

外源 ABA 和 Ca^{2+} 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗蔗糖代谢的影响

姜寒玉¹, 王旺田¹, 雷天翔², 何百璠³, 张金林⁴

(1. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008;
3. 甘肃紫轩酒业公司, 甘肃 嘉峪关 735100; 4. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 为了明确外源 ABA 及 Ca^{2+} 处理对低温条件下酿酒葡萄蔗糖代谢的影响, 以赤霞珠幼苗为试验材料, 研究了在不同浓度 ABA 和 Ca^{2+} 条件下, 5℃低温及 5℃低温后 25℃恢复(5℃和 5℃/25℃)两种条件下碳水化合物积累及蔗糖代谢关键酶活性的变化。结果表明: 两种处理条件下, 随着外源 ABA 和 Ca^{2+} 浓度的逐渐升高, 植株内蔗糖, 果糖, 葡萄糖和淀粉含量不断增加, 并且在 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ABA 或 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 浓度处理下植株内碳水化合物含量积累至最高, 依次较对照增加了 67.88%, 21.8%, 213.77%, 7.04%, 51.38%, 2.35%, 8.84%, 31.81% 或 72.81%, 35.37%, 123.57%, 36.44%, 25.90%, 28.67%, 210.56%, 210.90%。其中 ABA 处理后的葡萄糖含量在 5℃/25℃条件下较 5℃显著增加。两种处理条件下, 外源 ABA 及 CaCl_2 提高了赤霞珠幼苗蔗糖合成酶(SS), 蔗糖磷酸合成酶(PPS), 酸性转化酶(AI), 中性转化酶(NI)活性, 其中在 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ABA 或 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下 4 种蔗糖代谢关键酶活性显著增高, 依次较对照提高了 64.10%, 125.00%, 193.29%, 756.31%, 2 291.51%, 1 569.31%, 1 523.13%, 1 336.77% 或 26.42%, 20.38%, 30.75%, 58.30%, 111.63%, 14.14%, 14.32%, 66.39%。说明适宜浓度的 ABA 及 Ca^{2+} 处理可增强蔗糖代谢酶活性, 促进蔗糖转化, 提高碳水化合物含量, 从而增强幼苗的抗寒能力。研究结果为酿酒葡萄糖代谢物质及相关酶在外源 ABA 及 Ca^{2+} 处理下响应低温机理提供理论依据。

关键词: 酿酒葡萄; ABA; Ca^{2+} ; 低温; 室温恢复; 蔗糖代谢

中图分类号: S601 **文献标志码:** A

Effects of exogenous ABA and Ca^{2+} on sucrose metabolism in grape (*Vitisvinifera* L.) seedlings under low temperature treatment and recovery

JIANG Han-yu¹, WANG Wang-tian¹, LEI Tian-xiang², HE Bai-jun³, ZHANG Jin-lin⁴

(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Xining, Qinghai 810008, China;
3. Gansu Zixuan Wine Co., Ltd., Jiayuguan, Gansu 735100, China;
4. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: In order to figure out the responding mechanisms of exogenous abscisic acid (ABA) and Ca^{2+} on sucrose metabolism and key enzymes under low temperature, we measured the contents of sucrose, glucose, fructose and starch, the activities of sucrose-phosphate synthase (PPS), sucrose synthase (SS), acid invertase (AI) and neutral invertase (NI) in Cabernets (*Vitisvinifera* L.) leaves at 5℃ and recovery at 25℃ treatment. The results showed with the increase in concentrations of ABA or Ca^{2+} , the contents of sucrose, glucose, fructose and starch were increased significantly, and they were at the maximums when the concentrations of ABA or Ca^{2+} were 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ or 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, resulting in increases of 67.88%, 21.8%, 213.77%, 7.04%, 51.38%, 2.35%, 8.84%, and 31.81%, or 72.81%, 35.37%, 123.57%, 36.44%, 25.90%, 28.67%, 210.56%, and 210.90%, respectively; The activities of acid invertase (AI), neutral invertase (NI), sucrose-phosphate synthase (PPS) and sucrose synthase (SS) were also in-

收稿日期: 2015-09-27
基金项目: 国家自然科学基金(31560552); 甘肃省农业生物技术研究及应用开发项目(GNSW-2014-12, GNSW-2010-16); 甘肃省自然科学基金项目(506RJZA011)
作者简介: 姜寒玉(1980—), 女, 博士, 讲师, 主要从事作物逆境分子生物学研究。E-mail: jianghy@gsau.edu.cn。
共同第一作者: 王旺田(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事作物逆境分子生物学研究。E-mail: wangw@gsau.edu.cn。

creased markedly by 64.10%, 125.00%, 193.29%, 756.31%, 2 291.51%, 1 569.31%, 1 523.13%, and 1 336.77%, or 26.42%, 20.38%, 30.75%, 58.30%, 111.63%, 14.14%, 14.32%, and 66.39%, respectively. Our results provided evidence that exogenous ABA or Ca^{2+} may impose damages to grape seedlings caused by low temperature. Key components of the response are: enhanced the activities of AI, NI, SS and SPS, increased soluble sugar level in leaves, promoting cold resistance ability for seedling.

