物在低温条件下维持一定的光合作用^[39],从而增加植物的生物量,提高其抗寒性;外源 6-BA 也可以提高植物体内 CAT、SOD、POD 的活性,增强其清除自由基的能力^[40],进而提高植株抗寒性。在本试验中,外施 6-BA 显著提高了西瓜幼苗叶片中 SOD、POD、CAT 的活性;而且随着低温胁迫时间的增加,3 种酶的活性的增加幅度增大,在胁迫第 5 天时 POD、CAT 的活性增加幅度最大。表明外源 6-BA 预处理可以提高西瓜幼苗的抗寒性,并且随着胁迫时间的延长促进作用增强。有研究还发现外施 GA₃ 能显著提高盐胁迫下幼苗生物量^[41],提高 SOD 和 POD 活性^[42-43]。这一结果也在本试验中得到印证,外施 GA₃ 显著提高了西瓜幼苗 CAT、SOD 和 POD 的活性,其中 SOD 和 POD 活性在第 5 天和第 7 天时还达到极显著水平。

与上述激素的效果不同,本实验中外源 NAA 预处理则显著降低了西瓜幼苗叶片 POD 的活性,并且 SOD 和 CAT 的活性在胁迫后期也显著降低,这与卢明等^[26]在网纹甜瓜和张林静等^[44]在山茱萸上的研究结果相似。阮志平^[45]在短穗鱼尾葵和谷战英等^[46]在圣诞红上的研究表明,SOD 的活性因 NAA 浓度和胁迫时间的不同,从而表现出不同的变化趋势,其原因是否与物种有关还有待进一步的研究。

综上所述,在低温胁迫条件下,叶面喷施外源 6-BA、GA₃、ABA 均能不同程度地降低西瓜幼苗的冷害指数,且 6-BA 和 ABA 预处理效果更好一些;降低其 MDA 和 H₂O₂ 含量及 O₂⁻ 产生速率,并以 6-BA 处理对缓解活性氧积累的效果相对较好;提高其 SOD、POD、CAT 活性,以 ABA 对提高抗氧化酶活性的效果相对较好;因此适宜浓度的 6-BA 和 ABA 可通过降低活性氧的含量、提高抗氧化酶的活性来缓解低温对西瓜幼苗造成的伤害,但是 ABA 提取复杂,且价格高于 6-BA,因此从生产和实用的角度考虑,外施 6-BA 提高西瓜抗寒性更加经济高效,可以应用与生产。而喷施 NAA 不但不能提高西瓜幼苗的抗寒性,反而降低了其抗寒性。

参考文献:

- [1] YADAV S K. Cold stress tolerance mechanisms in plants[J]. *Agron. Sustain. Dev.*, 2010, 30: 515-527.
- [2] HEIDARVAND L, AMIRI R M. What happens in plant molecular responses to cold stress?[J]. *Acta Physiol. Plant.*, 2010, 32: 419-431.
- [3] HUANG Q F(黄秋凤), LUO X L(罗兴录), WANG CH L(王春莲), *et al.* Effects of low temperature stress on physiological and biochem-

