

曹玉杰, 薄凯亮, 程春燕, 等. 外源尸胺增强黄瓜幼苗耐冷性的生理机制[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(1): 122-129.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.01.019

外源尸胺增强黄瓜幼苗耐冷性的生理机制

曹玉杰, 薄凯亮, 程春燕, 钱春桃, 陈劲枫

(南京农业大学园艺学院, 作物遗传与种质创新国家重点实验室, 江苏 南京 210095)

摘要: 以黄瓜耐冷材料长春密刺、冷敏材料北京截头为试材, 利用人工气候箱进行低温(12 ℃/7 ℃, 昼/夜)及恢复处理, 研究低温胁迫下外源尸胺(Cad)对黄瓜幼苗电解质渗透率、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性及叶绿素荧光参数的影响。与对照相比, Cad处理可以使低温胁迫下长春密刺、北京截头的电解质渗透率分别降低18.61%、9.54%, MDA含量分别降低13.13%、12.54%, 可溶性蛋白质含量分别增加16.99%、11.20%, 可溶性糖含量分别提高9.35%、2.90%, 脯氨酸含量分别上升20.54%、17.36%; 使SOD、POD、CAT、APX的活性均显著上升, 分别提高9.64%和8.42%、19.83%和18.97%、31.95%和41.29%、10.66%和17.13%; 同时可改善幼苗叶绿素荧光参数的变化。在低温胁迫条件下, 外源尸胺通过促进黄瓜幼苗叶片可溶性物质含量的增加及抗氧化酶活性水平的提高, 来降低膜脂过氧化水平, 从而增强黄瓜幼苗的抗冷性。

关键词: 黄瓜; 外源尸胺; 低温胁迫; 生理生化指标; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)01-0122-08

Physiological mechanism of exogenous cadaverine enhancing the chilling tolerance of cucumber seedlings

CAO Yu-jie, BO Kai-liang, CHENG Chun-yan, Qian Chun-tao, CHEN Jin-feng

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University / State Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Nanjing 210095, China)

Abstract: Cucumber (*Cucumis sativus* L.) variety Changchun mici (chilling-tolerant) and Beijing jietou (chilling-sensitive) were sprayed with cadaverine (Cad) and were then subjected to low temperature of 12 ℃/7 ℃ (day/night) and recovering treatment in the artificial climate chamber. The effects of Cad on the changes in electrolyte leakage rate, malondialdehyde (MDA) content, soluble protein content, soluble sugar content, proline content, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity and catalase (CAT) activity, ascorbate peroxidase (APX) activity and chlorophyll fluorescence parameters under low temperature stress in the seedling leaves were investigated. Compared with the control treatment (water), Cad pretreatment could significantly reduce electrolyte leakage of Changchun mici and Beijing jietou

by 18.61% and 9.54% respectively and MDA contents by 13.13%, 12.54% respectively, whereas increase soluble protein contents by 16.99% and 11.20% respectively, soluble sugar contents by 9.35% and 2.90% respectively, proline contents by 20.54% and 17.36% respectively, and promote the activities of SOD, POD, CAT, and APX by 9.64% and 8.42%, 19.83% and 18.97%, 31.95% and 41.29%, and 10.66% and 17.13%, as well as improve the changes of chlorophyll fluorescence parameters in cucumber seedling leaves under low tempera-

收稿日期: 2014-05-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB119001-01、2012CB113900); “863”计划专项(2010AA10A108、2012AA100202); 江苏省科技支撑计划项目(BE2009310); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(11)1002]

作者简介: 曹玉杰(1984-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜遗传育种与生物技术研究。(E-mail) caoyujie08@163.com

通讯作者: 陈劲枫, (E-mail) jfchen@njau.edu.cn

ture stress. The application of exogenous Cad could improve chilling tolerance in cucumber seedlings by decreasing the membrane lipid peroxidation, increasing soluble substances content and enhancing the activities of antioxidant enzymes.

Key words: cucumber; exogenous Cad; low temperature stress; physiological-biochemical index; chlorophyll fluorescence parameter

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 起源于亚热带, 属于喜温性植物, 对低温非常敏感。黄瓜作为中国早春、秋冬季节设施栽培的主要蔬菜作物, 由于其冷敏性在生育期内遇到 0 ~ 15 °C 低温时经常遭受冷害, 生理活动失调, 生长缓慢或停止发育^[1-5], 产量和品质显著下降。因而提高黄瓜的耐冷性依然是目前设施栽培黄瓜的重点研究内容之一。当前, 关于改善黄瓜抗冷性的措施主要包括以下几个方面: 培育耐低温品种、改进栽培措施、利用转基因技术和采用化学调控技术, 这些方法的应用有赖于黄瓜耐冷机制的最终阐明, 而应用不同方法提高黄瓜抗冷能力的研究也将有利于黄瓜耐冷机制的进一步阐明。目前已有多种生长调节物质被报道可以提高黄瓜幼苗的抗冷性, 如: 5-氨基乙酰丙酸^[6]、腐胺、亚精胺和精胺^[7-9]、脱落酸、水杨酸^[10]、壳聚糖、表油菜素内酯、油菜素内酯、茉莉酸甲酯等。我们的前期研究结果表明黄瓜发芽期耐冷性与赖氨酸脱羧酶基因表达有关, 而尸胺 (Cad) 是赖氨酸脱羧酶的产物, 推测 Cad 与黄瓜发芽期耐冷性有关^[11]。已有报道就尸胺对水稻种子萌发的作用进行了研究^[12]。而黄瓜种子低温发芽能力与苗期的耐冷性呈显著正相关, 所以关于尸胺与黄瓜耐冷性的关系是一条值得探索的新途径, 对于深入探讨黄瓜耐冷性机制研究具有重要意义。本试验研究 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗抗氧化酶活性、膜脂过氧化作用及可溶性物质含量等的影响, 以期改善黄瓜耐冷性、进一步研究黄瓜的耐冷机理提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

