

外源 SA 和 CaCl_2 对低温胁迫下 糯玉米幼苗生理特性的影响

杜锦¹, 向春阳¹, 丁建文², 辛德财¹, 张晓辰², 杨兴²

(1. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300392; 2. 天津中天润农科技有限公司, 天津 300450)

摘要: 早春糯玉米易遭受低温冷害的影响, 为探讨外源物对糯玉米幼苗低温胁迫的缓解作用, 以‘万糯 2000’、‘润糯 73’为试验材料, 分别采用 0、25、50、100、150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 水杨酸 (SA) 和 0、40、80、120、160 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理糯玉米幼苗, 研究外源 SA 和 CaCl_2 对低温胁迫下玉米幼苗生理特性的影响。结果表明: 适宜浓度 SA、 CaCl_2 处理下, ‘万糯 2000’ 和 ‘润糯 73’ 幼苗叶片可溶性蛋白、脯氨酸含量分别较各自对照增加 42.9%、18.3% 和 96.1%、16.7%, 过氧化氢酶和过氧化物酶活性分别提高 231.0%、76.5% 和 9.5%、13.9%, 丙二醛含量分别降低 78.7%、67.1%, 缓解了低温胁迫对糯玉米幼苗的伤害。‘万糯 2000’ 和 ‘润糯 73’ 适宜的 CaCl_2 处理浓度均为 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; ‘万糯 2000’ 适宜的 SA 处理浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, ‘润糯 73’ 适宜的 SA 处理浓度为 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。综合比较分析, 喷施 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 可有效提高糯玉米幼苗的耐低温能力。

关键词: 外源 SA; 外源 CaCl_2 ; 糯玉米; 低温胁迫; 生理特性

中图分类号: S513; Q945.78 **文献标志码:** A

Effects of exogenous salicylic acid and calcium chloride on physiology of waxy maize seedlings under low temperature stress

DU Jin¹, XIANG Chunyang¹, DING Jianwen², XIN Decai¹, ZHANG Xiaochen², YANG Xing²

(1. College of Agronomy & Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin, 300392, China;

2. Tianjin Zhongtian Runnong Technology Co., Ltd, Tianjin, 300450, China)

Abstract: Waxy maize is susceptible to low temperature and chilling injury in early spring. In order to explore the effect of exogenous substances on the low temperature stress, ‘Wannuo 2000’ and ‘Runnuo 73’ were used as experimental materials, and waxy maize seedlings were treated with 0, 25, 50, 100, 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ salicylic acid (SA) and 0, 40, 80, 120, 160 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ calcium chloride (CaCl_2). The effects of exogenous SA and CaCl_2 on physiological characteristics of maize seedlings under low temperature stress were studied. The results showed that the contents of soluble protein and proline of ‘Wannuo 2000’ and ‘Runnuo 73’ seedlings increased by 42.9%, 18.3%, 96.1% and 16.7% compared with the control, and the activities of catalase and peroxidase increased by 231.0%, 76.5%, 9.5% and 13.9%, which the malondialdehyde content was reduced by 78.7% and 67.1% respectively. The suitable CaCl_2 treatment concentration for ‘Wannuo 2000’ and ‘Runnuo 73’ was 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, the suitable SA treatment concentration for ‘Wannuo 2000’ was 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the suitable SA treatment concentration for ‘Runnuo 73’ was 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Through comprehensive comparative analysis, spraying 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 effectively improved the low temperature tolerance of waxy maize seedlings.

Keywords: exogenous salicylic acid; exogenous CaCl_2 ; waxy maize; low temperature stress; physiological characters

收稿日期: 2022-11-14

修回日期: 2023-04-04

基金项目: 天津市高等学校基本科研业务费资助项目 (2019KJ040); 天津市农业科技成果转化与推广项目 (202101090); 天津市企业科技特派员项目 (22YDTPJC00960); 天津市科技帮扶项目 (22ZXBTSN00070)

作者简介: 杜锦 (1984-), 男, 山西阳泉人, 实验师, 主要从事鲜食玉米遗传育种与种子抗逆机理研究。E-mail: 401558171@qq.com

通信作者: 向春阳 (1965-), 男, 湖北武汉人, 教授, 主要从事作物遗传育种和种子科学与技术研究。E-mail: xxccyy2000@sohu.com

温度是植物生长过程中所必需条件之一,当温度低于植物的生物学零度,植物体内的细胞分裂和生长受到抑制^[1],导致植物生长缓慢或停止生长。我国糯玉米种植面积和产量均居世界第一,近年来呈不断上升趋势。糯玉米又称蜡质玉米,受隐性基因 *wx* 控制,支链淀粉占胚乳中淀粉的比重达 100%^[2]。玉米是喜温作物,在生长发育阶段对温度较敏感,早春播种的糯玉米易遭受倒春寒等低温冷害带来的不利影响^[3],严重的会造成玉米减产或绝收。如何提高糯玉米幼苗的抗寒能力是急需解决的问题。水杨酸(SA)被普遍认为是植物体内的一种源信号物质,能够增强植物在各种逆境条件下的生存能力,提高植物对多种非生物逆境的抵御能力^[4];Ca²⁺是植物体内的第二信使,起到保护膜结构和维持膜完整性的作用,提高植物抗性。前人针对外源脯氨酸、甜菜碱、SA、CaCl₂、ABA、NO、海藻糖等^[5-10]对低温胁迫玉米萌发和幼苗生长进行了大量的研究,但主要集中在普通玉米品种,针对糯玉米方面的研究还比较少。