Keywords: *Vitisvinifera* L.; ABA; Ca^{2+} ; Low temperature; Sucrose metabolism

低温影响植物生长,发育和产量的形成,而低温胁迫下植物能够通过感知刺激和信号传导,从而启动各种防御机制来响应低温^[1]。ABA 和 Ca^{2+} 作为细胞的第二信使在植物的生长发育及对逆境的应答反应中具有重要的作用^[2-5]。研究发现外源 ABA 能够提高植株内源 ABA 的合成水平,诱导抗寒基因的表达及冷信号的传递,增强超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)等保护性酶的活性,增加可溶性糖和可溶性蛋白等渗透调节物质的含量,最终增强植物的抗冷性^[6-7]。

Ca^{2+} 是植物生长发育的必需元素之一,是植物抗偶联胞外信号与胞内生理反应的第二信使,在提高植物抗冷性上可能有两方面作用,一是通过稳定细胞壁,细胞膜结构和提高保护酶活性以增强植物的抗冷力,二是通过传递低温信息诱导抗冷基因的表达以提高植物的抗冷力^[8-10]。

可溶性糖是一种重要的渗透调节物质,其在植物体内积累有利于植物抗冷性的提高,对适应低温逆境起着重要的调节作用,可作为抗冷性的鉴定指标^[11]。可溶性糖主要由果糖,蔗糖和葡萄糖组成,这些糖类物质在体内的转换积累量与代谢相关酶的活性有关。而参与糖代谢的关键酶有转化酶(酸性转化酶 AI 和中性转化酶 NI),蔗糖合成酶(SS)及蔗糖磷酸合成酶(SPS)^[12]。

葡萄是具有优良食用品质和酿酒特性的多年生藤本落叶果树,其栽培面积和产量长期位居世界水果生产首位^[13]。我国的酿酒葡萄产业近年来发展迅速,其中西北地区的酿酒葡萄种植面积逐年增加,但该地区的春冷和冬寒对葡萄生长造成严重伤害。如西北地区的酿酒葡萄主栽品种赤霞珠抗寒性差,通常采用冬季下架埋土,春季出土的越冬方式,费时费工。因此低温已上升为影响西北地区葡萄产业迅速发展的瓶颈问题。目前,有关低温条件下 ABA 和 Ca^{2+} 对酿酒葡萄蔗糖代谢影响的研究尚未见报道。本研究以酿酒葡萄赤霞珠幼苗为材料,在低温及室温恢复条件下测定酿酒葡萄幼苗的蔗糖,果糖,葡萄糖,淀粉含量及 SPS,SS,NI 和 AI 的活性,探讨低温条件下外源 ABA 和 Ca^{2+} 与酿酒葡萄蔗糖代谢的关系,旨在为 ABA 和 Ca^{2+} 调控酿酒葡萄蔗糖代谢

应答低温的作用机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料处理

将生长健壮的赤霞珠茎段接种在 GS 培养基上,待长至 10 cm 左右时,继代接种于不同浓度 ABA ($1, 2, 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 CaCl_2 ($5, 15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的去 Ca^{2+} 的 GS 培养基上,置于光照强度 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光照时数 16 h/d 的光照培养箱中。待长至 5~6 片叶时,分为两种处理条件:5℃低温处理 24 h(低温处理,5℃);5℃低温处理 24 h 后 25℃室温恢复 24 h(低温恢复处理,5℃/25℃),分别测定幼苗可溶性糖含量及蔗糖代谢酶的活性变化。对照为培养基中不加 ABA 和 CaCl_2 生长的赤霞珠幼苗,培养条件同前。每个处理 3 个重复,每个重复 6 株幼苗。

1.2 试验方法

本研究测定了反映赤霞珠抗寒性的可溶性糖及蔗糖代谢关键酶活性等生理指标。蔗糖,葡萄糖,果糖含量的测定均参照蔡武成等的试验方法^[14],SS 活性测定参照 Douglas^[15] 和 Tsai - Mei^[16] 的方法,SPS 活性测定参照 Wardlaw^[17] 和 Yu^[18] 的方法,AI 和 NI 活性测定参照 Nielsen^[19] 的试验方法,淀粉含量的测定选用碘显色法^[20]。

