

苏 南, 苏小俊, 蒋芳玲, 等. 表油菜素内酯对高温胁迫下甘蓝幼苗抗逆性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(7): 137–141.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.07.047

表油菜素内酯对高温胁迫下甘蓝幼苗抗逆性的影响

苏 南^{1,2}, 苏小俊¹, 蒋芳玲², 吴 震², 毕云飞², 刘 勋²

(1. 江苏省农业科学院蔬菜研究所, 江苏南京 210014; 2. 南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210095)

摘要:以耐热甘蓝品种启夏和不耐热甘蓝品种苏甘 25 号为试材, 研究表油菜素内酯处理对高温胁迫下甘蓝幼苗耐热性相关生理指标的影响。结果表明, 高温胁迫下, 表油菜素内酯增加了超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性, 缓解了高温胁迫下 MDA 和 H_2O_2 的积累, 增强了甘蓝抗氧化能力, 提高了渗透调节物质脯氨酸和可溶性蛋白含量, 有效缓解了高温胁迫对甘蓝幼苗的影响, 其中以 0.5 mg/L 表油菜素内酯处理效果较显著。这表明, 表油菜素内酯有利于降低高温胁迫对甘蓝幼苗的抑制作用。

关键词:表油菜素内酯; 甘蓝; 高温胁迫; 耐热性; 生长指标; 生理指标

中图分类号: S635.101 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)07-0137-05

结球甘蓝 (*Brassica oleracea* var. *capitata*) 是十字花科芸薹属一种重要蔬菜, 在中国种植广泛。高温是蔬菜生产中最常见的逆境因子, 严重影响蔬菜的产量和品质。秋甘蓝播种一般在 6—7 月, 幼苗期正值夏季高温, 热胁迫会使甘蓝幼苗的生理代谢紊乱, 生长受到抑制或造成徒长, 育成的秧苗质量差, 抗逆性弱, 严重影响后期产量和品质^[1]。因此, 增强甘蓝幼苗的耐热性是生产中亟待解决的问题。油菜素内酯(brassinolide, 简称 BR) 是一种新型植物生长调节剂, 被称为第六大类植物激素, 在植物体内含量极低, 但生理活性却极高, 经极低质量浓度处理便能表现出明显的生理效应。研究结果表明, 油菜素内酯可调节植物本身所需要的多种酶、激素, 提高植物对许多胁迫, 如水分、盐分及病害等的抗性^[2-3]。人工合成的高活性油菜素内酯类似物为表油菜素内酯(24-epibrassinolide, 简称 EBR) 在生产上已广泛应用^[4]。在抗高温方面, 表油菜素内酯有利于甜瓜幼苗在高温胁迫下抗氧化酶活性的维持和对光能的捕获与转换, 有效促进脯氨酸(Pro) 的积累, Pro 作为膜的稳定剂, 增强了植物对不良环境的抵抗力, 促进生长^[5]。朱诚等报道, 黄瓜种子用 0.01~1 mg/L 表油菜素内酯浸种 24 h, 能提高幼苗对热激(48 °C, 90 min) 的忍耐性^[6]。康云艳等研究表明表油菜素内酯能促进低氧胁迫下黄瓜根系中抗氧化酶活性和 AsA、GSH 含量, 降低 ROS 含量, 增强黄瓜抗低氧胁迫的能力^[7]; 但有关表油菜素内酯对提高甘蓝耐热性的研究还未见报道。本试验以甘蓝品种启夏和苏甘 25 号为材料, 研究高温胁迫下表油菜素内酯对甘蓝幼苗的生理调节效应及其机制。

1 材料与方法

1.1 材料

供试甘蓝品种为耐热品种启夏和不耐热品种苏甘 25 号。由江苏省农业科学院提供。试验于 2014 年 7 月 15 日在南京农业大学园艺学院网室内进行。种子催芽后播种于 72 孔穴盘, 育苗基质为泥炭: 蛭石: 珍珠岩 = 2: 1: 1 的混合基质, 萌发后每隔 3 d 浇 1 次营养液, 育苗期平均温度为 25 °C, 按常规方法进行统一管理, 甘蓝 2 叶 1 心时进行表油菜素内酯和高温处理。