本研究通过对不同抗性糯玉米苗期喷施外源 SA 和 CaCl₂,探究低温胁迫下糯玉米幼苗的生理响应,为早春糯玉米喷施外源物抵御低温胁迫提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年 3~11 月在天津农学院种子实验室进行。在前期研究的基础上,选用‘万糯 2000’(抗寒性弱)、“润糯 73”(抗寒性强)两个糯玉米品种为试验材料,‘万糯 2000’购于种子店,‘润糯 73’由天津中天润农科技有限公司提供。

1.2 试验方法

采用土培法进行发芽试验,将玉米种子用 1% NaClO 消毒 10 min,用蒸馏水清洗备用。用规格为 17.5 cm×11.5 cm×7.5 cm 发芽盒播种,每个发芽盒播种 15 穴,播深为 2 cm,放到培养箱中培养,每天光照 12 h,黑暗处理 12 h,光照强度 5 500 lx,苗期正常管理。将玉米幼苗培养至三叶一心期,用 SA 和 CaCl₂溶液对玉米幼苗进行叶面喷施处理,CaCl₂浓度分别为 0、40、80、120、160 mmol·L⁻¹,SA 浓度分别为 0、25、50、100、150 mg·L⁻¹,每盒喷施量 10 mL,喷施完 24 h 后转移到 4℃ 下低温处理,处理时间为 2 d,然后转移到 25℃ 光照培养箱中,恢复生长 3 d,取叶片测定相关指标。

1.3 测定指标与方法

采用考马斯亮蓝 G-250 测定可溶性蛋白质含量;愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)的活性;TBA 法测定丙二醛(MDA)含量;蒽酮法测定可溶性糖含量;酸性茚三酮法测定脯氨酸(Pro)含量;钼酸铵法测定过氧化氢酶(CAT)活性;羟胺法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性。

各指标性状相对值 = 各处理测定值/对照测定值×100%

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析,采用 Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 外源 CaCl₂、SA 对低温胁迫下糯玉米可溶性蛋白含量的影响

由图 1A 可以看出,玉米幼苗受到低温胁迫时,外源 CaCl₂处理下‘万糯 2000’和‘润糯 73’可溶性蛋白含量均呈先升后降趋势。在 40 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下‘万糯 2000’和‘润糯 73’可溶性蛋白含量均达到最大值,分别为 8.74 μg·g⁻¹和 13.07 μg·g⁻¹,均显著高于对照处理($P < 0.05$),分别较对照增加了 41.3%和 11.6%。80 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下,‘万糯 2000’可溶性蛋白含量显著高于对照处理;‘润糯 73’和对照差异不显著。120 mmol·L⁻¹和 180 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下‘万糯 2000’可溶性蛋白含量显著低于 40 mmol·L⁻¹和 80 mmol·L⁻¹处理,但与对照差异不显著;120 mmol·L⁻¹和 180 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理下‘润糯 73’可溶性蛋白含量显著低于对照处理。相同浓度 CaCl₂处理下,‘万糯 2000’可溶性蛋白含量均低于‘润糯 73’。

外源 SA 处理下‘万糯 2000’和‘润糯 73’可溶性蛋白含量均呈先降后升再降低趋势(图 1B)。SA 浓度为 100 mg·L⁻¹时,‘万糯 2000’可溶性蛋白含量达到最大(10.75 μg·g⁻¹),较对照显著增加了 44.4%。25 mg·L⁻¹和 50 mg·L⁻¹ SA 处理下,‘万糯 2000’可溶性蛋白含量均显著低于对照,较对照分别降低了 37.9%和 21.3%。150 mg·L⁻¹ SA 处理下,‘万糯 2000’可溶性蛋白含量显著高于对照,较对照增加了 29.7%。SA 浓度为 50 mg·L⁻¹时,‘润糯 73’可溶性蛋白含量达到最大(12.93 μg·g⁻¹),与对照差异不显著。25 mg·L⁻¹和 100 mg·L⁻¹ SA 处理下,‘润糯 73’可溶性蛋白含量低于对照,但差异不显著。SA 浓度为 150 mg·L⁻¹时,‘润糯 73’可溶性蛋白含量显著低于对照,较对照降低了 22.2%。

2.2 外源 CaCl_2 、SA 对低温胁迫下糯玉米可溶性糖含量的影响

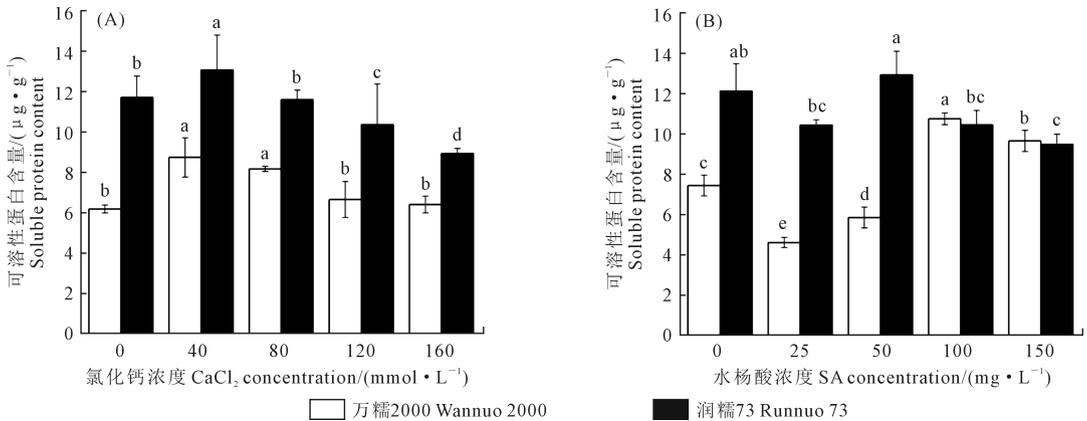
从图 2A 可知,外源 CaCl_2 处理下‘万糯 2000’可溶性糖含量呈先降后升趋势,0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下‘万糯 2000’可溶性糖含量显著高于其他处理;40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 80 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下可溶性糖含量显著低于其他处理;120 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 160 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下可溶性糖含量显著低于对照,较对照分别降低 0.23 和 0.19 个百分点。外源 CaCl_2 处理下‘润糯 73’可溶性糖含量呈双峰趋势,在 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下‘润糯 73’可溶性糖含量最大,80 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 160 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下可溶性糖含量均显著低于对照,较对照分别降低 0.017 和 0.223 个百分点;120 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下可溶性糖含量与对照差异不显著。