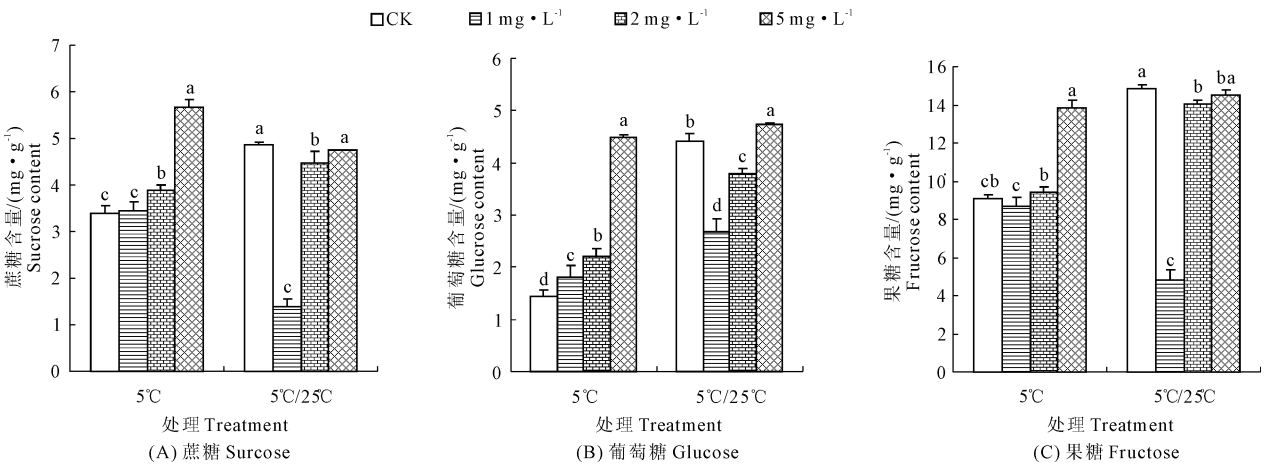
1.3 数据分析

采用 SPSS 16.0 等分析软件处理实验数据。

2 结果与分析

2.1 外源 ABA 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗可溶性糖含量的影响

对照植株的蔗糖,葡萄糖和果糖含量在 5℃/25℃ 处理条件下较 5℃ 分别增加了 44.01%, 208.87% 和 62.99%。在 5℃低温条件下,5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 处理较 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 处理,植株内蔗糖含量显著增加了 64.79% 和 45.90% (图 1A),葡萄糖含量则显著增加了 147.90% 和 103.26% (图 1B),果糖含量显著增加了 59.32% 和 46.87% (图 1C)。此外,除果糖外,蔗糖和葡萄糖含量经 ABA 处理后较对照均显著增加。



注:不同处理不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。
Note: Different treatments with the different letters mean significant difference by Duncan's test at $P < 0.05$. The same as below.

图 1 不同浓度 ABA 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗可溶性糖含量的影响
Fig.1 Influence of soluble sugar contents on Cabernet sauvignon plantlet under low-temperature and low-temperature-recovery with different ABA concentrations

在 5°C/25°C 处理下, 2 mg·L⁻¹ 和 5 mg·L⁻¹ ABA 处理较 1 mg/LABA 处理蔗糖含量显著增加, 增幅分别为 222.61% 和 244.15% (图 1A), 葡萄糖含量则显著增加了 41.35% 和 76.88% (图 1B), 果糖含量显著增加了 191.57% 和 200.99% (图 1C)。此外, 三种可溶性糖含量经 1 mg·L⁻¹ 和 2 mg·L⁻¹ ABA 处理后较对照显著降低, 而在 5 mg·L⁻¹ ABA 处理下除葡萄糖外二者无显著差异。

总体而言, 赤霞珠植株在两种处理条件下, 蔗糖, 果糖和葡萄糖均呈现一致的变化趋势 (图 1)。说明外源 ABA 的加入可以显著提高低温条件下赤霞珠幼苗内蔗糖, 果糖和葡萄糖含量, 而对低温恢复条件下上述指标无显著影响。

2.2 外源 Ca^{2+} 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗各种糖含量的影响

对照植株在 5°C/25°C 处理下蔗糖, 葡萄糖和果糖含量均增加, 其含量分别增加了 45.43%, 182.62% 和 61.78%。5°C 低温条件下, 5 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理蔗糖含量较对照有所降低, 但 15 mmol·L⁻¹ 较 5 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理蔗糖含量增加了 155.22% (图 2A), 差异显著, 而葡萄糖和果糖含量的变化相似, 随 CaCl_2 浓度的增加而增加, 15 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理和 5 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理葡萄糖含量较对照增幅为 123.58% 和 29.27% (图 2B), 果糖含量较对照增幅分别为 25.89% 和 8.72% (图 2C)。

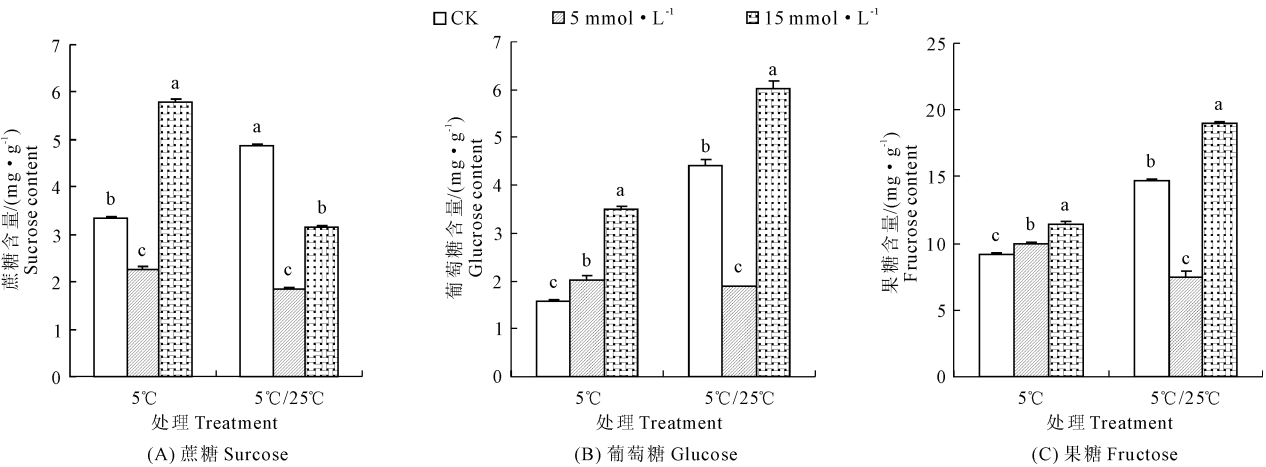


图 2 外源 CaCl_2 对低温及恢复下赤霞珠幼苗各种糖含量的影响
Fig.2 Influence of soluble sugar contents of Cabernet sauvignon plantlet under low-temperature and low-temperature-recovery with different CaCl_2 concentrations