黄瓜材料^[11]由南京农业大学蔬菜重点实验室黄瓜课题组提供, 一份材料为耐冷性材料长春密刺, 另一份材料为冷敏性材料北京截头。

1.2 幼苗培养

分别将两份材料种子消毒, 55 °C 温汤浸种, 放于铺有 2 层湿润滤纸的培养皿中, 28 °C 黑暗条件下催芽。种子发芽后播于装有草炭: 蛭石 = 1: 1 的

塑料营养钵中, 于日光温室内培养。每 2 d 浇灌 1 次 1/2 倍 Hoagland 营养液, 中间浇清水, 幼苗培养至 2 片真叶完全展平时用作试验材料进行处理。

1.3 试验处理

幼苗在低温处理开始前 12 h, 进行如下处理: (1) 喷施清水 (对照); (2) 喷施 1 mmol/L Cad (分析纯, 购于 Sigma 公司)。每 200 ml 喷施的溶液 (包括对照) 中加入 1 滴 (约 0.05 ml) 吐温-20, 以提高附着叶片的能力。用微型塑料喷雾器对植株 2 片真叶喷施清水或 Cad 溶液, 以溶液不从叶面下滴为宜 (注意不要滴到培养基质中)。将幼苗转移到光照培养箱中进行低温处理, 选用昼/夜温度为 12 °C/7 °C 的温度作为冷处理温度, 光照度为 150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光周期为 12 L/12 D, 相对湿度为 60% ~ 75%, 处理 2 d。第 3 d 将幼苗移回常温状态, 恢复 2 d, 这期间间隔给幼苗浇 Hoagland 营养液 (1/2 倍)。在冷害处理的 0 d、1 d、2 d 及恢复后 2 d 分别取样测定相关生理生化指标, 重复 3 次。

1.4 测定指标与测定方法

电解质渗漏率测定采用沈文云等的方法^[13]; MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸 (TBA) 比色法^[14]; SOD 活性测定参考李合生的方法^[15]; POD 活性测定按照 Quintanilla-Guerrero 等^[16]的方法; CAT 活性测定参照 Aebi^[17]的方法; APX 活性参照 Nakano 等^[18]的方法测定; 可溶性总糖的含量采用蒽酮比色法测定^[19]; 可溶性蛋白质含量测定按照文献^[20]的考马斯亮蓝 G-250 方法; 游离脯氨酸含量测定采用茚三酮显色法^[21]; 叶绿素含量测定参照沈伟其^[22]的乙醇提取方法。

叶绿素荧光参数的测定^[23], 分别于处理后第 0 d、2 d、恢复后 2 d 选取幼苗第 2 片真叶采用 mini-PAM (Walz, 德国) 便携式调制荧光仪测定。测定前将叶片夹入叶夹暗适应 20 min, 然后依次测得参数最小荧光 (F_0)、最大荧光 (F_m), 并计算可变荧光 F_v 、PSII 原初光能转换效率 (F_v/F_m)、PSII 的潜在光化学活性 (F_v/F_0) 以及 F_m/F_0 。每个处理重复 3 次。

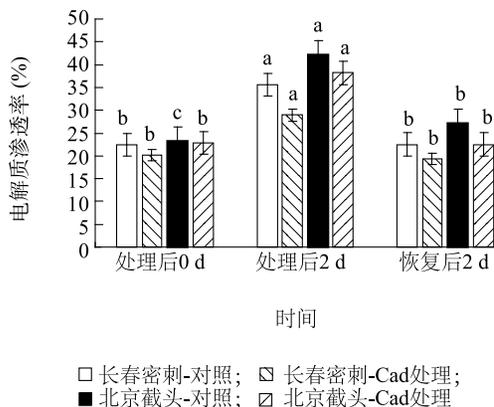
试验数据采用 SPSS 统计软件 Duncan's 新复极

差法进行显著性分析,采用 Microsoft Excel 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗相对电导率的影响