表油菜素内酯溶液设 0 (CK, 喷施清水处理)、0.25、0.5 mg/L 3 个质量浓度, 幼苗 3 叶 1 心时, 连续 4 d 喷施至叶面滴水, 处理完后, 放进光照培养箱进行高温胁迫处理, 高温处理为 42 °C 12 h 光照/30 °C 12 h 黑暗, 对照为 22 °C 12 h 光照/15 °C 12 h 黑暗, 光照度为 30 000 lx, 处理 2 d 后, 进行各项指标测定。

1.2 方法

1.2.1 生长指标测定 高温处理后, 在每个处理穴盘中随机选取 3 株植株, 测定其株高、根长、鲜质量。

1.2.2 生理生化指标测定 称取 0.2 g 各处理的幼苗叶片, 置于预冷的研钵中, 加入 50 mmol/L、pH 值 7.8 的磷酸缓冲液(PBS) 5 mL 在冰浴中研磨提取, 在 4 °C 离心机中 9 000 r/min 离心 20 min, 取上清液定容至 10 mL, 上清液为酶提取液, 用于超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD) 和抗坏血酸过氧化物酶(APX) 测定。SOD 活性测定采用氮蓝四唑法^[8], CAT 活性测定采用高锰酸钾滴定法^[9], POD 活性测定采用愈创木酚法^[9], APX 活性测定采用 Nakano 等的方法^[10]。丙二醛(MDA) 含量测定采用 TCA-TBA 法^[8], 游离脯氨酸含量测定参照李合生等的方法^[8]。过氧化氢(H_2O_2) 含量的测定用碘化钾分光光度法^[11]。可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[12-13]。叶绿素含量测定采用光谱吸收法^[14]。以上生理指标测定均设置 3 次重复。

1.2.3 数据处理 采用 Origin 软件进行绘图, 用 SPSS 统计

收稿日期: 2015-04-25

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(13)3012]; 南京农业大学 SRT 项目(编号: 1414A22)。

作者简介: 苏 南(1991—), 女, 广西北海人。E-mail: bhgdsy@126.com。

通信作者: 苏小俊, 博士, 研究员, 主要从事瓜类和十字花科蔬菜遗传育种研究。Tel: (025) 84391259; E-mail: suxj606@gmail.com。

软件对平均数用 *t* 测验和 Duncan's 新复极差法进行比较分析。

2 结果与分析

2.1 外源表油菜素内酯可促进甘蓝幼苗在常温 and 高温下的生长

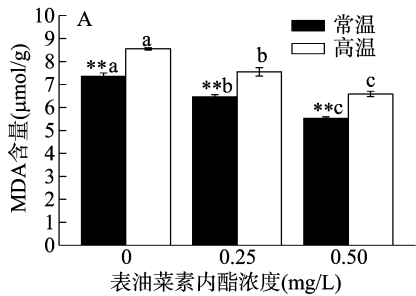
由表 1、表 2 可以看出,在常温下,表油菜素内酯对 2 个甘蓝品种幼苗生长均有促进作用,高温胁迫下,甘蓝幼苗生长明显变弱,但相比于未喷施表油菜素内酯的高温处理,表油菜素内酯处理增加了幼苗根长、株高、鲜质量,说明表油菜素内酯能缓解高温胁迫,对幼苗生长有促进作用,其中,在表油菜素内酯质量浓度为 0.5 mg/L 时,能显著提高甘蓝幼苗对高温胁迫的耐受性。

| 表 1 表油菜素内酯在不同温度下对启夏生长指标的影响 | | | | |
|----------------------------|------------------|--------|--------|-----------|
| 温度 | 表油菜素内酯质量浓度(mg/L) | 根长(cm) | 株高(cm) | 幼苗鲜质量(mg) |
| 常温 | 0(CK) | 13.46c | 2.60b | 164.69c |
| | 0.25 | 14.17b | 2.94a | 169.92b |
| | 0.50 | 15.92a | 3.01a | 178.16a |
| 高温 | 0(CK) | 10.53c | 2.49b | 153.66c |
| | 0.25 | 11.27b | 2.67a | 172.31b |
| | 0.50 | 13.31a | 2.71a | 177.05a |