5℃/25℃ 条件下 15 mmol·L⁻¹CaCl₂ 处理较 5 mmol·L⁻¹CaCl₂ 处理蔗糖含量增幅为 70.57% (图 2A),葡萄糖含量增幅为 221.35%(图 2B),果糖含量增加 154.10%, 比对照增加 28.67% (图 2C), 但 5 mmol·L⁻¹CaCl₂ 处理较对照蔗糖,葡萄糖,果糖含量均有所降低(图 2)。

综上所述,高浓度 CaCl₂(15 mmol·L⁻¹)处理后,可以显著提高低温及低温恢复条件下赤霞珠幼苗枝条内葡萄糖和果糖含量,从而增强赤霞珠幼苗抗寒性。

2.3 外源 ABA 和 Ca²⁺ 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗淀粉含量的影响

在 ABA 和 Ca²⁺ 处理下,对照植株 5℃/25℃ 条

件下淀粉含量较 5℃低温处理显著增加,增幅分别为 153.45%和 145.88%。5℃条件下,2 mg·L⁻¹和 5 mg·L⁻¹ ABA 处理比 1 mg·L⁻¹ ABA 处理增加了 126.53%和 149.49%, 但差异不显著 ($P > 0.05$); 5℃/25℃条件下,5 mg·L⁻¹ABA 处理比 1 mg·L⁻¹和 2 mg·L⁻¹ ABA 处理幼苗淀粉含量分别增加了 345.98%和 224.69%, 差异显著 ($P < 0.05$), 但均低于对照(图 3A)。在不同 CaCl₂ 处理条件下,5℃及 5℃/25℃条件下淀粉含量变化趋势相同,随着培养基中 CaCl₂ 浓度的增加植株淀粉含量增加,15 mmol·L⁻¹CaCl₂ 处理较对照淀粉含量分别增加了 210.47%和 211.05%, 较对照均达显著水平 ($P < 0.05$)(图 3B)。

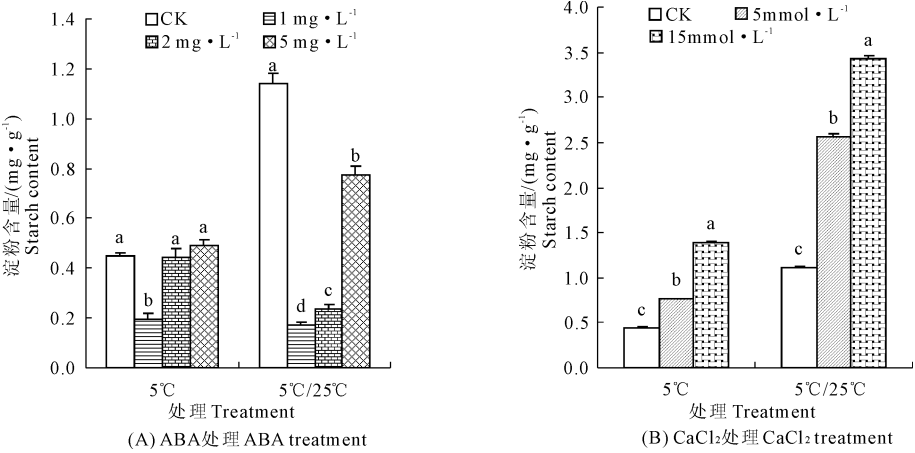


图 3 外源 ABA 和 CaCl₂ 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗淀粉含量的影响

Fig.3 Influence of starch contents of Cabernet sauvignon plantlet under low-temperature and low-temperature-recovery in different ABA and CaCl₂ concentrations

2.4 外源 ABA 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗蔗糖代谢相关酶活性的影响

AI,NI,SS 和 SPS 活性随着 ABA 浓度的升高而升高,当 ABA 浓度达到 5 mg·L⁻¹时蔗糖代谢相关酶 AI,NI,SS 和 SPS 活性达到最大(图 4)。5℃处理下,对照植株较低温恢复处理,NI 活性显著升高,增幅为 182.11%(图 4B),AI 活性在 ABA 为 5 mg·L⁻¹时较 1 mg·L⁻¹和 2 mg·L⁻¹分别增加 30.61%和 24.27%(图 4A),NI 活性增加 565.79%和 353.13% (图 4B)。

5℃/25℃条件下 AI 活性较低温条件下升高,升高幅度在 7.65%~72.27%,1 mg·L⁻¹ABA 处理较对照差异不显著,2 mg·L⁻¹和 5 mg·L⁻¹ABA 较 1 mg·L⁻¹ABA 处理 AI 活性增幅为 37.93%和 109.02% (图 4A)。而在 ABA 低浓度时 5℃/25℃条件下 NI 活性低于 5℃而在 ABA 高浓度下高于 5℃。在不同