外源 SA 处理下‘万糯 2000’可溶性糖含量呈先

降后升再降低趋势(图 2B),100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理下可溶性糖含量达到最大,显著高于其他处理;50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理下可溶性糖含量低于对照,但差异不显著;25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理下可溶性糖含量显著低于对照,较对照降低 0.19 个百分点。外源 SA 处理下‘润糯 73’可溶性糖含量呈先升后降趋势,不同浓度 SA 处理下可溶性糖含量的排序为:50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ > 25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ > 0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ > 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ > 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,各处理与对照差异均未达到显著水平。

2.3 外源 CaCl_2 、SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗叶片酶活性的影响

如图 3A 可知,低温胁迫下,‘万糯 2000’和‘润糯 73’的 CAT 活性随 CaCl_2 浓度增加均呈先升后降趋势。在 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下,‘万糯 2000’和‘润糯 73’CAT 活性达到最大,分别较对照增加



注:图中不同小写字母表示同一品种不同处理间的差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between different treatment during same variety ($P < 0.05$). The same below.

图 1 CaCl_2 和 SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig.1 Effect of calcium chloride and salicylic acid on soluble protein content of waxy maize seedlings under chilling stress

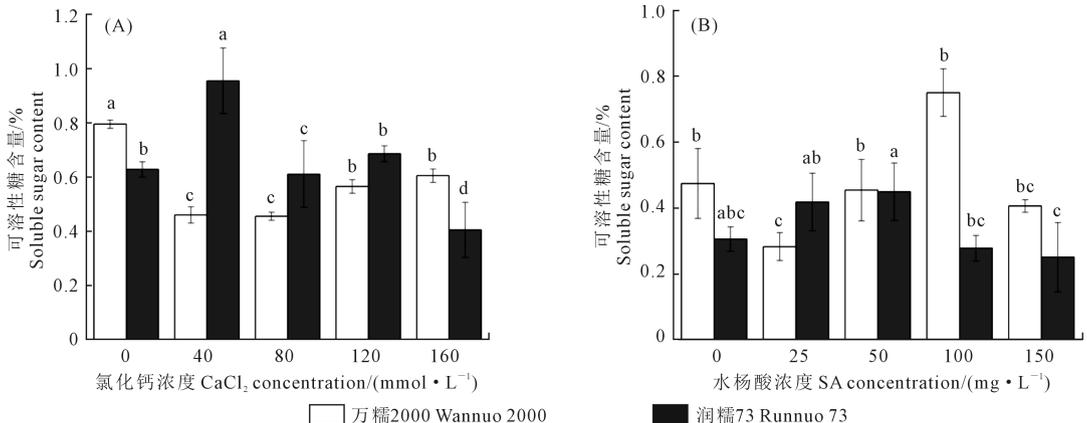


图 2 CaCl_2 和 SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗可溶性糖含量的影响

Fig.2 Effect of calcium chloride and salicylic acid on soluble sugar content of waxy maize seedlings under chilling stress

10.4%和 22.0%。80 mmol · L⁻¹ CaCl₂ 处理下,两个品种 CAT 活性均低于对照,但差异不显著。160 mmol · L⁻¹ CaCl₂ 处理下,‘万糯 2000’和‘润糯 73’ CAT 活性最低,分别较各自对照降低 37.1%和 58.9%。

在低温胁迫下,‘万糯 2000’和‘润糯 73’CAT 活性随 SA 浓度的增加均呈先升后降趋势(图 3B)。SA 浓度为 100 mg · L⁻¹时,‘万糯 2000’CAT 活性达到最大值,显著高于对照,为对照的 5.5 倍;‘润糯 73’CAT 活性在 SA 浓度为 50 mg · L⁻¹时达到最大,为对照的 2.3 倍。在 25~150 mg · L⁻¹SA 处理下,‘万糯 2000’CAT 活性均显著高于对照处理,可见 SA 处理可以提高‘万糯 2000’CAT 活性。在 25 mg · L⁻¹和 50 mg · L⁻¹SA 处理下,‘润糯 73’CAT 活性显著高于对照,在 100 mg · L⁻¹和 150 mg · L⁻¹SA 处理下,‘润糯 73’CAT 活性高于对照,但差异不显著。

糯玉米 POD 活性随 CaCl₂浓度增加呈先升后降趋势(图 4A)。“万糯 2000”在 40 mmol · L⁻¹CaCl₂ 处理下 POD 活性达到最大值,显著高于其他处理,