- ical characteristics of Cassava seedling[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(17): 172—177 (in Chinese).
- [4] WU X X (吴雪霞), CHEN J L (陈建林), ZHA D SH (查丁石). Effects of low temperature stress on photosynthetic characteristics in leaves of eggplant seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2008, **23**(5): 185—189 (in Chinese).
- [5] LIU H Y (刘慧英), ZHU ZH J (朱祝军), LÜ G H (吕国华). Effect of low temperature stress on chilling tolerance and protective system against active oxygen of grafted watermelon[J]. *Chin. J. App. Ecol.* (应用生态学报), 2004, **15**(4): 659—662 (in Chinese).
- [6] GUO SH (郭 尚), WANG X Y (王秀英). Application of external hormones to watermelon in the greenhouse[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences* (山西农业科学), 2006, **34**(4): 42—44 (in Chinese).
- [7] 许智宏, 薛红卫. 植物激素作用的分子机理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [8] REN X Q (任旭琴), LIU M Q (刘美琴), CHEN G L (陈葛亮), *et al.* Effect of exogenous ABA on chilling resistance in pepper[J]. *Journal of Changjiang Vegetables* (长江蔬菜), 2009, (8): 30—32 (in Chinese).
- [9] WANG X (王 兴), XU CH (徐 琛), CANG J (苍 晶), *et al.* Exogenous 6-BA affects seed germination and mitigates the frost damage of plants in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2013, **33**(2): 357—363 (in Chinese).
- [10] FAN X Y (范小玉), ZHANG X (张 显). The effect of brassinolide on chilling resistance of watermelon seedlings under low temperature and poor light stress[J]. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2012, (7): 5—8 (in Chinese).
- [11] MISHRA H P, FRIDOVICH I. The role of superoxide anion in autooxidation of the epinephrine and a sample assay for superoxide dismutase[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1972, **247**(10): 3 170—3 175.
- [12] X · H · 波钦诺克. 植物生物化学分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 195.
- [14] LIN ZH F (林植芳), LIN G ZH (林桂珠), LI SH SH (李双顺), *et al.* The concentration change of superoxide anion and organic free radicals in old leaves and chloroplast[J]. *Acta Phytophysiological Sinica* (植物生理学报), 1988, **14**(3): 238—243 (in Chinese).
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 西安: 世界图书出版社, 2000: 192—201.
- [16] KE D S, WANG A G, SUN G C, *et al.* The effect of active oxygen on the activity of ACC synthase induced by exogenous IAA[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2002, **44**(5): 551—556.
- [17] ZHANG A H (张爱华), WANG J H (王静华), LI Y M (李艳梅), *et al.* Appraising of watermelon germplasm resources of chilling tolerance[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(18): 219—223 (in Chinese).
- [18] SU Y H (苏玉环), ZHAO J F (赵金锋), ZHANG X F (张晓芳), *et al.* Effects of low temperature stress on seed germination and seedling growth of watermelon[J]. *Seed* (种子), 2008, **27**(7): 57—60 (in Chinese).
- [19] 庞士铨. 植物逆境生理学基础[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1990.
- [20] GAI Y P, LI X Z, JI X L, *et al.* Chilling stress accelerates degradation of seed storage protein and photosynthetic protein during cotton seed germination[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, 194: 278—288.
- [21] APEL K, HIRT H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, **55**: 373—399.
- [22] CAO H L, DUMONT F, MARECHAL P A, *et al.* Rates of chilling to 0 °C: implications for the survival of microorganisms and relationship with membrane fluidity modifications[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **77**(6): 1 379—1 387.
- [23] NAYYAR H, BAINS T S, KUMAR S. Chilling stressed chickpea seedlings: effect of cold acclimation, calcium and abscisic acid on cryoprotective solutes and oxidative damage[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, **54**(3): 275—285.
- [24] TANG R SH (汤日圣), TANG X H (唐现洪), ZHONG Y (钟 雨), *et al.* Effect of microorganism-sourced ABA on chilling resistance and some physiological indexes in eggplant seedling[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2006, **33**(1): 149—151 (in Chinese).
- [25] LÜ J (吕 俊), ZHU L Q (朱利泉), SHEN F CH (沈福成), *et al.* Study on the role of catalase which induced by 6-BA under cold stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2005, **21**(12): 64—66 (in Chinese).
- [26] WANG S G (王三根), LIANG Y (梁 颖). Protection of 6-benzyladenine on cell membrane system of rice seedlings under chilling stress[J]. *Chinese J. Rice Sci.* (中国水稻科学), 1995, **9**(4): 223—229 (in Chinese).
- [27] LU M (卢 明), DENG ZH Y (邓征宇), CHEN Y M (陈豫梅), *et al.* Effects of exogenous substances on cold resistance of muskmelon seedlings[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology* (福建农业科技), 2012, (3/4): 122—123 (in Chinese).
- [28] WANG Y (王 艳), LI J L (李建龙), JIANG T (姜 涛), *et al.* Effect of pre-treatments with SA, H₂O₂ and 6-BA on chilling tolerance in *Zoysia matrella* [J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2010, **19**(2): 76—81 (in Chinese).
- [29] ZHOU Q (周 琴), SUN X F (孙小芳), GUO Y L (郭月玲), *et al.* Effects of 6-BA and PP₃₃₃ on the ability of freezing tolerance of oil rape (*Brassica napus*) seedling[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences* (中国油料作物学报), 2007, **29**(3): 286—290 (in Chinese).