ABA 浓度下 5℃/25℃处理 NI 活性的变化与 5℃低温条件呈相同趋势,5 mg·L⁻¹ABA 处理比 1 mg·L⁻¹和 2 mg·L⁻¹ABA 处理的增幅分别为 698.39%和 300.04%(图 4B)。

SS 活性在 5℃/25℃条件下低于低温条件,但均高于对照,特别是 5 mg·L⁻¹ABA 处理后,两种条件下 SS 活性显著增加,分别高达蔗糖 55.09 mg·g⁻¹·h⁻¹和 44.13 mg·g⁻¹·h⁻¹ FW, 比对照增加了 2 291.32%和 1 569.06%(图 4C)。

5℃低温和 5℃/25℃两种条件下,对照,1 mg·L⁻¹和 2 mg·L⁻¹ABA 处理间植株 SPS 活性变化均无显著差异。但经 5 mg·L⁻¹ABA 处理后,两种条件下 SPS 活性显著增加,分别高达蔗糖 38.77 mg·g⁻¹·h⁻¹和 35.54 mg·g⁻¹·h⁻¹ FW, 比对照增加了 1 523.02%和 1 336.70%(图 4D)。

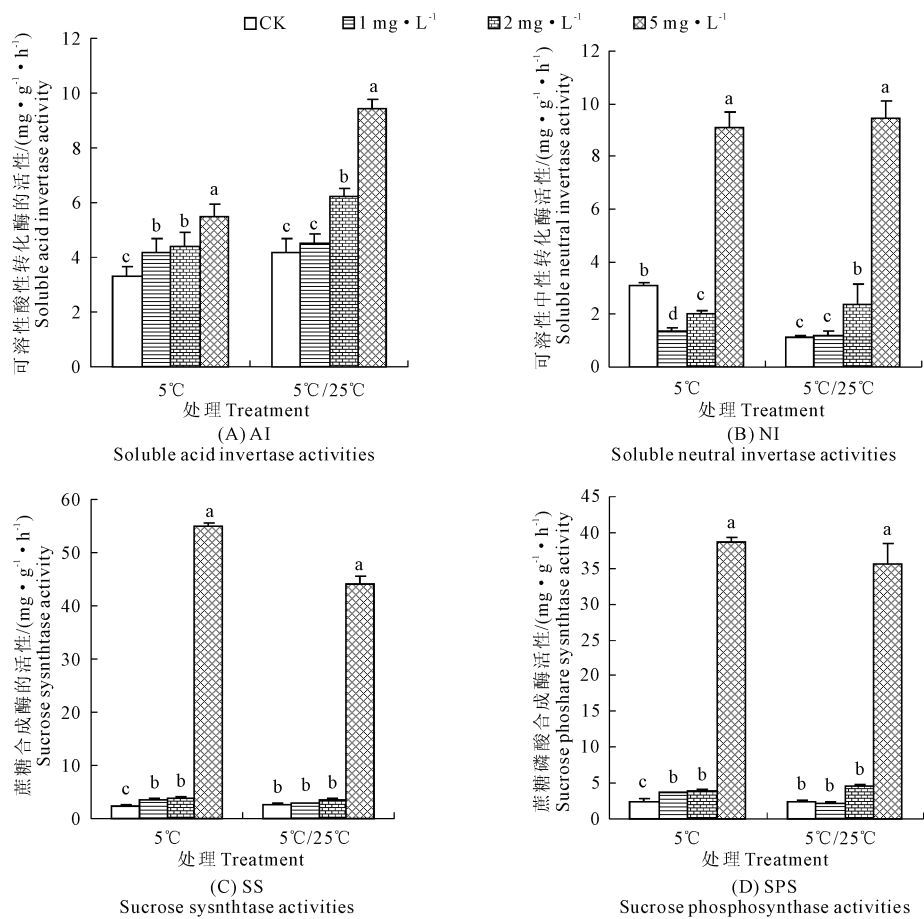


图 4 外源 ABA 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗蔗糖代谢相关酶活性的影响
Fig.4 Influence of the activities of sucrose metabolism enzymes in Cabernet sauvignon plantlet under low-temperature and low-temperature-recovery at different ABA concentrations

2.5 外源 Ca^{2+} 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗蔗糖代谢相关酶活性的影响

对照植株在 5°C/25°C 处理比 5°C 低温处理 AI 和 SS 活性分别增加了 43.96% 和 36.93%, 而 NI 和 SPS 活性降低, 降低幅度分别为 62.39% 和 8.75%。5°C 处理下, 随着 CaCl_2 浓度的升高, AI 的活性增强, 各处理间差异显著, 15 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理较对照 AI 活性增加了 26.42%。5°C/25°C 条件下, 15 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理比对照 AI 活性增加了 20.38%, 但 5 mmol·L⁻¹ 较对照减少, 差异显著 (图 5A)。