注:同列数据后不同小写字母表示相同温度下不同表油菜素内酯质量浓度处理之间差异达显著水平($P<0.01$)。

2.2 外源表油菜素内酯对高温胁迫下甘蓝幼苗生理指标的影响

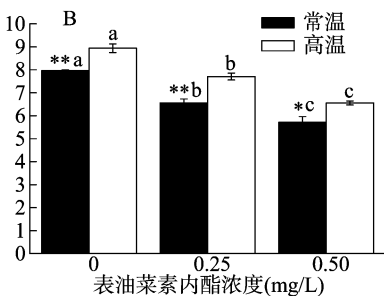
2.2.1 外源表油菜素内酯对高温胁迫下甘蓝幼苗叶片 MDA 含量和 H₂O₂ 含量的影响 由图 1 可知,与常温处理相比,高温胁迫下,甘蓝幼苗的MDA含量均显著升高,但无论是常温



| 表 2 表油菜素内酯在不同温度下对苏甘 25 号生长指标的影响 | | | | |
|---------------------------------|------------------|--------|--------|-----------|
| 温度 | 表油菜素内酯质量浓度(mg/L) | 根长(cm) | 株高(cm) | 幼苗鲜质量(mg) |
| 常温 | 0(CK) | 8.89c | 2.25b | 141.26c |
| | 0.25 | 9.39b | 3.17a | 152.60b |
| | 0.50 | 9.56a | 3.30a | 158.61a |
| 高温 | 0(CK) | 7.42c | 1.91c | 138.55c |
| | 0.25 | 8.19b | 2.45b | 147.62b |
| | 0.50 | 8.87a | 2.65a | 154.80a |

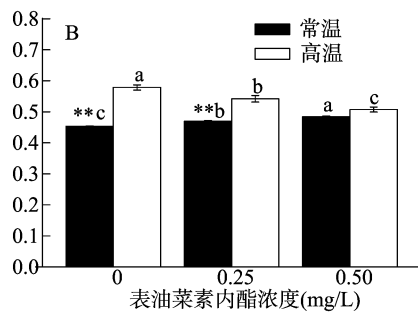
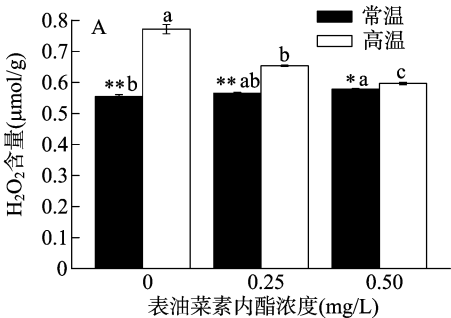
注:同列数据后不同小写字母表示相同温度下不同表油菜素内酯质量浓度处理之间差异达显著水平($P<0.01$)。

处理还是高温胁迫下,经表油菜素内酯处理的甘蓝 MDA 含量均显著低于未经表油菜素内酯处理的对照。且表油菜素内酯质量浓度为 0.5 mg/L 处理的甘蓝幼苗叶片的 MDA 含量最低,其中启夏为 6.59 μmol/g,苏甘 25 号为 6.56 μmol/g,与喷清水的对照相比,启夏和苏甘 25 号分别降低了 26.6% 和 22.9%,这说明外施适宜质量浓度表油菜素内酯有效缓解了高温对甘蓝幼苗叶片膜的膜脂过氧化作用。低质量浓度的 H₂O₂ 是一种信号物质,高质量浓度的 H₂O₂ 是一种伤害物质^[15],由图 2 可知,常温下,表油菜素内酯处理可诱导幼苗叶片中 H₂O₂ 含量升高,与清水处理相比,0.5 mg/L 表油菜素内酯处理显著提高了甘蓝幼苗 H₂O₂ 含量,但均低于高温胁迫下 H₂O₂ 的质量浓度。而高温胁迫处理后,2 个品种的甘蓝幼苗叶片的 H₂O₂ 含量均显著高于常温处理,表油菜素内酯处理可显著降低叶片中 H₂O₂ 的含量(除苏甘 25 号 0.5 mg/L 表油菜素内酯处理),表油菜素内酯质量浓度为 0.5 mg/L 时效果较为明显。与喷清水的对照相比,启夏和苏甘 25 号 H₂O₂ 含量分别降低了 22.7% 和 12.3%。不管是常温还是高温处理,苏甘 25 号 H₂O₂ 含量整体低于启夏甘蓝。