低温胁迫会导致植物细胞膜结构破坏,细胞内含物外渗,细胞质相对电导率增加。由图 1 可以看出,低温胁迫 2 d 后,长春密刺和北京截头黄瓜幼苗叶片电解质渗透率均显著增加,分别为处理前的 158.33%、181.26%,而且冷敏材料北京截头较耐冷材料长春密刺高出 15.77%,说明低温胁迫对北京截头细胞膜造成的损伤较重;外源 Cad 预处理可使两份材料幼苗电解质渗透率分别比对照降低 18.61%、9.54%,说明 Cad 对长春密刺的缓解效果大于对北京截头的缓解效果。提示外源尸胺预处理有利于维持细胞膜半透性的稳定,有效缓解电解质外渗。在恢复期,除北京截头对照的电解质渗透率仍保持较高水平外,其他处理均基本恢复到处理前的水平。



不同字母表示相同处理不同时间之间差异达到 0.05 显著水平。

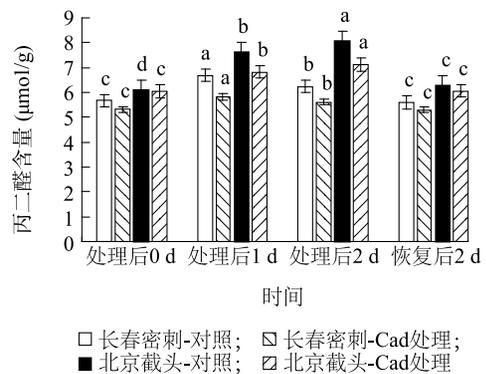
图 1 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗电解质渗透率的影响

Fig. 1 Effect of exogenous Cad on electrolytic leakage rate in the leaves of cucumber seedlings under low temperature stress

2.2 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗 MDA 含量的影响

丙二醛 (MDA) 是膜过氧化作用的终产物,其积累程度可以反映植物膜系统的损伤程度。如图 2 所示,低温处理后两份材料 MDA 含量皆有显著增加,在处理 1 d、2 d 长春密刺 MDA 含量分别

为处理前的 117.97%、110.03%,北京截头 MDA 含量分别为处理前的 127.97%、131.91%,说明低温胁迫引发北京截头膜脂过氧化程度大于长春密刺;外源 Cad 处理使长春密刺 MDA 含量在低温胁迫后 1 d、2 d 较对照分别降低 13.13%、10.10%,北京截头 MDA 含量在低温胁迫后 1 d、2 d 较对照分别降低 12.54%、11.49%。在恢复期,除北京截头对照的 MDA 含量仍保持较高水平外,其他处理 MDA 含量则降低到与处理前相同或比处理前更低的水平。



不同字母表示相同处理不同时间间差异达 0.05 显著水平。

图 2 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗叶片 MDA 含量的影响

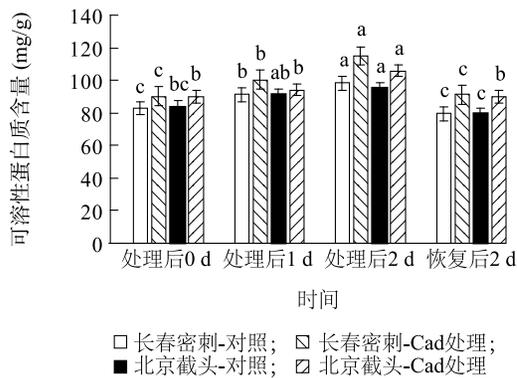
Fig. 2 Effects of exogenous Cad on MDA contents in the leaves of cucumber seedlings under low temperature stress

2.3 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗可溶性蛋白质含量的影响

由图 3 可知,两份材料长春密刺、北京截头在低温胁迫下可溶性蛋白质含量均增加,在低温处理后 1 d,分别比处理前增加 10.30%、9.14%,处理后 2 d 分别比处理前增长了 18.66%、13.81%;Cad 预处理可使低温处理下长春密刺、北京截头可溶性蛋白质含量在处理 1 d 时比对照分别提高 9.82%、3.11%,在 2 d 时相对于对照分别上升 16.99%、11.20%,外源 Cad 对长春密刺的促进蛋白质含量增加的效果大于北京截头。说明喷施外源 Cad 能促进低温胁迫下黄瓜幼苗叶片可溶性蛋白质含量的增加,提高叶片细胞的渗透调节能力,增强幼苗对低温胁迫的抗性。在恢复期,各处理基本恢复到处理前的水平或略低于处理前的水平。

2.4 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗可溶性糖含量的影响

可溶性糖类作为植物体内一类重要的渗透调节

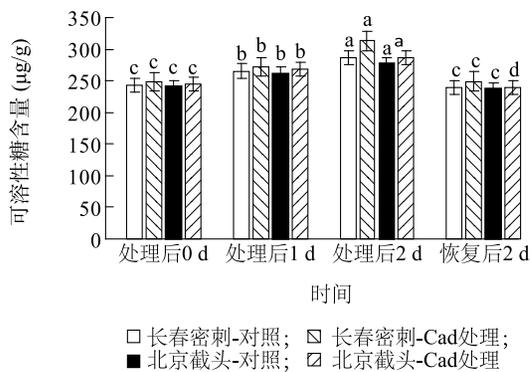


不同字母表示相同处理不同时间间差异达 0.05 显著水平。

图 3 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig. 3 Effect of Cad on soluble protein content in the leaves of cucumber seedlings under low temperature stress