NI, SS 和 SPS 活性在低温及 5°C/25°C 条件下变化趋势一致, NI, SS 呈现先降后升趋势, SPS 活性则随 CaCl_2 浓度的不断升高而增加 (图 5B, C, D)。 CaCl_2 浓度的升高显著影响 NI 和 SS 活性的变化, 5 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理均使 NI 和 SS 的活性较对照有所降低, 而 15 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理后, 两种条件下 NI 和 SS 活性显著增加, 较对照 NI 活性分别增加 30.75% 和 58.3%, 而 SS 活性分别增加 111.63% 和 14.14% (图 5B, C)。 但 5°C 低温条件下 SPS 活性变化差异不显著, 而 5°C/25°C 条件下, 5 mmol·L⁻¹ CaCl_2

和 15 mmol·L⁻¹ CaCl_2 处理较对照 SPS 活性显著增加, 分别高达蔗糖 2.747 mg·g⁻¹·h⁻¹ 和 3.729 mg·g⁻¹·h⁻¹ FW, 比对照增加了 22.58% 和 66.39% (图 5D)。

3 讨论

3.1 外源 ABA 和 CaCl_2 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗各种糖和淀粉含量的影响

ABA 在适应环境变化如低温及其它胁迫响应中发挥主要作用^[21-22]。 Ca^{2+} 作为偶联胞外信号与胞内生理反应的第二信使, 具有调节植物细胞对低温逆境反应和适应性的重要作用^[23]。 有研究探讨茶树叶片对低温适应性反应时发现, 一定浓度的外源 ABA 能够提高叶片内可溶性糖的含量, 从而增强其抗寒性^[24]。 此外在低温胁迫下, 50 μM 和 15 μM ABA 处理能够显著提高黄瓜幼苗水苏糖, 棉籽糖和蔗糖的含量。 本研究显示, 赤霞珠幼苗在 5°C 低温条件下, 随着外源 ABA 和 CaCl_2 浓度的逐渐升高, 植株内蔗糖, 果糖, 葡萄糖含量均不断增加, 说明一定浓度的外源 ABA 和 CaCl_2 促进了渗透调节物质蔗糖, 果糖和葡萄糖的积累, 提高了赤霞珠的抗冷性,

同时在 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ABA 或 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCl}_2$ 浓度处理 下葡萄植株内糖含量积累至最高水平。

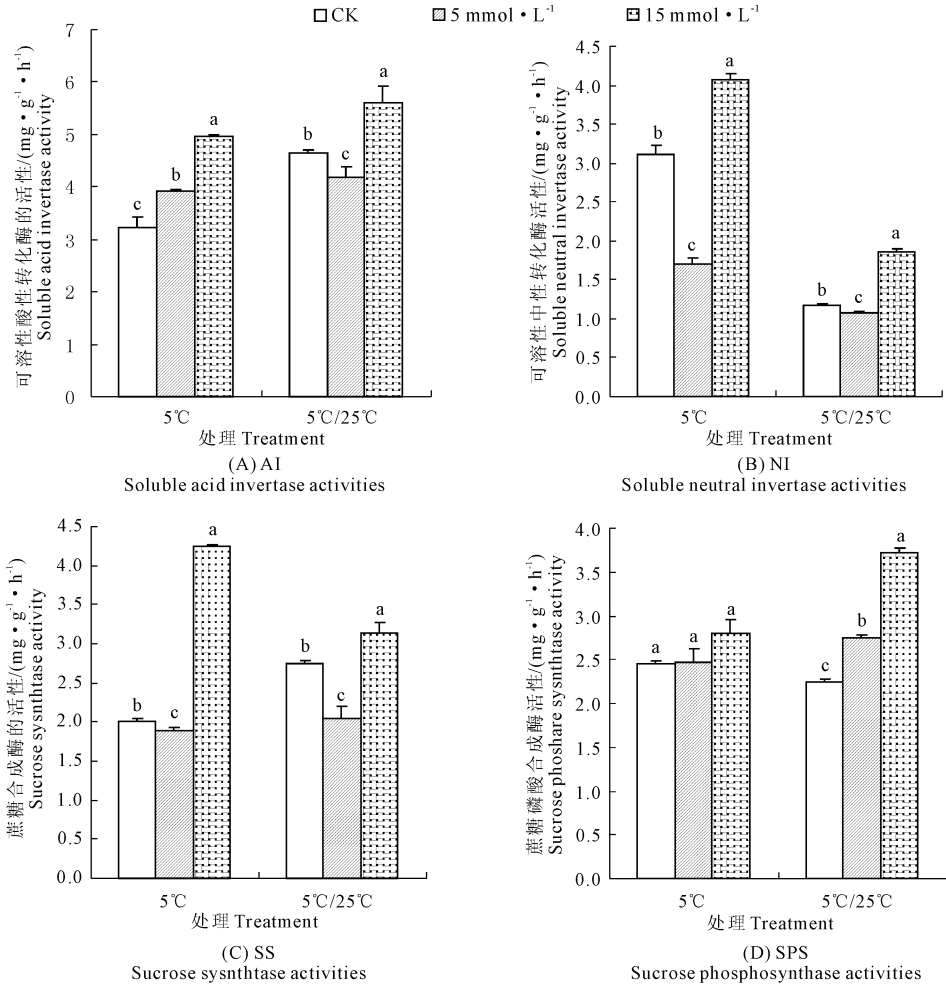


图 5 外源 Ca^{2+} 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗蔗糖代谢相关酶活性的影响

