

毕云飞, 苏小俊, 蒋芳玲, 等. 外源水杨酸对高温胁迫下甘蓝幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(8): 133–138.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.08.043

# 外源水杨酸对高温胁迫下甘蓝幼苗生长及生理特性的影响

毕云飞<sup>1,2</sup>, 苏小俊<sup>1</sup>, 蒋芳玲<sup>2</sup>, 吴震<sup>2</sup>, 苏南<sup>2</sup>, 刘勋<sup>2</sup>

(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:**为探讨外源水杨酸对高温胁迫下甘蓝幼苗耐热性的影响,以甘蓝品种启夏和苏甘 25 号为试验材料,对甘蓝叶片喷施质量浓度为 7.5 mg/L 和 15 mg/L 的水杨酸溶液,以喷施清水为对照,连续喷施 4 d 后置于高温(昼 42 ℃/夜 30 ℃)和常温(昼 22 ℃/夜 15 ℃)下进行处理。结果表明,在生长指标方面,水杨酸可显著促进甘蓝幼苗的根的生长,提高植株的根冠比和启夏的干鲜质量和 G 值;在生理指标方面,外源水杨酸可以显著提高因高温胁迫而降低的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性,降低因高温而显著升高的丙二醛(MDA)含量、脯氨酸(Pro)含量、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)含量和电导率。综合来看,水杨酸可以有效地提高甘蓝幼苗的抗热性,浓度以 15 mg/L 效果较佳。

**关键词:**水杨酸;高温胁迫;甘蓝;幼苗;生长指标;生理特性

**中图分类号:** S635.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)08-0133-06

结球甘蓝(*Brassica oleracea* var. *capitata*)简称甘蓝,是十字花科芸薹属的一种重要蔬菜,性平味甘,营养丰富,深受消费者喜爱,在中国种植广泛。秋甘蓝播种一般在 6—7 月,易受高温逆境的影响,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;因此,如何减轻高温胁迫对甘蓝幼苗生长的影响,对甘蓝产业的健康发展至关重要。目前生产上控制夏季育苗甘蓝徒长的方法主要是控水育苗和使用生长调节剂。控水育苗是人为制造干旱环境使植株矮化,但干旱本身是一种胁迫,控水不当极易对秧苗造成伤害,严重时会造成僵

化苗<sup>[1-3]</sup>,使甘蓝失去商品价值,轻则影响产量,重则绝收,给农户造成重大损失。使用抑制徒长的生长调节剂虽然效果较为显著,但使用不当也会造成后期植株不能恢复正常生长。此外,长期大量使用植物生长调节剂会对环境造成污染。因此,选用环境友好的生长调节剂并确定其适宜的浓度对甘蓝生产具有重要意义。水杨酸(salicylic acid,简称 SA)是植物体内产生的一种简单酚类化合物,是重要的能够激活植物过敏反应和系统获得性抗性的内源信号分子<sup>[4]</sup>,在诱导植物抗病、耐高温、耐低温、抗盐碱等抗性形成中起十分关键的作用<sup>[5-6]</sup>。马德华等研究发现,高温驯化使黄瓜叶片内游离态水杨酸增加 2.5 倍以上<sup>[7]</sup>。1~100 μmol/L 水杨酸可保护黄瓜、生菜、葡萄等植物幼苗及组织免受热激伤害<sup>[8-11]</sup>。烟草受到热胁迫时其内源水杨酸水平也升高<sup>[12]</sup>。但在甘蓝中,水杨酸是否能提高幼苗耐高温的能力,最适浓度为多少还未见报道。为此,本试验以 2 个甘蓝品种苏甘 25 号和启夏为材料,研究高温条件下外源水杨酸对甘蓝生长及生理特性的影响,为提高夏季育苗中甘蓝的耐高温能力提供理论和实践依据。

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:毕云飞(1994—),女,山东淄博人,主要从事蔬菜栽培和育种研究。E-mail: 517702994@qq.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: xiaojunsu@yahoo.com。

[2] Purdy R E, Kolattukudy P E. Hydrolysis of plant cuticle by plant pathogens. Purification, amino acid composition, and molecular weight of two isozymes of cutinase and a nonspecific esterase from *Fusarium solani* f. *lisi*[J]. *Biochemistry*, 1975, 14(13): 2824–2831.