较对照增加 5.1%;80、120、160 mmol · L⁻¹CaCl₂ 处理下‘万糯 2000’的 POD 活性均显著低于对照,160 mmol · L⁻¹CaCl₂ 处理下 POD 活性最低。80 mmol · L⁻¹外源 CaCl₂ 处理下,‘润糯 73’的 POD 活性达到最大值,显著高于其他处理,较对照增加了 11.2%;160 mmol · L⁻¹CaCl₂ 处理下‘润糯 73’的 POD 活性最低。

糯玉米 POD 活性随外源 SA 浓度增加整体呈先升后降趋势(图 4B)。SA 浓度为 100 mg · L⁻¹时,‘万糯 2000’的 POD 活性达到最大,较对照显著增加了 14.0%,其余处理与对照差异不显著。SA 浓度为 50 mg · L⁻¹时,‘润糯 73’POD 活性最大,较对照显著增加了 22.9%。150 mg · L⁻¹SA 处理下,‘润糯 73’POD 活性最低,与对照差异不显著。

由图 5A 可知,‘万糯 2000’的 SOD 活性随 CaCl₂浓度增加呈先降后升趋势,在 40 mg · L⁻¹和 80 mmol · L⁻¹外源 CaCl₂ 处理下显著低于对照,较对照分别降低了 25.5%和 24.3%,其他处理与对照差异不显著;‘润糯 73’的 SOD 活性呈先升后降趋势,在

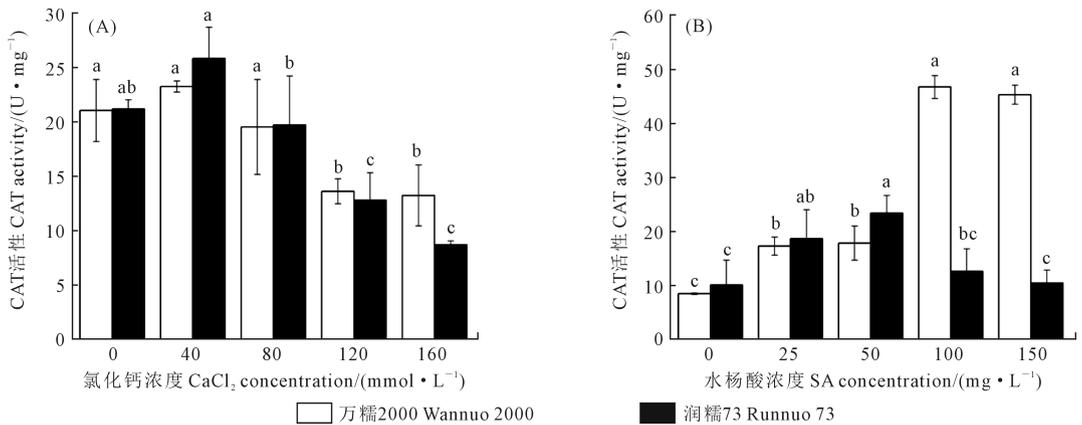


图 3 CaCl₂ 和 SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗 CAT 活性的影响

Fig.3 Effect of calcium chloride and salicylic acid on CAT activity of waxy maize seedlings under chilling stress

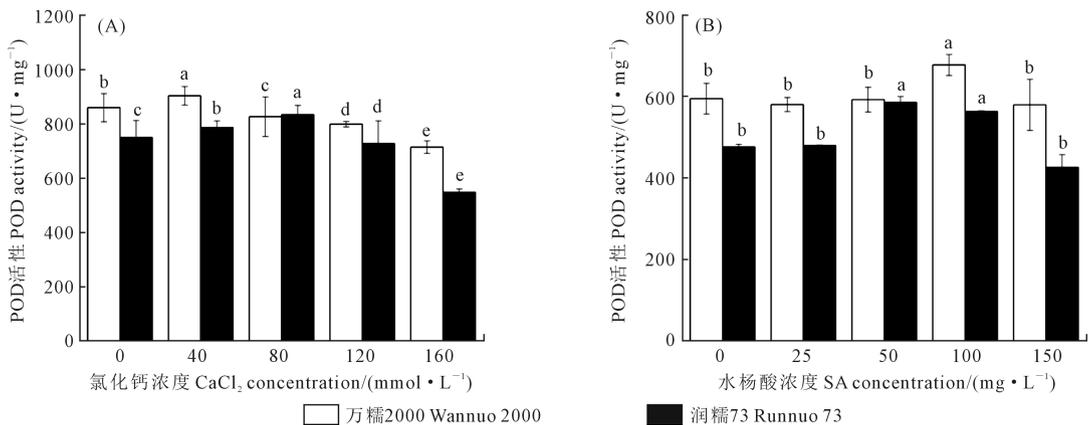


图 4 CaCl₂ 和 SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗 POD 活性的影响

Fig.4 Effect of calcium chloride and salicylic acid on POD activity of waxy maize seedlings under chilling stress

CaCl₂浓度为 40 mmol · L⁻¹时 SOD 活性最大,较对照显著增加了 37.7%,其他处理均显著低于对照。

由图 5B 可知,‘万糯 2000’ SOD 活性随 SA 浓度增加总体呈先升后降趋势,当 SA 浓度为 100 mg · L⁻¹时,‘万糯 2000’的 SOD 活性最高,较对照增加了 124.4%;50 mg · L⁻¹ SA 处理下的 SOD 活性显著高于对照;25 mg · L⁻¹和 150 mg · L⁻¹ SA 处理下, SOD 活性略低于对照,但差异未达到显著水平。当 SA 浓度为 100 mg · L⁻¹时,‘润糯 73’的 SOD 活性最高,较对照显著增加了 13.1%;50 mg · L⁻¹ SA 处理下, SOD 活性显著高于对照;25 mg · L⁻¹ SA 处理下, SOD 活性低于对照,二者差异不显著。