柱上不同小写字母表示同一温度下不同质量浓度之间差异显著($P<0.05$); *、**分别表示同一质量浓度下不同温度处理间差异显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)

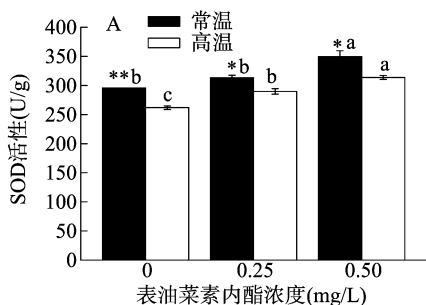
图1 不同质量浓度表油菜素内酯对不同温度下启夏(A)和苏甘25号(B)甘蓝幼苗MDA含量的影响



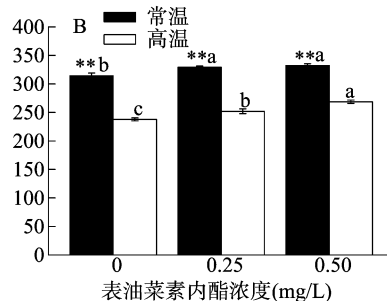
注同图1

图2 不同质量浓度表油菜素内酯对不同温度下启夏(A)和苏甘25号(B)甘蓝幼苗H₂O₂含量的影响

2.2.2 外源表油菜素内酯对高温胁迫下甘蓝幼苗抗氧化酶活性的影响 由图 3、图 4、图 5、图 6 可看出,与对照相比,高温胁迫后,除启夏以 0.25 mg/L 表油菜素内酯处理的 POD 活性和苏甘 25 号以 0.25 mg/L 表油菜素内酯处理的 CAT 活性没有显著提高外,其他处理的 SOD、POD、CAT、APX 活性均显著高于对照,以表油菜素内酯 0.5 mg/L 处理效果最佳,启夏和苏甘 25 号分别比对照提高 18.3% 和 5.7%、68.8% 和 61.6%、17.1% 和 13.8%、25.2% 和 52.4%。总体来说,无论是常温还是高温,表油菜素内酯 0.5 mg/L 处理酶活性 > 0.25 mg/L 处理酶活性 > CK 处理酶活性。其中由图 3 可知,

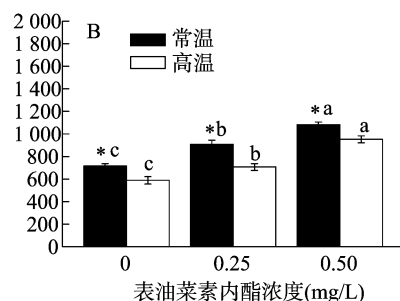
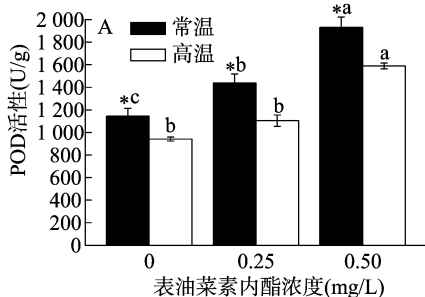


常温下,启夏以 0.25 mg/L 表油菜素内酯处理与对照差异不显著,但与喷清水的对照相比,SOD 活性提高了 6.0%,苏甘 25 号以 0.5 mg/L 和 0.25 mg/L 表油菜素内酯处理间效果差异不显著,但 SOD 活性均大于对照,分别提高 5.7% 和 4.6%。由图 5 可看出,常温下,启夏以 0.25 mg/L 处理的 CAT 活性相比对照没有显著提高,苏甘 25 号经表油菜素内酯处理的 2 个质量浓度间没有显著性差异。并且在所有氧化酶活性指标中,2 个品种同一处理组常温 and 高温差异均显著,有些还为极显著。启夏和苏甘 25 号间差异也为显著。