剂,其在逆境胁迫下的积累对增加细胞汁液浓度,降低细胞水势,提高植物的抗逆性有重要作用^[24]。图 4 表明低温胁迫处理使长春密刺及北京截头幼苗可溶性糖含量上升,处理后 1 d 即增加显著,分别比处理前高出 8.73%、7.95%,2 d 时分别是处理前的 1.18 倍和 1.15 倍,提示植株通过调节体内可溶性糖的含量来对抗外界低温胁迫。外源 Cad 预处理可以提高长春密刺、北京截头可溶性糖的含量,处理后 2 d 分别比对照提高 9.35%、2.90%。在恢复期,各处理基本恢复到处理前或略低于处理前的水平。



不同字母表示相同处理不同时间间差异达 0.05 显著水平。

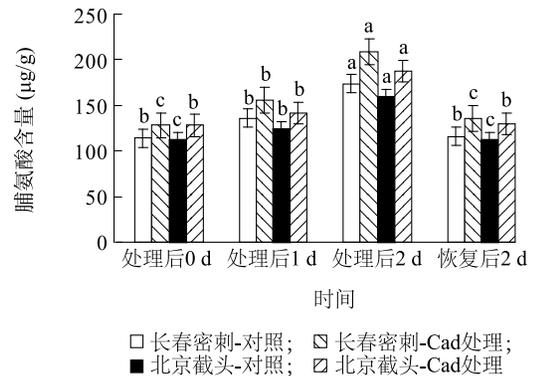
图 4 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗可溶性糖含量的影响

Fig. 4 Effect of exogenous Cad on soluble sugar content in the leaves of cucumber seedlings under low temperature stress

2.5 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗脯氨酸含量的影响

脯氨酸作为植物体内的一种渗透调节物质,其

含量变化对低温比较敏感^[25]。由图 5 所示,低温胁迫处理使长春密刺、北京截头幼苗脯氨酸含量上升明显,处理后 1 d 分别比处理前上升了 19.08%、10.59%,处理后 2 d 分别比处理前增加 52.04%、42.37%;Cad 预处理可以提高低温胁迫下两种材料的脯氨酸含量,与单纯低温胁迫相比,在 1 d、2 d 时长春密刺分别提高 14.57%、20.54%,北京截头分别提高 14.37%、17.36%。在恢复期,各处理脯氨酸水平略高于处理前。



不同字母表示相同处理不同时间间差异达 0.05 显著水平。

图 5 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗脯氨酸含量的影响

Fig. 5 Effect of exogenous Cad on proline content in the leaves of cucumber seedlings under low temperature stress

2.6 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

本试验对两份材料中的抗氧化酶 *SOD*、*POD*、*CAT* 和 *APX* 的活性进行了测定,以期了解低温条件下这些酶的调节功能。如图 6 所示,在低温处理后 1 d,长春密刺 *SOD* 活性比处理前增加 5.65%,北京截头却比处理前下降 11.26%;在胁迫后 2 d 长春密刺、北京截头 *SOD* 活性分别比处理前提高 24.76% 和 7.29%。Cad 处理可明显提高低温胁迫下长春密刺、北京截头幼苗叶片 *SOD* 活性,低温处理后 1 d 分别比对照增加 10.28%、9.64%,2 d 时分别比对照增加 21.72%、8.42%。在恢复期,除北京截头对照尚未恢复到处理前的活性水平外,其他处理均恢复到处理前的活性水平。