2.4 外源 CaCl₂、SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗脯氨酸和丙二醛含量的影响

‘万糯 2000’和‘润糯 73’Pro 含量随 CaCl₂浓度增加呈先升后降趋势(图 6A)。在 40 mmol · L⁻¹ CaCl₂处理下,两个品种的 Pro 含量均达到最大值,分别较对照显著增加了 10.6%和 8.8%。外源 CaCl₂高于 80 mmol · L⁻¹时,两个品种的 Pro 含量显著下降,在 160 mmol · L⁻¹ CaCl₂处理下 Pro 含量降到最低。

由图 6B 可以看出,SA 处理下,‘万糯 2000’和‘润糯 73’Pro 含量整体呈现先降后升再降趋势。SA 浓度为 100 mg · L⁻¹时,‘万糯 2000’Pro 含量最大,较对照显著增加了 181.6%;50 mg · L⁻¹和 150 mg · L⁻¹ SA 处理下的 Pro 含量均高于对照;25 mg · L⁻¹ SA 处理下‘万糯 2000’Pro 含量低于对照处理,差异未达到显著水平。当 SA 浓度为 50 mg · L⁻¹时,‘润糯 73’Pro 含量最大,较对照增加了 24.5%;100 mg · L⁻¹和 150 mg · L⁻¹ SA 处理下,Pro 含量显著低于对照;25 mg · L⁻¹ SA 处理下‘润糯 73’Pro 含量低于对照,差异未达到显著水平。

CaCl₂处理下,两个品种的 MDA 含量均呈先降后升趋势(图 7A)。“万糯 2000”在 40 mmol · L⁻¹ CaCl₂处理下 MDA 含量最低,较对照显著降低了 89.8%;CaCl₂浓度高于 80 mmol · L⁻¹时,MDA 含量逐渐升高,在 160 mmol · L⁻¹处理下达到最大值,但与对照差异不显著。在 40 mmol · L⁻¹ CaCl₂处理下,‘润糯 73’MDA 含量达最低值,较对照显著降低了 78.5%;CaCl₂浓度高于 80 mmol · L⁻¹时,MDA 含量逐渐升高,在 160 mmol · L⁻¹处理下达到最大值,且显著高于对照。

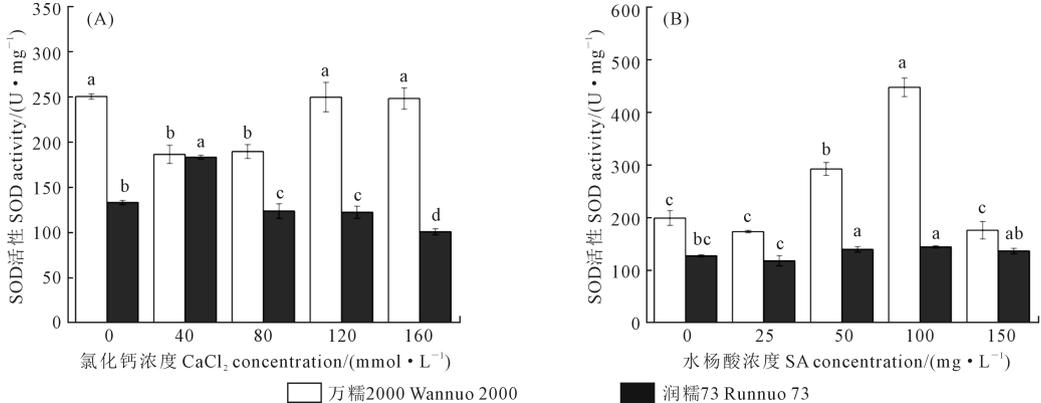


图 5 CaCl₂ 和 SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗 SOD 活性的影响

Fig.5 Effect of calcium chloride and salicylic acid on SOD activity of waxy maize seedlings under chilling stress

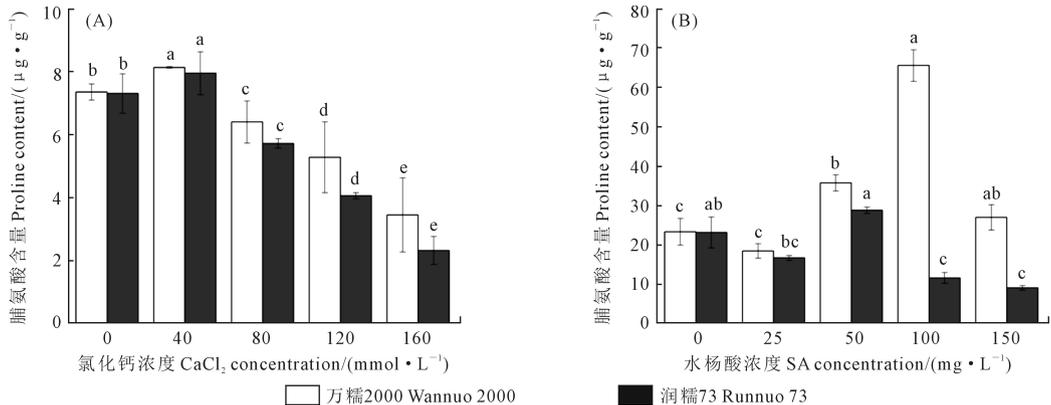


图 6 CaCl₂ 和 SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗脯氨酸含量的影响

Fig.6 Effect of calcium chloride and salicylic acid on proline content of waxy maize seedlings under chilling stress