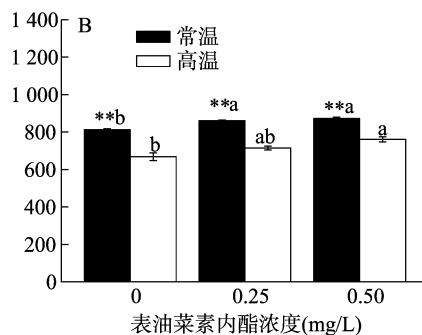
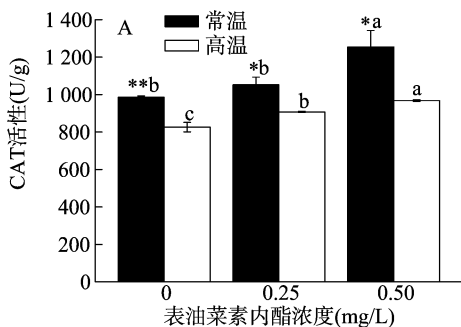
注同图1

图3 不同质量浓度表油菜素内酯对不同温度下启夏(A)和苏甘25号(B)甘蓝幼苗SOD活性的影响



注同图1

图4 不同质量浓度表油菜素内酯对不同温度下启夏(A)和苏甘25号(B)甘蓝幼苗POD活性的影响

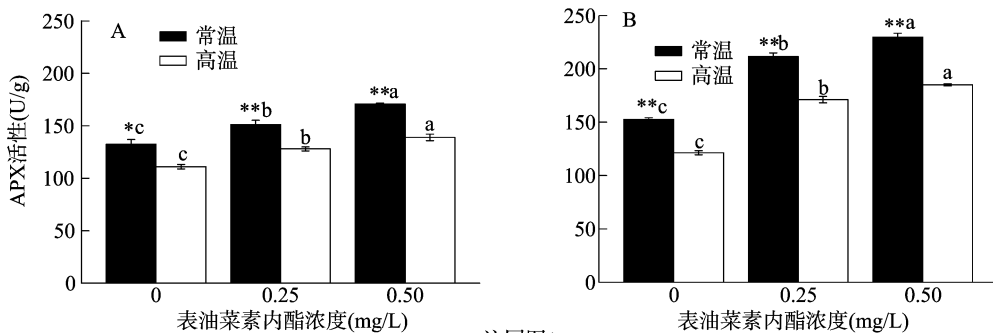


注同图1

图5 不同质量浓度表油菜素内酯对不同温度下启夏(A)和苏甘25号(B)甘蓝幼苗CAT活性的影响

2.2.3 表油菜素内酯对高温胁迫下甘蓝幼苗脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响 脯氨酸是最重要和有效的有机渗透调节物质,几乎所有的逆境,如干旱、高温、低温、冰冻、盐渍、低 pH 值、营养不良、病害、大气污染等都会造成植物体内脯氨酸的累积。脯氨酸作为一种膜的稳定剂,能保持细胞膜结构的完整性。因此,在高温胁迫下,脯氨酸含量的高低可以作为植物对高温逆境抵抗强弱的一个生理鉴定指标^[16]。由图 7 可看

出,高温胁迫后,幼苗叶片的脯氨酸含量升高,经表油菜素内酯处理的脯氨酸含量比对照的脯氨酸含量要高,且差异显著,其中表油菜素内酯质量浓度为 0.5 mg/L 的效果最为显著,启夏和苏甘 25 号分别比对照提高 16.8% 和 11.4%。但启夏在常温下,以 0.25 mg/L 表油菜素内酯处理的 Pro 含量提高不显著,高温胁迫后,经表油菜素内酯处理的 2 个浓度间差异不明显。2 个品种间同一处理组常温 and 高温差异均极显著。