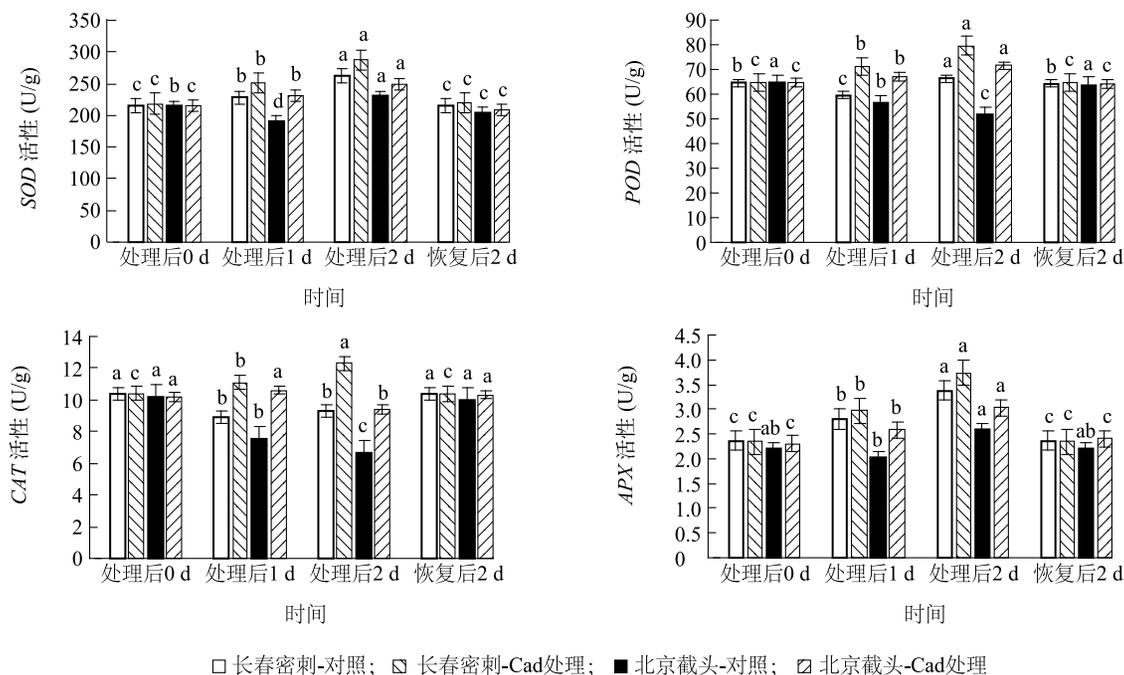
长春密刺和北京截头的 *POD* 活性低温处理后 1 d 分别比处理前下降了 7.75% 和 12.56%,而在胁迫后 2 d,长春密刺 *POD* 活性为处理前的 102.64%,北京截头仅为处理前的 79.84%。喷施 Cad 可使低温条件下长春密刺和北京截头幼苗叶片 *POD* 活性

在1 d时分别比处理前提高 10.37% 和 3.87%, 2 d 时分别比处理前提高 23.37% 和 10.68%; 长春密刺和北京截头幼苗叶片 *POD* 活性在 1 d 时分别比对照提高 19.83% 和 18.97%。在恢复后 2 d, 各处理的酶活性基本恢复到处理前的水平。

低温处理使长春密刺和北京截头叶片 *CAT* 活性均明显降低, 于 1 d 时分别比处理前降低 14.49% 和 25.78%, 2 d 时分别比处理前降低 10.13% 和 34.62%。Cad 预处理可促进长春密刺、北京截头叶片 *CAT* 活性的增加, 在 1 d 时分别比处理前升高 6.81%、4.20%; 在 2 d 时分别比处理前升高 18.39% 和降低 7.73%, 而比对照分别提高 31.95%、41.29%。各处理叶片 *CAT* 活性恢复 2 d 后趋于处理前的酶活性水平。

低温处理后 1 d 和 2 d 长春密刺叶片 *APX* 活性上升, 分别为处理前的 1.18 倍和 1.43 倍, 北京截头分别为处理前的 91.49% 和 117.39%。外源 Cad 可使低温处理下长春密刺、北京截头叶片 *APX* 活性提高, 1 d 时长春密刺和北京截头幼苗叶片 *APX* 活性分别是处理前的 1.27 倍和 1.12 倍, 2 d 时分别为处理前的 1.60 倍和 1.32 倍; 2 d 时长春密刺和北京截头幼苗叶片 *APX* 活性比对照分别提高 10.66% 和 17.13%。在恢复期各处理 *APX* 活性恢复到低温处理前的水平。

综上所述, 外源尸胺引起黄瓜长春密刺及北京截头低温处理过程中 *SOD*、*POD*、*CAT*、*APX* 活性的提高, 且长春密刺中这 4 种抗氧化酶的活性在各个检测点均高于或略高于北京截头。



不同字母表示相同处理不同时间间差异达 0.05 显著水平。

图 6 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 6 Effects of Cad on antioxidant enzymes activities in the leaves of cucumber seedlings under low temperature stress

2.7 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响

初始荧光 F_0 是 PSII 反应中心处于完全开放状态时的荧光产量^[23]。如图 7 所示, 低温胁迫处理后, 长春密刺与北京截头 F_0 均显著增加, 说明低温胁迫引发幼苗叶片 PSII 反应中心失活, 发生了可逆或不可逆伤害; 北京截头增幅大于长春密刺, 说明其 PSII 反

应中心受到的损伤较大。Cad 预处理可以明显降低低温胁迫过程中 F_0 的增加, 说明其对低温下黄瓜幼苗叶片光合机构 PSII 的损坏具有明显的缓解作用。

最大荧光 F_m 是 PSII 反应中心处于完全关闭状态时的荧光强度^[23]。由图 7 可知, 低温条件下长春密刺与北京截头的 F_m 均明显下降, 而长春密刺 F_m 下降幅度小于北京截头, Cad 预处理可明显缓解低