Fig.5 Influence of sucrose metabolism enzyme activities of Cabernet sauvignon plantlet under low-temperature and low-temperature-recovery in different CaCl_2 concentrations

研究发现,低温及恢复培养对番茄的光合作用和蔗糖代谢具有一定影响,其中淀粉,果糖,葡萄糖,蔗糖和总糖的含量显著增加^[25]。本研究在低温恢复条件下,ABA 或 CaCl_2 作用下的蔗糖含量均低于低温条件,说明在低温恢复过程中,呼吸作用增强,有更多的蔗糖转化为葡萄糖和果糖;而在高浓度的 ABA 或 CaCl_2 处理下,淀粉,葡萄糖和果糖含量均高于低温,说明 ABA 或 CaCl_2 在低温处理下糖含量的积累并未对恢复培养阶段产生反馈抑制。表明外源 ABA 和 CaCl_2 促进了低温条件下蔗糖,果糖及葡萄糖的积累,对酿酒葡萄赤霞珠幼苗的抗寒性具有一定调控作用。本研究还发现,无外源激素处理的赤霞珠植株在低温恢复条件下,淀粉,蔗糖,葡萄糖和果糖含量均高于低温条件,说明低温恢复过程中光合作用增强,促进糖分的积累及淀粉的合成。

3.2 外源 ABA 和 CaCl_2 对低温及低温恢复下赤霞珠幼苗蔗糖代谢关键酶活性的影响

研究表明,短期夜间低温会使番茄体内果糖和

葡萄糖含量升高,酸性转化酶和中性转化酶的活性降低,蔗糖合成酶和蔗糖磷酸合成酶的活性增加,增加番茄果实内蔗糖的积累^[26-27]。此外,高羊茅植株经过低温锻炼后,蔗糖含量急剧上升,茎基的蔗糖合成酶和蔗糖磷酸合成酶的活性则成倍提高^[28]。而外源 ABA 和 Ca^{2+} 也促进低温条件下植株体内酶活性的变化,研究表明高浓度的 ABA 能够提高瓜尔豆种子中酸性转化酶,中性转化酶,蔗糖合成酶,蔗糖磷酸合成酶的活性^[29]。向体外培养 1 d 的玉米小苗的培养基中加入 ABA 后发现,1 h 后根中液泡转化酶活性增强,4 h 后达到最高;2 h 后在叶片中增强,8 h 后达到最高。在拟南芥中,外源 ABA 促进了肌醇半乳糖苷酶 1 和 2 基因的表达^[30]。在玉米中,外源 ABA 促进了蔗糖磷酸合成酶活性的提高^[31]。外源 Ca^{2+} 能够明显提高葡萄幼苗在低温锻炼期间茎和根中 SOD 及 POD 活性,降低 MDA 含量,减轻质膜的膜脂过氧化程度,提高幼苗抗寒性^[32-33]。目

前有关外源 Ca^{2+} 对低温下蔗糖代谢关键酶活性影响的研究鲜少报道。本研究发现,随着外源 ABA 和 CaCl_2 浓度的逐渐升高,赤霞珠幼苗植株酸性转化酶,碱性转化酶,蔗糖磷酸合成酶及蔗糖合成酶活性的变化趋势一致,均表现出随着 ABA 浓度的增加,蔗糖代谢相关酶活性有逐渐升高的趋势,同时在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 和 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 处理下 4 种蔗糖代谢关键酶活性显著提高,但 ABA 作用显著高于 CaCl_2 。且在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 处理下 4 种蔗糖代谢相关酶较 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 时活性增加顺序为:SPS > SS > NI > AI。而本研究表明 ABA 促进了各种糖含量的积累,说明外源 ABA 通过提高 4 种蔗糖代谢相关酶活性来促进糖的积累方面起作用,也说明外源 ABA 促进蔗糖积累的同时也促进了蔗糖的分解,但积累大于分解。而蔗糖代谢相关酶活性的提高促进了糖的积累,减少低温对葡萄幼苗的伤害。综上,外源 ABA 和 Ca^{2+} 在低温信号传导和增强植物抵抗低温方面发挥了积极的作用,适当施加外源 ABA 和 Ca^{2+} 可以在一定程度上提高酿酒葡萄的抗冷性,研究结果也为后续探讨酿酒葡萄 Ca^{2+} 诱导抗寒性信号产生,信号转导途径等调控机理奠定研究基础。

参考文献:

[1] 李素丽,李志刚,杨丽涛,等.低温对不同冷敏感型甘蔗品种根系一些生理指标的影响[J].华南农业大学学报,2012,33(2):178-182.

[2] 刘慧丽,李玲.脱落酸(ABA)诱导基因表达的调控元件[J].植物学通报,2001,18(3):276-282.

[3] McAinsh M R, Pittman J K. Shaping the calcium signature[J]. New Phytol, 2009, 181(2): 275-294.

[4] DeFalco T A, Bender K W, Snedden W A. Breaking the code: Ca^{2+} sensors in plant signaling[J]. Biochem J, 2010, 425: 27-40.