‘万糯 2000’和‘润糯 73’MDA 含量随 SA 浓度增加呈先降后升趋势(图 7B)。SA 浓度 100 mg · L⁻¹时,‘万糯 2000’MDA 含量达到最低,较对照显著降低了 67.7%;50 mg · L⁻¹和 150 mg · L⁻¹SA 处理下 MDA 含量显著低于对照。当 SA 浓度为 50 mg · L⁻¹时,‘润糯 73’MDA 含量达到最低,较对照显著降低了 55.6%,其他处理‘润糯 73’MDA 含量均显著低于对照。

2.5 外源 CaCl₂、SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗各性状相对值的比较评价

研究发现,‘润糯 73’和‘万糯 2000’两个品种适宜的 CaCl₂处理浓度为 40 mmol · L⁻¹,‘润糯 73’

适宜的 SA 处理浓度为 50 mg · L⁻¹,‘万糯 2000’适宜的 SA 处理浓度为 100 mg · L⁻¹。为进一步筛选适宜的外源物,采用各指标性状相对值进行比较(表 1),40 mmol · L⁻¹CaCl₂处理下,可溶性糖含量、CAT、POD、SOD 活性和 Pro 含量的相对值较其他两个处理更接近对照;40 mmol · L⁻¹CaCl₂处理下叶片 MDA 的相对值为 0.16,低于 50 mg · L⁻¹和 100 mg · L⁻¹SA 处理,可见 40 mmol · L⁻¹CaCl₂处理有效防止 MDA 的积累,减少对植株的伤害。因此,40 mmol · L⁻¹CaCl₂为低温胁迫下糯玉米适宜的外源物处理浓度。

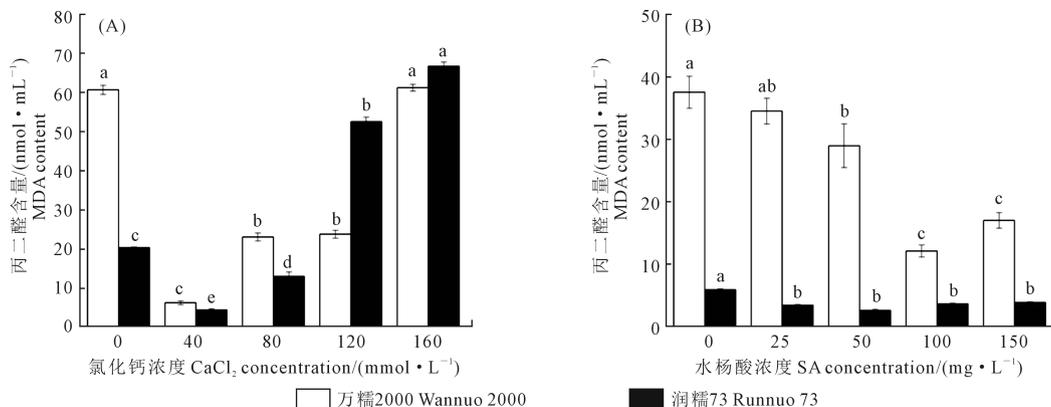


图 7 CaCl₂ 和 SA 对低温胁迫下糯玉米幼苗丙二醛含量的影响

Fig.7 Effect of calcium chloride and salicylic acid on MDA content of waxy maize seedlings under chilling stress

表 1 3 种处理下各指标性状相对值的比较分析

Table 1 Comparative analysis of the relative value of index under three treatments

处理 Treatment	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	可溶性糖含量 Soluble sugar content	CAT 活性 CAT activity	POD 活性 POD activity	SOD 活性 SOD activity	脯氨酸含量 Proline content	丙二醛含量 MDA content
40 mmol · L ⁻¹ CaCl ₂	1.26	1.05	1.16	1.05	1.06	1.10	0.16
50 mg · L ⁻¹ SA	1.07	1.47	2.31	1.23	1.10	1.24	0.44
100 mg · L ⁻¹ SA	1.44	1.58	5.51	1.14	2.24	2.82	0.32

3 讨论与结论

当植物遭遇逆境胁迫时,通过对外界刺激的识别进而产生和传递信号^[11],植物细胞的正常代谢受到干扰,体内一些渗透调节物质出现变化,调节植物适应逆境胁迫。可溶性蛋白、Pro 和可溶性糖是重要的渗透调节物质,对植物具有一定的抗性和保护作用^[12]。本研究发现,随着 CaCl₂浓度增加,可溶性蛋白含量整体呈先升后降趋势,40 mmol · L⁻¹CaCl₂处理下两个品种可溶性蛋白含量达到了最大值,而王芳等^[13]研究发现,10 mmol · L⁻¹Ca²⁺能促可溶性蛋白和可溶性糖的积累,过高浓度反而使其含量降低,可能因为其试验材料为普通玉米品种,与

本研究选用的糯玉米品种在抗低温能力上存在差异。

经适宜浓度的 CaCl₂和 SA 处理,‘润糯 73’品种叶片内可溶性糖含量均有所提升,与朱玉龙等^[14]研究结果一致;40~160 mmol · L⁻¹CaCl₂处理下,‘万糯 2000’可溶性糖含量随 CaCl₂浓度增加呈上升趋势,可溶性糖的含量低于对照,可能原因是 CaCl₂缓解了低温胁迫对玉米叶片的伤害,对照处理需要合成更多可溶性糖,发挥其渗透调节作用^[6]。Shakirova 等^[15]认为外源 SA 可能通过促进可溶性糖的水解反应来提高细胞可溶性糖的含量。本研究发现低浓度 SA 处理降低了可溶性糖含量,与许高平等^[16]研究结果一致;而 100 mg · L⁻¹SA 处理显著提高了可