[3] 杨媚, 杨迎青, 郑丽, 等. 水稻纹枯病菌细胞壁降解酶组分分析、活性测定及其致病作用[J]. *中国水稻科学*, 2012, 26(5): 600–606.

[4] 孙广宁, 宗兆锋. 植物病理学试验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 143.

[5] 吴洁云. 灰葡萄孢角酶, 细胞壁降解酶种类及其对番茄植株的致病作用[D]. 扬州: 扬州大学, 2007: 21–24.

[6] 董小梅. 龙眼焦腐病菌细胞壁降解酶及其致病机理的研究[D].

福州: 福建农林大学, 2010: 12–14.

[7] 杨迎青, 孟凡, 兰波, 等. 芦笋茎枯病菌细胞壁降解酶活性的测定及条件优化[J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(2): 57–60.

[8] 杨海清. 桃褐腐病致病性及拮抗细菌生防机制的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007: 16.

[9] Degani O, Gepstein S, Dosoretz C G. Potential use of cutinase in enzymatic scouring of cotton fiber cuticle[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2002, 102/103(1/2/3/4/5/6): 277–289.

[10] Li D H, Alison M A, Johnstone K. The American phytopathological society molecular evidence that the extracellular cutinase Pbcl is required for pathogenicity of *pyrenopeziza brassicae* on oilseed[J]. *RapMPMI*, 2003, 16(6): 45–55.

1 材料与方法

1.1 材料

供试甘蓝品种为苏甘 25 号和启夏<sup>[13]</sup>,甘蓝种子均由江苏省农业科学院提供。试验于 2014 年 11 月 4 日进行浸种催芽,2014 年 11 月 6 日播种于 72 孔穴盘中,基质配比为草炭:蛭石:珍珠岩=2:1:1,随后将穴盘放置在光照培养箱中(培养箱型号:GXZ-280B,宁波江南仪器厂),温度为昼 22℃/夜 15℃,相对湿度均为 80% 左右,萌发后每隔 3 d 浇 1 次营养液。

2014 年 12 月 6 日,待甘蓝幼苗长至 3~4 张真叶时,进行试验处理,用浓度为 0(蒸馏水)、7.5 mg/L 和 15 mg/L 的水杨酸溶液喷施甘蓝幼苗至叶片滴水,连续喷施 4 d,以使甘蓝幼苗充分吸收水杨酸,4 d 后对幼苗进行温度处理,高温处理温度为昼 42℃/夜 30℃,常温处理为昼 22℃/夜 15℃,组成如下 12 个处理组合:苏甘高温喷施蒸馏水、苏甘高温喷施 7.5 mg/L 水杨酸、苏甘高温喷施 15 mg/L 水杨酸、苏甘常温喷施蒸馏水、苏甘常温喷施 7.5 mg/L 水杨酸、苏甘常温喷施 15 mg/L 水杨酸、启夏高温喷施自来水、启夏高温喷施 7.5 mg/L 水杨酸、启夏高温喷施 15 mg/L 水杨酸、启夏常温喷施蒸馏水、启夏常温喷施 7.5 mg/L 水杨酸、启夏常温喷施 15 mg/L 水杨酸。高温处理与对照培养除温度不同外,光照和湿度状况均保持一致。高温胁迫 2 d 后取第 2 张真叶进行测定各项指标,3 次重复。

1.2 方法

生长指标测定:根长采用直尺测量清洗干净的根基部到根尖的长度;株高采用直尺测量茎基部到生长点的长度;茎粗采用游标卡尺测量茎中部宽度;地上部和地下部鲜质量采用电子天平称量;经烘箱 105℃ 杀青 20 min,80℃ 烘干 24 h 后用电子天平称量其地上部和地下部干质量。之后计算各项壮苗指标。

根冠比=地下部干质量(g)/地上部干重(g);

G 值=全株干质量(g)/育苗天数(d);

壮苗指数=茎粗(mm)/株高(cm)。

生理指标测定:称取 0.2 g 各处理的甘蓝 2 叶 1 心幼苗叶片,置于预冷的研钵中,加入 50 mmol/L、pH 值 7.8 的磷酸

缓冲液 5 mL,在冰浴中研磨提取,在 4℃ 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<sup>[14]</sup>,CAT 活性测定采用高锰酸钾滴定法<sup>[15]</sup>,POD 活性测定采用愈创木酚法<sup>[14]</sup>。丙二醛(MDA)含量测定采用 TCA-TBA 法<sup>[14]</sup>,游离脯氨酸含量测定参照李合生的方法<sup>[14]</sup>,可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法<sup>[16-17]</sup>,电导测定参照陈爱葵等的方法<sup>[18]</sup>,过氧化氢含量采用碘化钾分光光度法测定<sup>[19]</sup>。