温条件下两者幼苗叶片 F_m 的下降。

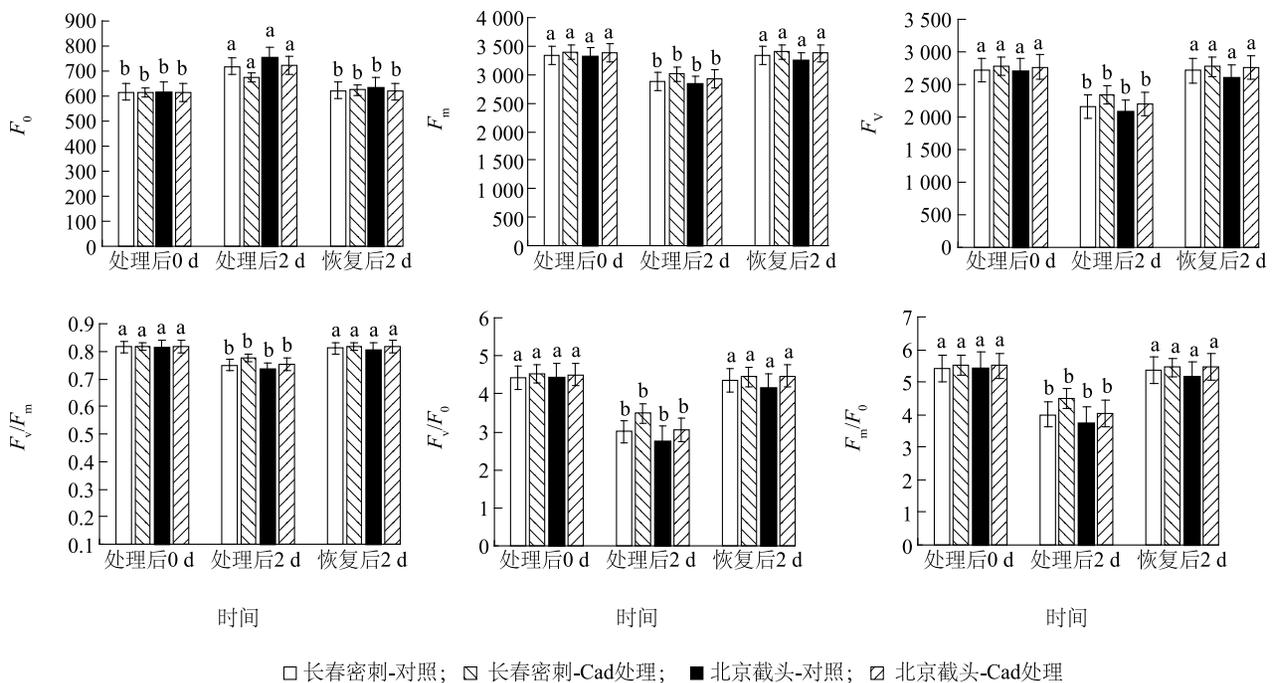
可变荧光 F_v 是 F_m 与 F_0 的差值,反映光合作用中 PSII 原初电子受体 QA 的还原情况^[23]。图 7 表明低温条件下长春密刺与北京截头的 F_v 显著下降, Cad 预处理可使低温条件下两份材料 F_v 下降减少。恢复 2 d 后各处理 F_0 、 F_m 、 F_v 基本恢复到处理前的水平。

F_v/F_m 表示 PSII 的最大光化学效率^[23]。从图 7 可以看出,长春密刺与北京截头的 F_v/F_m 在低温胁迫后显著下降,说明低温胁迫降低了黄瓜叶片 PSII 原初光能转化效率;而长春密刺下降幅度小于北京截头,说明长春密刺 PS II 反应中心所受的伤害较轻,反应中心进行光合作用的能力较高; Cad 预处理有效减缓了两份材料 F_v/F_m 的降低,但仍低于处理前的水平。而在恢复期,各处理的 F_v/F_m 均恢复到

略低于处理前的水平。

F_v/F_0 代表了 PSII 的潜在活性^[23]。如图 7 所示,低温胁迫处理 2 d 使北京截头 F_v/F_0 显著下降,并且大于长春密刺,表明北京截头 PSII 活性中心受损比长春密刺严重; Cad 预处理可使两份材料 F_v/F_0 有一定程度的恢复,但仍低于处理前的水平。恢复后 2 d 各处理 F_v/F_0 仍略低于处理前的水平,表明 PSII 活性中心水平仍未恢复到处理前的状态。

F_m/F_0 用来表示通过 PS II 的电子传递情况^[23]。图 7 表明低温条件下 F_m/F_0 显著降低,说明通过 PS II 的电子传递受到抑制; Cad 预处理可明显缓解低温下 F_m/F_0 的下降,一定程度上促进了电子的顺利传递。在恢复期除北京截头对照略低于处理前外,其他处理基本恢复到处理前的状态。



不同字母表示相同处理不同时间间差异达 0.05 显著水平。

图 7 外源 Cad 对低温胁迫下黄瓜幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

Fig. 7 Effects of exogenous Cad on chlorophyll fluorescence parameters in the leaves of cucumber seedlings under low temperature stress

3 讨论

黄瓜发生冷害的生理机制之一是低温胁迫对细胞膜造成的损伤。而低温引起的活性氧(ROS)积累是造成细胞膜损伤的化学原因^[26],由此产生的 MDA 一定程度上反映了活性氧在植物体内过量积