溶性糖含量,说明适宜浓度 SA 促进细胞渗透调节物质的诱导,过高浓度 SA 反而抑制诱导物质的合成,孙晓春等^[17]研究发现过高浓度 SA 可能会抑制种子萌发和幼苗生长。

两个品种 Pro 含量随 CaCl_2 浓度增加整体呈现先升后降趋势,40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下 Pro 含量最大,孙玉珺^[18]研究低温胁迫下油菜素内酯对玉米幼苗的调控也得出相同的趋势;低温胁迫下,外源 SA 处理下两个品种 Pro 含量均呈现先升后降趋势,‘万糯 2000’在 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SA、‘润糯 73’在 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理下,Pro 含量最大。适宜浓度的外源 SA、 CaCl_2 提高了低温胁迫下糯玉米幼苗叶片 Pro 含量,维持细胞的渗透平衡,有效缓解了低温胁迫下糯玉米幼苗水分的散失,缓解了低温对糯玉米幼苗的伤害。赵小强等^[5]发现外源 Pro 或甜菜碱通过增加 Pro 和可溶性糖含量,降低相对电导率和 MDA 含量,显著缓解了低温胁迫对玉米幼苗的伤害。

酶促防御系统主要的保护酶有 CAT、POD、SOD,本研究表明外源 CaCl_2 处理糯玉米幼苗叶片 CAT、POD 和 SOD 活性整体呈现先升后降趋势,与胡丽涛^[19]研究结果一致。本研究发现 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理可提高‘润糯 73’的 CAT、POD、SOD 活性和‘万糯 2000’的 POD、CAT 活性,而杨德光等^[7]研究表明 80 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 浸种处理提高玉米的 POD 和 SOD 活性,对玉米低温胁迫的缓解效果最佳,可能原因是不同品种适宜的 CaCl_2 处理浓度有所差异。在 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理下‘润糯 73’CAT 和 POD 活性最高,‘万糯 2000’在 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 处理下 CAT、POD、SOD 活性最高,SA 浓度超过 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,3 种抗氧化酶活性降低,与王小媚等^[20]研究结果一致,均出现了低浓度 SA 提高抗氧化酶活性,高浓度抑制抗氧化酶活性现象。初敏等^[21]研究发现,外源 SA 提高了低温胁迫下萝卜幼苗 SOD 活性,抑制了 CAT 活性,与本研究适宜浓度 SA 提高 CAT 活性的研究结果不一致。

膜脂过氧化最终产物是丙二醛,MDA 能够降低抗氧化物的含量,抑制蛋白质的合成,使酶丧失活性,损害生物膜^[22]。本研究中糯玉米幼苗遭受低温胁迫后,MDA 随外源 CaCl_2 浓度升高呈先降后升趋势,这与于飞^[23]和张胜珍等^[24]研究结果一致;经过 SA 处理两个糯玉米品种 MDA 含量均有所下降,与王洋^[25]研究结果一致。一定浓度 CaCl_2 和 SA 处理后 MDA 含量降低,原因可能与外源物处理提高抗氧化酶活性有关。

低温对糯玉米幼苗造成了一定程度的伤害,一

定浓度的外源 CaCl_2 、SA 可提高糯玉米幼苗叶片中可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、抗氧化酶活性,提高 Pro 含量,抑制 MDA 含量的增加。两个品种适宜的 CaCl_2 处理浓度为 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,‘润糯 73’适宜的 SA 处理浓度为 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,‘万糯 2000’适宜的 SA 处理浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。综合分析,喷施 40 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 可以有效提高糯玉米幼苗对低温逆境的抗性。

参考文献:

- [1] SINGH B, REDDY K R, REDOÑA E D, et al. Screening of rice cultivars for morpho-physiological responses to early-season soil moisture stress[J]. *Rice Science*, 2017, 24(6): 322-335.
- [2] 宋旭东, 薛林, 张振良, 等. 鲜食糯玉米自交系果穗秃尖性状评价及其配合力分析[J]. *玉米科学*, 2022, 30(1): 8-14, 22. SONG X D, XUE L, ZHANG Z L, et al. Identification of ear tip-barneness length among waxy maize inbred lines and analysis on combining ability[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1): 8-14, 22.
- [3] 菅立群, 张翼飞, 杨克军, 等. 播种至苗期不同阶段低温对玉米幼苗生长及生理抗性的影响[J]. *作物杂志*, 2020, (6): 61-68. JIAN L Q, ZHANG Y F, YANG K J, et al. Effects of low temperature under different phases between sowing and seedling periods on growth and physiological resistance of maize seedlings[J]. *Crops*, 2020, (6): 61-68.
- [4] HORVÁTH E, SZALAI G, JANDA T. Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2007, 26(3): 290-300.
- [5] 赵小强, 彭云玲, 方鹏, 等. 不同外源调节物质对低温胁迫下玉米的缓解效应分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 184-193, 229. ZHAO X Q, PENG Y L, FANG P, et al. Mitigation effect analysis of different exogenous regulatory substances on maize under low-temperature stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 184-193, 229.
- [6] 杨小环, 赵维峰, 孙娜娜, 等. 外源水杨酸缓解低温胁迫对玉米种子萌发和早期幼苗生长伤害的生理机制[J]. *核农学报*, 2017, 31(9): 1811-1817. YANG X H, ZHAO W F, SUN N N, et al. Physiological mechanisms of exogenous salicylic acid-mediated low temperature tolerance in seed germination and early seedling growth of maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(9): 1811-1817.
- [7] 杨德光, 马月, 刘永玺, 等. 低温胁迫下外源 CaCl_2 对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(3): 83-88. YANG D G, MA Y, LIU Y X, et al. Effects of exogenous CaCl_2 on maize seed germination and seedling growth under low temperature stress[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(3): 83-88.
- [8] 石如意, 王腾飞, 李军, 等. 低温胁迫下外源 ABA 对玉米幼苗抗寒性的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(3): 136-143. SHI R Y, WANG T F, LI J, et al. Influences of exogenous ABA on cold resistance of maize seedlings under low temperature stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(3): 136-143.
- [9] 王芳, 李永生, 彭云玲, 等. 外源一氧化氮对玉米幼苗抗低温胁迫