数据采用 SPSS 统计软件对平均数用 *t* 测验和 LSD 法进行差异显著性多重比较(*P*<0.05);使用 Origin 8 进行作图。

2 结果与分析

2.1 水杨酸处理对甘蓝幼苗生长指标的影响

由表 1 可知,经过高温胁迫后的幼苗根的生长受到抑制,根长显著低于常温状态下的幼苗。但经水杨酸处理后,幼苗根长显著增加,且 15 mg/L 水杨酸对 2 个品种甘蓝幼苗根长促进作用较好,苏甘 25 号甘蓝的根长在常温条件和高温条件下分别增加 38.94% 和 33.82%,启夏甘蓝的根长在常温条件和高温条件下增加长度均为 48.68%。常温下未经水杨酸处理的 2 个品种根长无显著差异,经过水杨酸处理后,甘蓝幼苗的根长在高温胁迫下差异明显,启夏的根要长于苏甘 25 号。根长的增加使得幼苗的根冠比增大,苏甘 25 号和启夏根冠比分别增大 34.38% 和 47.06%,2 个甘蓝品种根冠比增大均以 15 mg/L 的水杨酸处理最为显著。

对甘蓝幼苗 *G* 值的统计后发现,甘蓝品种苏甘 25 号的 *G* 值在不同浓度水杨酸处理过后无显著差异,启夏幼苗的 *G* 值在经过水杨酸处理后无论常温条件和高温条件下 *G* 值均升高,以 15 mg/L 最为显著。在 15 mg/L 水杨酸处理条件下,常温 and 高温条件下启夏的 *G* 值分别提高了 0.002 2 和 0.000 9。

本试验中不同温度和不同浓度水杨酸处理后甘蓝幼苗在株高和茎粗上差异不显著,因此壮苗指数无显著差异。这样的结果可能是由于高温处理时间不长,幼苗生长有限所致。

表 1 水杨酸处理对甘蓝幼苗生长指标的影响

温度	水杨酸质量 浓度(mg/L)	苏甘 25 号						启夏					
		根长 (cm)	鲜质量 (g)	干质量 (g)	根冠比	<i>G</i> 值	壮苗 指数	根长 (cm)	鲜质量 (g)	干质量 (g)	根冠比	<i>G</i> 值	壮苗 指数
常温	0(CK)	10.99 <sup>c**</sup>	1.78 <sup>a**</sup>	0.19 <sup>a*</sup>	0.34 <sup>b</sup>	0.0049 <sup>a</sup>	0.82 <sup>a</sup>	11.71 <sup>c**</sup>	1.78 <sup>b**</sup>	0.17 <sup>b</sup>	0.33 <sup>c</sup>	0.004 6 <sup>b</sup>	0.78 <sup>a</sup>
	7.5	12.51 <sup>b*</sup>	1.74 <sup>a</sup>	0.18 <sup>a**</sup>	0.42 <sup>ab*</sup>	0.004 7 <sup>a**</sup>	0.83 <sup>a</sup>	15.38 <sup>b**</sup>	1.77 <sup>ab</sup>	0.20 <sup>b*</sup>	0.46 <sup>b</sup>	0.005 3 <sup>ab*</sup>	0.89 <sup>a</sup>
	15.0	15.27 <sup>a**</sup>	1.88 <sup>a**</sup>	0.23 <sup>a**</sup>	0.48 <sup>a*</sup>	0.006 0 <sup>a**</sup>	0.95 <sup>a</sup>	17.41 <sup>a**</sup>	1.95 <sup>a**</sup>	0.26 <sup>a**</sup>	0.54 <sup>a</sup>	0.006 8 <sup>a**</sup>	1.01 <sup>a**</sup>
高温	0(CK)	8.9 <sup>c</sup>	1.56 <sup>a</sup>	0.12 <sup>a</sup>	0.29 <sup>b</sup>	0.003 2 <sup>a</sup>	0.63 <sup>a</sup>	9.10 <sup>c</sup>	1.63 <sup>b</sup>	0.14 <sup>b</sup>	0.35 <sup>c</sup>	0.003 7 <sup>b</sup>	0.76 <sup>a</sup>
	7.5	10.83 <sup>b</sup>	1.74 <sup>a</sup>	0.13 <sup>a</sup>	0.30 <sup>ab</sup>	0.003 4 <sup>a</sup>	0.63 <sup>a</sup>	11.92 <sup>b</sup>	1.81 <sup>ab</sup>	0.17 <sup>b</sup>	0.38 <sup>b</sup>	0.004 5 <sup>ab</sup>	0.77 <sup>a</sup>
	15.0	11.91 <sup>a</sup>	1.71 <sup>a</sup>	0.16 <sup>a</sup>	0.38 <sup>a</sup>	0.004 1 <sup>a</sup>	0.89 <sup>a</sup>	13.53 <sup>a</sup>	1.79 <sup>a</sup>	0.18 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>	0.004 8 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>