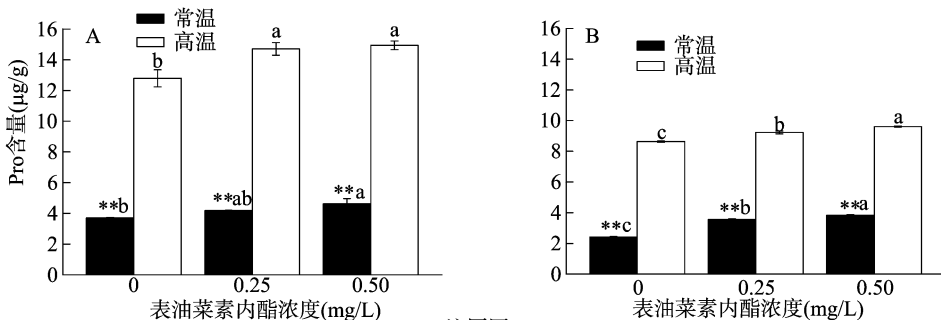


注同图1

图6 不同质量浓度表油菜素内酯对不同温度下启夏(A)和苏甘25号(B)甘蓝幼苗APX活性的影响

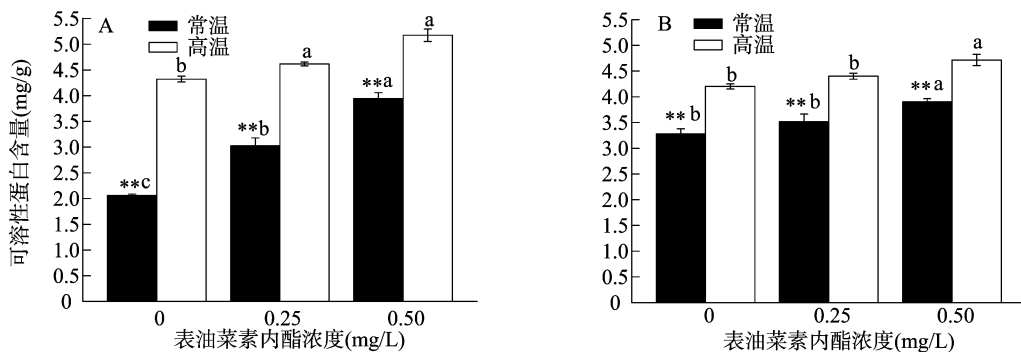
可溶性蛋白含量的提高可以增加细胞的渗透势和功能蛋白(如热激蛋白)的数量,有助于维持细胞正常的代谢,提高植物的抗逆性^[4]。由图8可知,高温胁迫后,启夏幼苗叶片的可溶性蛋白含量升高,其升高趋势大于苏甘25号的升高趋势,且经表油菜素内酯处理的可溶性蛋白含量均显著高于对

照,其中以质量浓度为0.5 mg/L的处理效果更显著,为5.18 mg/g,较对照提高16.5%。无论是在常温还是在高温下,品种苏甘25号在表油菜素内酯浓度为0.25 mg/L时可溶性蛋白含量升高均不显著,而在表油菜素内酯浓度为0.5 mg/L时升高显著,为4.72 mg/L,较对照提高12.2%。



注同图1

图7 不同质量浓度表油菜素内酯对不同温度下启夏(A)和苏甘25号(B)甘蓝幼苗脯氨酸(Pro)含量的影响



注同图1

图8 不同质量浓度表油菜素内酯对不同温度下启夏(A)和苏甘25号(B)甘蓝幼苗可溶性蛋白含量的影响

2.2.4 表油菜素内酯对高温胁迫下甘蓝幼苗叶绿素的影响

叶绿素是光合作用不可缺少的重要物质,因而有的学者曾尝试以测定高温胁迫下叶绿素含量的变化来鉴定作物抗热性,但罗少波等^[17]、杨丽薇等^[18]、马德华等^[19]对大白菜和黄瓜的研究表明,叶绿素含量变化没有一定的规律性,或与温度逆境的抗性无明显的相关性,因此认为叶绿素含量变化率不能作为耐热性的一个生理指标。本试验通过对叶绿素含量的测定来确定表油菜素内酯处理能否提高甘蓝幼苗对高温的抵抗能力,结果发现各个不同质量浓度处理后在高温胁迫下,甘蓝幼苗叶片中叶绿素含量的变化没有一定的规律性,所以认为叶绿素含量测定不能作为表油菜素内酯诱导甘蓝抗热性的一个生理指标。