- 的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 270-275.
- WANG F, LI Y S, PENG Y L, et al. Effects of exogenous nitric oxide on low temperature stress of maize seedlings[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 270-275.
- [10] 刘旋, 田礼欣, 佟昊阳, 等. 低温胁迫下玉米幼苗根系受外源海藻糖调控的生理表现[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2354-2361.
- LIU X, TIAN L X, TONG H Y, et al. Physiological manifestations of maize seedling roots regulated by exogenous trehalose under low temperature stress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2354-2361.
- [11] XU L L, FAN Z Y, DONG Y J, et al. Effects of exogenous salicylic acid and nitric oxide on physiological characteristics of two peanut cultivars under cadmium stress [J]. Biologia Plantarum, 2015, 59(1): 171-182.
- [12] 李海燕, 毕文双, 王焱, 等. 外源 ALA 对低温胁迫下玉米幼苗根系生长及生理特性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(2): 9-17.
- LI H Y, BI W S, WANG Y, et al. Effect of exogenous ALA on root growth and physiological characteristics of maize seedlings under low temperature stress[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(2): 9-17.
- [13] 王芳, 王丹丹, 赵娟, 等. 钙对低温胁迫下玉米幼苗氧化损伤的保护作用[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 155-160.
- WANG F, WANG D D, ZHAO J, et al. Positive effect of calcium on oxidative damage in maize seedling under chilling stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 155-160.
- [14] 朱玉龙, 王玺. 水杨酸包衣对低温胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(4): 68-71.
- ZHU Y L, WANG X. Effects of salicylic acid seed-coating on seed germination and seedling growth in maize under low temperature stress [J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(4): 68-71.
- [15] SHAKIROVA F M, SAKHABUTDINOVA A R, BEZRUKOVA M V, et al. Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity [J]. Plant Science, 2003, 164(3): 317-322.
- [16] 许高平, 刘秀峰, 袁文娅, 等. 水杨酸和甜菜碱浸种对低温干旱胁迫下玉米苗期生长的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 50-56.
- XU G P, LIU X F, YUAN W Y, et al. Effects of presoaking with salicylic acid and betaine on germination and seedling growth of maize under chilling and drought stresses [J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(6): 50-56.
- [17] 孙晓春, 张惠惠, 黄文静, 等. 干旱胁迫下水杨酸对桔梗种子萌发及植物激素的影响[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(10): 74-79.
- SUN X C, ZHANG H H, HUANG W J, et al. Influence of salicylic acid on seed germination and plant hormones of *Platycodon grandiflorum* under drought stress [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(10): 74-79.
- [18] 孙玉珺. 玉米芽期抗冷性筛选及低温胁迫下油菜素内酯对幼苗的调控效应研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- SUN Y J. Screening of cold resistance at bud stage of maize and effect of brassinolide on seedling under low temperature stress [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [19] 胡丽涛. 钙和钙效应剂对低温胁迫下小麦生理生化特性的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- HU L T. Effect of calcium and Ca²⁺ messenger on physiological and biochemical characteristics of winter wheat seedlings under low temperature stress [D]. Chongqing: Southwest University, 2010.
- [20] 王小娟, 唐文忠, 任惠, 等. 水杨酸对低温胁迫番木瓜幼苗生理指标及叶片组织结构的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(8): 1290-1296.
- WANG X M, TANG W Z, REN H, et al. Effects of salicylic acid on physiological index and tissue structure of *Carica papaya* L. seedling under cold stress [J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(8): 1290-1296.
- [21] 初敏, 王秀峰, 王淑芬, 等. 外源 SA 预处理对低温胁迫下萝卜幼苗的生理效应[J]. 西北农业学报, 2012, 21(2): 142-145, 183.
- CHU M, WANG X F, WANG S F, et al. Physiological effects of exogenous salicylic acid on radish seedlings under low temperature stress [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(2): 142-145, 183.
- [22] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害 [J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(2): 84-90.
- CHEN S Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell [J]. Plant Physiology Communications, 1991, 27(2): 84-90.
- [23] 于飞. 低温胁迫对玉米苗期和孕穗期主要生理特性的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
- YU F. Effects of low temperature stress on physiological characteristics of maize in seedling and booting stage [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013.
- [24] 张胜珍, 马艳芝. 氯化钙对盐胁迫下荆芥种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(7): 65-71.
- ZHANG S Z, MA Y Z. Effects of CaCl₂ on seed germination and seedling physiological characteristics of *Schizonepeta tenuifolia* Briq. under salt stress [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(7): 65-71.
- [25] 王洋. 水杨酸对不同耐寒型玉米种子和幼苗抗寒性的调控作用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- WANG Y. Study of the modulation effects of salicylic acid on chilling tolerance of seeds and seedlings in different chilling-tolerant maize [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.