注:同列后不同小写字母表示在同一温度处理下不同水杨酸质量浓度处理之间差异显著;\*、\*\* 分别表示在同一水杨酸质量浓度处理下不同温度处理之间差异显著、极显著。

2.2 水杨酸处理对甘蓝幼苗生理指标的影响

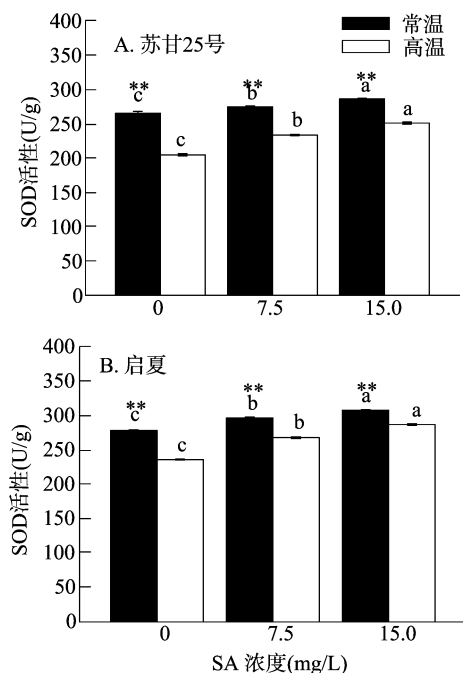
2.2.1 水杨酸处理对甘蓝幼苗体内抗氧化系统的影响

SOD、POD、CAT 和 APX 都是植物体内抗氧化系统中的重要酶,对植物正常的生长发育起到至关重要的作用。根据试验结果,此 4 种酶活性在高温胁迫下均有不同程度的下降。由

图 1 可知,在施用水杨酸之后,甘蓝幼苗体内的 SOD 活性明显上升,在常温情况下,喷施 7.5 mg/L 水杨酸时苏甘 25 号的 SOD 活性由 265.13 U/g 上升到 274.60 U/g,喷施 15 mg/L 水杨酸时 SOD 活性上升到 285.85 U/g;对启夏来说,SOD 活性在水杨酸浓度为 7.5 mg/L 时比空白对照上升了 18.26 U/g,水杨

酸浓度为 15 mg/L 时, 启夏 SOD 活性又增加了 11.06 U/g。水杨酸处理能够有效缓解因高温带来的 SOD 活性的下降, 当水杨酸浓度为 15 mg/L 时效果最为明显。在高温时喷施 15 mg/L 水杨酸的苏甘 25 号 SOD 活性比喷施蒸馏水提高了 46.14 U/g, 启夏 SOD 活性提高了 51.11 U/g。在常温 and 高温条件下启夏的 SOD 活性高于苏甘 25 号, 苏甘 25 号和启夏在不同温度和不同水杨酸浓度处理下差异均显著。

高温胁迫下 POD 活性显著降低, 酶正常活性受到影响, 苏甘 25 号 POD 活性在不经水杨酸处理时降低 139.13 U/g, 启夏 POD 活性降低 102.95 U/g。在施用水杨酸处理之后, 水杨酸则能够在常温和高温胁迫情况下显著提高植物体内 POD 的活性, 15 mg/L 的水杨酸溶液仍然使得酶活性提升程度最大, 在常温下提高苏甘 25 号 POD 活性 312.9 U/g, 高温下提高 POD 活性 364.01 U/g, 对于启夏来说分别达到了 501.22 U/g 和 481.15 U/g, 效果显著。不同浓度水杨酸及不同温度下品种间差异明显 (图 2)。