3 结论与讨论

油菜素内酯是一种新型植物激素,在植物体内含量极低,但生理活性却极高,人们对表油菜素内酯生理作用的研究越来越重视。研究表明油菜素内酯可通过增强植物体内抗氧化酶活性和增加植物体内抗氧化物质含量来提高植物抗逆境的能力^[20]。本试验表明,高温胁迫后甘蓝幼苗株高、根长和鲜质量均显著低于对照,外源表油菜素内酯可以有效缓解高温胁迫对甘蓝幼苗生长的抑制作用(表1、表2)。

植物处于逆境条件下活性氧物质会升高,低质量浓度的 H_2O_2 是一种信号物质,高质量浓度的 H_2O_2 是一种伤害物质^[15]。细胞中MDA是膜脂过氧化作用的主要产物,其含量

的多少可表示植物细胞膜受伤害程度的大小。本试验中,常温下表油菜素内酯处理提高了 H_2O_2 质量浓度,可能是作为一种信号物质增强植物抗性。与常温处理相比,高温胁迫下 H_2O_2 含量显著升高,表油菜素内酯处理有效降低了叶片 MDA 和 H_2O_2 含量的积累,抑制膜脂过氧化,缓解了高温胁迫对植株的伤害。

在生物膜脂过氧化酶促防御体系中,SOD、POD、CAT、APX 等均是重要的膜保护酶类。在本试验中,高温胁迫后,抗氧化酶活性显著降低,但经表油菜素内酯处理的甘蓝幼苗叶片的抗氧化酶活性显著高于对照,说明表油菜素内酯能有效缓解高温胁迫对甘蓝幼苗叶片的抗氧化酶活性的影响,其中表油菜素内酯以质量浓度 0.5 mg/L 处理效果更佳,2 个品种中,除 APX 酶活性外,启动酶活性均高于苏甘 25 号,可能 2 个品种活性氧清除系统存在一定差异。

高温胁迫条件下,植物会主动积累可溶性蛋白和脯氨酸,抵抗热胁迫的伤害^[21-22]。本研究中,高温胁迫后,叶片的可溶性蛋白和脯氨酸含量显著提高,表油菜素内酯处理可进一步提高脯氨酸和可溶性蛋白的积累(图 7、图 8)。以上结果说明了表油菜素内酯处理可通过增加渗透调节物质的积累来提高甘蓝植株的渗透调节能力,从而有利于提高机体对高温伤害的抵抗能力。前人研究表明可溶性蛋白含量的提高可以增加细胞的渗透势、功能蛋白(如热激蛋白)的数量、维持细胞或组织持水能力,有助于维持细胞正常的代谢,提高植物的抗逆性^[4]。2 个品种均以表油菜素内酯处理质量浓度为 0.5 mg/L 最佳。

对叶绿素含量的研究表明,叶绿素含量的变化没有一定的规律性,所以认为叶绿素含量测定不能作为表油菜素内酯诱导甘蓝抗热性的一个生理指标。

综上所述,表油菜素内酯处理显著缓解了高温胁迫下对甘蓝幼苗的伤害,一定程度上促进了甘蓝幼苗的生长,以质量浓度为 0.5 mg/L 的喷施效果最佳,提高了抗氧化酶 SOD、POD、CAT 和 APX 活性,降低了 MDA 和 H_2O_2 含量,增加了脯氨酸和可溶性蛋白含量,从而增强植株抗高温胁迫的能力。而就 2 个品种来比较,启动的 SOD、POD、CAT 酶活性、 H_2O_2 和脯氨酸含量高于苏甘 25 号,MDA 含量和 APX 酶活性则低于苏甘 25 号,但不能由此推断启动比苏甘 25 号更耐热。甘蓝耐热性的复杂表现受品种多种生理特性的综合影响,具有较为复杂的数量性状遗传倾向^[23],还需进一步研究。万正林研究认为 0.5 mg/L 表油菜素内酯处理番茄效果最佳,抗高温胁迫能力最强^[16];朱诚等发现外施 0.01 ~ 1 mg/L 表油菜素内酯能提高黄瓜幼苗对热激的忍耐性^[6];耶兴元等发现 0.3 mg/L 表油菜素内酯能提高猕猴桃耐热性^[20];吴雪霞等用 0.05 mg/L 表油菜素内酯喷施增强了茄子抗高温胁迫的能力^[4]。说明不同作物适宜的表油菜素内酯质量浓度不同。本研究中表油菜素内酯处理甘蓝幼苗以质量浓度 0.5 mg/L 为最佳,可显著提高甘蓝幼苗耐高温的能力,但可能会有更适的质量浓度,需要进一步研究。

参考文献:

[1] 陈碧华. 温度处理对甘蓝幼苗耐热性的影响研究[D]. 重庆:西南农业大学,2004:1-63.