- [30] QU Y Y(曲亚英), YU J H(郁继华), TAO X L(陶兴林), *et al.* Effect of seed soaked with S3307 and IBA+NAA on cold resistance of sweet pepper seedlings[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*(甘肃农业大学学报), 2006, **41**(4): 52—55(in Chinese).
- [31] HUA CH(华 春), ZHOU Q CH(周泉澄), WANG X P(王小平), *et al.* Effects of exogenous GA₃ on germination and seedling growth of *Salicornia bigelovii* Torr. under NaCl stress[J]. *Journal of Nanjing Normal University*(Nat. Sci. Edi.)(南京师大学报·自然科学版), 2007, **30**(1): 82—87(in Chinese).
- [32] RON M, SANDY V, MARTIN G, *et al.* Reactive oxygen gene network of plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2004, **9**(10): 490—498.
- [33] XIA X J, WANG Y J, ZHOU Y H, *et al.* Reactive oxygen species are involved in brassinosteroid induced stress tolerance in cucumber[J]. *Plant Physiology*, 2009, **150**(2): 801.
- [34] ZOU ZH R(邹志荣), LU G Y(陆幅一). Effect of ABA on chill-resistant pepper seedlings[J]. *Acta Univ. Agric. Boreali-Occidentalis*(西北农业大学学报), 1996, **24**(6): 60—64(in Chinese).
- [35] GUO F L(郭风领), LU Y H(卢育华), LI B G(李宝光). Effect of exogenous ABA on chilling-resistance during seedling and florescence in tomato[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*(Nat. Sci. Edi.)(山东农业大学学报·自然科学版), 2000, **31**(4): 357—362(in Chinese).
- [36] BAI J(白 洁), JIANG W J(蒋卫杰), YU H J(余宏军), *et al.* Effect of extrinsic ABA, put and BR on protective enzyme activities of tomato seedlings under sub-optimal temperature[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*(中国农学通报), 2007, **23**(6): 317—320(in Chinese).
- [37] HE L S(何丽斯), XIA B(夏 冰), MENG X J(孟祥静), *et al.* Effect of salicylic acid and abscisic acid on physiological characteristics of seedlings under low temperature stress[J]. *Jiangsu J. of Agr. Sci.*(江苏农业学报), 2011, **27**(5): 1 083—1 088(in Chinese).
- [38] LIU P(刘 璞), CHEN J(陈 珈). Absciscic acid signal transduction[J]. *Plant Physiology Communications*(植物生理学通讯), 2000, **36**(2): 165—170(in Chinese).
- [39] DONG Y H(董永华), SHI J P(史吉平), ZHOU H X(周慧欣). Effect of 6-BA on drought resistance in wheat seedlings[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报), 1999, **5**(1): 72—75(in Chinese).
- [40] WANG Y, YANG Z M, ZHANG Q F, *et al.* Enhanced chilling tolerance in *Zoysia matrella* by pretreatment with salicylic acid, calcium chloride, hydrogen peroxide or 6-benzylaminopurine[J]. *Biologia Plantarum*, 2009, **53**(1): 179—182.
- [41] ZHENG P SH(郑平生), JIN F(金 芳), YAN L P(燕丽萍). Effect of exogenous hormones on growth of strawberry test-tube plantlets in salt stress[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*(甘肃农业大学学报), 2004, **39**(3): 277—280(in Chinese).
- [42] YU H F(虞慧芳), CAO J SH(曹家树), WU T(武 涛). Physiological response of dwarf pumpkin on exogenous GA₃ treatment[J]. *Acta Horticulturae Sinica*(园艺学报), 2006, **33**(6): 1 331—1 334(in Chinese).
- [43] SINGH S, RAM T. Biochemical response of rice genotypes to exogenous gibberellic acid[J]. *International Rice Research Notes*, 2003, **28**(1): 68—69.
- [44] ZHANG L J(张林静), YUAN Y J(原跃军), WANG CH G(王诚刚), *et al.* Physiological effects of NAA and SA on seed germination of *Cornus officinalis*[J]. *Journal of Shanxi Normal University*(Nat. Sci. Edi.)(山西师范大学学报·自然科学版), 2006, **20**(4): 75—79(in Chinese).
- [45] RUAN ZH P(阮志平). Comprehensive evaluation of NAA on *Caryota mitis* cold tolerance[J]. *Journal of Northwest Forestry University*(西北林学院学报), 2012, **27**(3): 39—43(in Chinese).
- [46] GU ZH Y(谷战英), XIE B X(谢碧霞), LIANG W B(梁文斌), *et al.* Effects of NAA treatment on drought resistance of *Euphorbia pulcherrima* seedlings[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*(Nat. Sci. Edi.)(中南林业科技大学学报·自然科学版), 2008, **28**(5): 64—67(in Chinese).