累对细胞膜系统产生伤害的程度^[27]。本试验结果表明低温胁迫处理使长春密刺和北京截头的 MDA 含量显著增加,后者大于前者,说明低温胁迫造成黄瓜幼苗细胞膜的严重损伤,北京截头细胞膜受伤害程度大于长春密刺。抗氧化酶活性水平代表着对活性氧的清除水平^[27]。在抗氧化酶类 SOD、POD、

CAT、APX 中, APX 起维护活性氧信号调节作用, 而 SOD 和 CAT、POD 共同作用可以使超氧阴离子自由基和 H_2O_2 转变成水和氧, 维持体内的活性氧代谢平衡^[28]。本试验结果表明低温胁迫引起黄瓜长春密刺的抗氧化酶(SOD、POD、APX)活性增加, 而引起黄瓜北京截头的抗氧化酶活性降低; 据此认为长春密刺较北京截头有着相对较强的活性氧清除水平, 进而表现出相对较强的耐低温能力。综合前人研究, 低温胁迫下 SOD、POD、CAT 等酶活性变化趋势存在差异, 这可能与研究者所用材料种类^[29-31]、低温处理强度^[29-32]、低温处理方式(渐降、直接及自然低温)、处理的时期、以及取样部位等的不同有关。由本试验结果可知, 尸胺(Cad)处理使黄瓜幼苗叶片中 MDA 含量低于对照, 而使幼苗叶片抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX)活性高于对照, 据此认为 Cad 可以提高低温胁迫下黄瓜幼苗叶片抗氧化酶活性, 增强细胞清除活性氧的能力, 降低质膜过氧化程度, 减少 MDA 积累, 有利于维持细胞膜的完整性, 降低细胞质膜透性。Shen 等^[32]的研究结果表明其他多胺在增强黄瓜耐冷性时表现出相似的耐冷生理作用机制。

低温胁迫下植物体内可溶性糖的含量增加, 可溶性糖含量与植物的抗冷性密切相关^[33]; 脯氨酸是非常重要的有机渗透调节物质, 脯氨酸含量的高低可作为衡量植物抗冷性的指标^[34]; 可溶性蛋白质因为其极强的亲水特性, 可提高细胞的持水力, 因此可提高植物的抗冷性, 可溶性蛋白质含量与抗冷性表现正相关关系^[35]。电解质渗漏率的增加是膜相变和膜脂过氧化双重反应的结果。试验结果表明低温胁迫使长春密刺和北京截头叶片内可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白质含量以及电解质渗透率均增加, 而外源尸胺处理可使这些细胞内可溶性物质的含量进一步提高, 而使电解质渗透率的增加量减少。据此认为外源尸胺还可以通过诱导黄瓜幼苗叶内的非抗氧化系统(通过调节细胞内成分)维持细胞膜的稳定性, 降低细胞质膜透性, 进而增强幼苗对低温胁迫的适应性。有研究报道脯氨酸的积累需要碳水化合物, 碳水化合物通过氧化磷酸化作用为脯氨酸的合成提供必要的氢和还原能力^[36], 可溶性糖和脯氨酸的同步积累可能与此相关。

植物在低温条件下, 叶绿体会受到破坏, 叶绿素含量下降, 从而发生严重的光抑制现象。正常情况

下叶绿素荧光与光化学反应、发射和热耗散是相互联系的^[37], 可以通过对荧光的监测来研究光合作用效率和热耗散的相关情况。本试验测定结果表明低温胁迫使黄瓜幼苗 F_0 上升, 表明 PS II 反应中心失活, 结合 F_v/F_0 和 F_v/F_m 的降低, 则反映出 PS II 的潜在活性和原初光能转换效率的减弱。而 Cad 预处理可以缓解低温胁迫引起的黄瓜幼苗的光抑制, 一定程度上恢复 PS II 的潜在活性和原初光能转换效率, 提高光合作用效率。

参考文献:

- [1] SALTVEIT M E J, MORRIS L L. Overview on chilling injury of horticultural crops [C]//Wang C Y. Chilling injury of horticultural crops. Florida: CRC Press, 1990:3-15.
- [2] 徐刚, 彭天沁, 高文瑞, 等. 不同基质含水量和钾肥施用量对黄瓜生长及光合作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(5):1109-1114.
- [3] 徐艳, 王东华, 纪明山. 5种常见食用菌液体发酵产物对黄瓜褐斑菌的抑制作用[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(8):114-115.
- [4] 万景旺, 邵颖, 朱华, 等. 生防菌 Jdm2 与生物源农药混用防治黄瓜根结线虫病的效果[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4):108-110.
- [5] 张黎杰, 周玲玲, 李志强, 等. 菌渣复合基质栽培对目光温室黄瓜生长发育和产量品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(3):109-111.
- [6] 尹璐璐, 于贤昌, 王英华, 等. 5-氨基乙酰丙酸对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. 西北农业学报, 2007, 16(4):166-169.
- [7] ZHANG W P, JIANG B, LI W G, et al. Polyamines enhance chilling tolerance of cucumber (*Cucumis sativus* L.) through modulating anti-oxidative system [J]. Scientia Horti, 2009, 122:200-208.
- [8] SHEN W, NADA K, TACHIBANA S. Involvement of polyamines in the chilling tolerance of cucumber cultivars [J]. Plant Physiology, 2000, 124:431-439.
- [9] 王学. 低温胁迫下精胺对黄瓜幼苗抗氧化酶系统及膜脂过氧化的影响[J]. 种子, 2008, 27(11):34-36.
- [10] ZHANG W P, JIANG B, LOU L N, et al. Impact of salicylic acid on the antioxidant enzyme system and hydrogen peroxide production in *Cucumis sativus* under chilling stress [J]. Z Natur Forsch, 2011, 66:413-422.
- [11] 透明辉, 李晓明, 陈劲枫. 黄瓜发芽期耐冷性与赖氨酸脱羧酶基因表达 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(12):2492-2495.
- [12] 孔垂华, 胡飞, 谢华亮, 等. 外源多胺对水稻萌发和前期生长的作用及其在土壤中的滞留 [J]. 应用生态学报, 1996, 7(4):377-380.
- [13] 沈文云, 侯锋, 吕淑珍, 等. 低温对杂交一代黄瓜幼苗生理特性的影响 [J]. 华北农学报, 1995, 10(1):56-59.
- [14] KUMAR G N M, KNOWLES N R. Changes in lipid peroxidation

- and lipolytic and free-radical scavenging enzyme activities during aging and sprouting of potato (*Solanum tuberosum*) seed-tubers [J]. *Plant Physiol*, 1993, 102: 115-124.
- [15] 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,2001:278.
- [16] QUINTANILLA-GUERRERO M A, DUARTE-VÁZQUEZ B E, GARCÍA-ALMENDAREZ R, et al. Polyethylene glycol improves phenol removal by immobilized turnip peroxidase[J]. *Bio-resource Technology*, 2008, 99(18):8605-8611.
- [17] AEBI H. Catalase in vitro [M]//Packer L. *Methods in enzymology*. Orlando, FL: Academic Press, 1984: 121-126.
- [18] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant Cell Physiol*, 1981, 22:867-880.
- [19] FAIRBAIRN N J. A modified anthrone reagent [J]. *Chem and Ind*, 1953(4):86.
- [20] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社, 1999:12.
- [21] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities protein utilizing the principle of protein dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248-254.
- [22] 沈伟其. 测定水稻叶片叶绿素含量的混合液提取法[J]. *植物生理学通讯*, 1988(3):62-64.
- [23] DEMMIG-ADAMS B. Carotenoids and photoprotection in plants. a role for the xanthophylls zaxanthin [J]. *Biochim Biop Hys Acta*, 1990, 1024:1-24.
- [24] 张正斌,山 仑. 作物生理抗逆性的若干共同机理研究进展 [J]. *作物杂志*, 1997(4):10-12.
- [25] 汤章城. 逆境下植物脯氨酸的累积及其可能意义[J]. *植物生理学通讯*, 1984(4):6-10.
- [26] 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.
- [27] 朱素琴. 膜脂与植物抗寒性关系研究进展[J]. *湘潭师范学院学报:自然科学版*, 2002, 24(4):49-54.
- [28] 马德华,金 安,霍振荣,等. 黄瓜对不同温度逆境的抗性研究[J]. *中国农业科学*, 1999, 32(5):28-35.
- [29] 吴雪霞,查丁石,邵 翔. 低温胁迫对茄子幼苗生长、抗氧化酶活性和渗透调节物质的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2008, 24(4):471-475.
- [30] 康恩祥,陈年来,安翠香,等. 低温弱光对西葫芦幼苗抗氧化酶活性和质膜透性的影响[J]. *中国蔬菜*, 2007(4):16-19.
- [31] 崔 岩,王丽萍,霍春玲,等. 外源抗冷物质对低温胁迫下黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. *中国蔬菜*, 2008(8):15-18.
- [32] SHEN W, NADA K, TACHIBANA S. Involvement of polyamines in the chilling tolerance of cucumber cultivars [J]. *Plant Physiology*, 2000, 124:431-439.
- [33] 艾 琳,张 萍,胡成志. 低温胁迫对葡萄根系膜系统和可溶性糖及脯氨酸含量的影响 [J]. *新疆农业大学学报*, 2004, 27(4):47-50.
- [34] 冯建灿,张玉洁,杨天柱. 低温胁迫对喜树幼苗 *SOD* 活性、MDA 和脯氨酸含量的影响 [J]. *林业科学研究*, 2002, 15(2): 197-202.
- [35] 王荣富. 植物抗寒指标的种类及其应用 [J]. *植物生理学通讯*, 1987(3):49-55.
- [36] 彭志红,彭克勤,胡家金,等. 渗透胁迫下植物脯氨酸积累的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2002, 18(4):80-83.
- [37] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence-a practical guide [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.

(责任编辑:张震林)