- [2] Steber C M, McCourt P. A role for brassinosteroids in germination in *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiology*, 2001, 125(2): 763-769.
- [3] 纪秀娥, 史留功, 胡春红, 等. 油菜素内酯对小麦、玉米种子萌发的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(9): 88-89.
- [4] 吴雪霞, 查丁石, 朱宗文, 等. 外源 24-表油菜素内酯对高温胁迫下茄子幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. *植物生理学报*, 2013, 49(9): 929-934.
- [5] 张永平, 陈幼源, 杨少军. 高温胁迫下 24-表油菜素内酯对甜瓜幼苗生理及光合特性的影响[J]. *植物生理学报*, 2012, 48(7): 683-688.
- [6] 朱 诚, 曾广文, 刘非燕. 表油菜素内酯对黄瓜幼苗热激忍耐和抗氧化代谢的关系[J]. *浙江农业大学学报*, 1996, 22(3): 66-70.
- [7] 康云艳, 郭世荣, 李 娟, 等. 24-表油菜素内酯对低氧胁迫下黄瓜幼苗根系抗氧化系统的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 153-161.
- [8] 李合生, 孙 群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 123-258.
- [9] 徐朗莱, 叶茂炳. 过氧化物酶活力连续记录测定法[J]. *南京农业大学学报*, 1989, 12(3): 82-83.
- [10] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22: 867-880.
- [11] Chakrabarty D, Datta S K. Micropropagation of gerbera: lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities during acclimatization process [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2008, 30(3): 325-331.
- [12] Arora R, Wisniewski M E. Cold acclimation in genetically related (sibling) deciduous and evergreen peach: A 60-kDa bark protein in cold-acclimated tissue of peach is heat-stable and related to the dehydrin family of proteins [J]. *Plant Physiology*, 1994, 105: 95-101.
- [13] Brady C J, Tung H F. Rate of protein synthesis in senescing, detached wheat leaves [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1975, 2: 163-176.
- [14] Arnon D L. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenol oxidase in *Beta vulgaris* [J]. *Plant Physiology*, 1949, 24: 1-15.
- [15] Mittler R, van Derauwera S, Suzuki N, et al. ROS signaling: the new wave [J]. *Trends in Plant Science*, 2011, 6: 300-309.
- [16] 万正林. 水杨酸、表油菜素内酯诱导番茄幼苗抗高温机理的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007: 1-56.
- [17] 罗少波, 李智军, 周微波, 等. 大白菜品种耐热性的鉴定方法[J]. *中国蔬菜*, 1996(2): 16-18.
- [18] 杨丽薇, 王景义, 梁惠芳, 等. 早熟大白菜耐热性鉴定技术[J]. *北方园艺*, 1996(6): 5-6.
- [19] 马德华, 庞金安, 李淑菊, 等. 温度逆境锻炼对高温下黄瓜幼苗生理的影响[J]. *园艺学报*, 1998, 25(4): 39-44.
- [20] 耶兴元, 全胜利, 张 燕. 油菜素内酯对高温胁迫下猕猴桃苗耐热性相关生理指标的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(9): 113-116.
- [21] 何晓明, 林毓娥, 陈清华, 等. 高温对黄瓜幼苗生长、脯氨酸含量及 SOD 酶活性的影响[J]. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2002, 20(1): 30-33.
- [22] 吴桂容, 严重玲. 镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响[J]. *生态环境*, 2006, 15(5): 1003-1008.
- [23] 康俊根, 翟依仁, 张京社, 等. 甘蓝耐热性鉴定方法[J]. *中国蔬菜*, 2002(1): 4-7.