[5] 黄杏,陈明辉,杨丽涛,等.低温胁迫下外源 ABA 对甘蔗幼苗抗寒性及内源激素的影响[J].华中农业大学学报,2013,32(4):6-11.

[6] Liu J, Jiang M Y, Zhou Y F, et al. Production of polyamines is enhanced by endogenous abscisic acid in maize seedlings subjected to salt stress[J]. J Integr Plant Biol, 2005, 47(11): 1326-1334.

[7] 刘丽杰,苍晶,李怀伟,等.外源 ABA 对冬小麦越冬期呼吸代谢关键酶与糖代谢的影响[J].麦类作物学报,2013,33(1):65-72.

[8] Carpaneto A, Ivashikina N, Levchenko V, et al. Cold transiently activates calcium permeable channels in Arabidopsis mesophyll cells[J]. Plant Physiology, 2007, 143: 487-494.

[9] 周芳,赵玉霞,王文岩,等.局部根区水分胁迫下钙对冬小麦生长及养分吸收的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):14-19,71.

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

[11] 张怀山,赵桂琴,栗孟飞,等.中型狼尾草幼苗对 PEG,低温和盐胁迫的生理应答[J].草业学报,2014,23(2):180-188.

[12] 陆秀君,刘月洋,李天来,等.变温层积过程中 GA3 诱导天女

木兰种子贮藏物质及糖代谢关键酶活性的变化[J].沈阳农业大学学报,2010,41(1):18-22.

[13] 曲凌慧,车永梅,侯丽霞,等.低温胁迫对葡萄品种梅鹿辄和贝达活性氧代谢的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2010,27(2):117-121,125.

[14] Cai W C, Yuan H J. Chemical analysis method of biological substance[M]. Beijing: Science Press, 1982.

[15] Douglas C D, Tsung M K, Frederick C F. Enzymes of sucrose and hexose metabolism in development kernels of two inbreds of maize[J]. Plant Physiology, 1988, 86: 1013-1019.

[16] Tsai M, Ou L, Setter T L. Effect of increased temperature in apical regions of maize ears on starch-synthesis enzymes and accumulation of sugars and starch[J]. Plant Physiology, 1985, 79: 852-855.

[17] Wardlaw I F, Willenbrink J. Carbohydrate storage and mobilization by the culm of wheat between heading and grain maturity: the relation to sucrose synthase and sucrose-phosphate synthase[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1994, 21: 251-271.

[18] Yu X J. The activity measurement of sucrose synthases and sucrose phosphate synthase. Experimental manual of plant physiology[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985.

[19] Nielsen T H, Skiarbek H C, Karlson P. Carbohydrate metabolism during fruit development in sweet pepper (*Capsicum annuum*) plants[J]. Plant Physiology, 1991, 82: 311-319.

[20] 徐昌杰,陈文峻,陈昆松,等.淀粉含量测定的一种简便方法—碘显色法[J].生物技术,1998,8(2):41-43.

[21] Schfoeder J I, Kwak J M, Allen G J. Guard cell abscisic acid signalling and engineering drought hardiness in plants[J]. Nature, 2001, 410: 327-330.

[22] 陈俊伟,谢鸣,秦巧平.植物糖信号与激素信号之间的联系[J].植物生理学通讯,2005,41(3):279-285.

[23] Nayyar H, Kaushal S K. Chilling induced oxidative stress in germinating wheat grains as affected by water stress and calcium[J]. Biologia Plantarum, 2002, 45(4): 601-604.

[24] 张丽,周欣,蒋家月,等.外源 ABA 对茶树抗寒生理指标的影响[J].茶业通报,2012,34(2):72-74.

[25] 李苗苗,冯雪,邹春静.外源 Ca^{2+} 对干旱胁迫下沙地云杉幼苗抗旱性生理指标的影响[J].安徽林业科技,2013,39(1):12-14.

[26] 齐红岩,姜岩岩,华利静.短期夜间低温对栽培番茄和野生番茄果实蔗糖代谢的影响[J].园艺学报,2012,39(2):281-288.

[27] 刘玉凤,李天来,焦晓赤.短期夜间亚低温及恢复对番茄光合作用和蔗糖代谢的影响[J].园艺学报,2011,38(4):683-691.

[28] 王世珍,蔡庆生.高羊茅蔗糖合成能力在低温锻炼下的部位差异[J].草地学报,2004,12(2):129-131,149.

[29] 魏小春,李格,郑群.脱落酸与赤霉素对瓜尔豆蔗糖代谢酶类的影响[J].作物杂志,2012,(3):44-48.

[30] Blochl A, Grenier M G, Sourdoux M, et al. Induction of raffinose oligosaccharide biosynthesis by abscisic acid in somatic embryos of alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. Plant Science, 2005, 168: 1075-1082.

[31] Wattana P. Exogenous abscisic acid enhances sugar accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress[J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2011, 10(3): 212-219.

[32] 王燕凌,廖康,刘君,等.外源 CaCl_2 对提高葡萄幼苗抗寒性的研究[J].新疆农业大学学报,2006,29(3):64-67.

[33] 刘铁铮,王献草,索相敏,等.外源钙及钙离子抑制剂对杏扁雌蕊抗寒性的影响[J].吉林农业科学,2015,40(5):90-92.