柱上不同小写字母表示在同一温度处理下不同水杨酸质量浓度处理之间差异显著; \*, \*\* 分别表示在同一水杨酸质量浓度处理下不同温度处理之间差异显著、极显著。

图1 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗SOD活性的影响

高温抑制了植物体内抗氧化酶的活性, 使植物受到热害胁迫。在使用了水杨酸进行处理之后, CAT 的活性略有提高, 但变化并不明显, 仅在水杨酸浓度稍高即为 15 mg/L 时提高显著, 常温时苏甘 25 号 CAT 活性提高 22.64 U/g, 高温时提高 33.36 U/g; 启夏在常温和高温时 CAT 活性分别提高 38.4, 54.09 U/g。低浓度水杨酸 (7.5 mg/L) 时 CAT 活性提升并不明显。品种间的差异仅在受较高浓度水杨酸 (15 mg/L) 处理过后显著, 空白对照及 7.5 mg/L 水杨酸处理过后 CAT 活性未见明显差异 (图 3)。

由图 4 知, 甘蓝幼苗体内 APX 活性与外源水杨酸的浓度呈正相关关系, 苏甘和启夏在不同水杨酸浓度下体内 APX 活性均差异显著, 经过高温胁迫的甘蓝幼苗体内 APX 活性显著

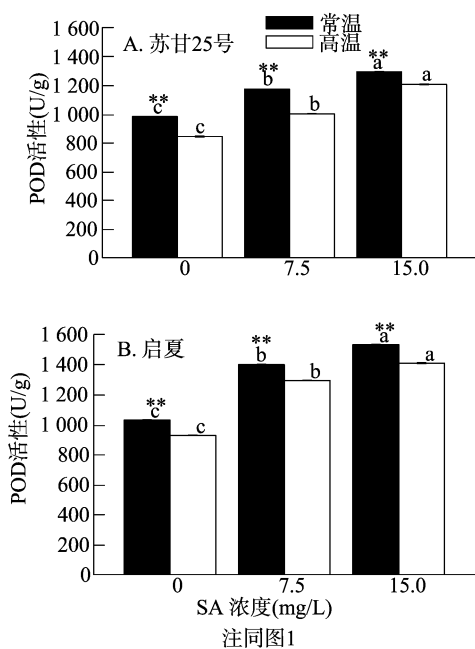


图2 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗POD活性的影响

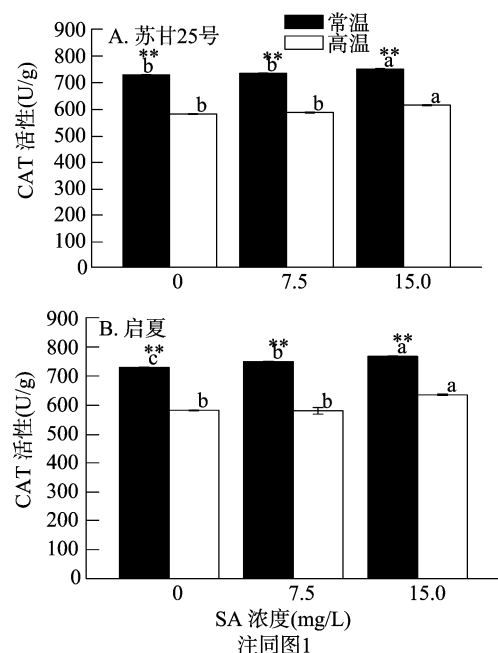


图3 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗CAT活性的影响

降低。常温和高温条件下的 APX 活性差异随着水杨酸浓度的提高而提高, 苏甘 25 号平均差异为 25.19 U/g, 启夏平均差异为 37.85 U/g, 启夏差异比苏甘 25 号大。2 个品种间差异显著, 同样以 15 mg/L 水杨酸处理效果最为明显。

## 2.2.2 水杨酸处理对甘蓝幼苗体内 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂氧化最重要的产物之一, 它的产生还能加剧膜的损伤, MDA 含量反映并影响了植物细胞膜系统的受损程度以及植物的抗逆性。由图 5 可以看出, 高温处理后细胞膜系统受损严重, MDA 含量明显升高, 无论苏甘 25 号还是启夏, 高温胁迫后只要施用水杨酸处理过后, 细胞内 MDA 含量均有明显下降, 膜系统受损程度降低。在常温条件下, 仅 15 mg/L

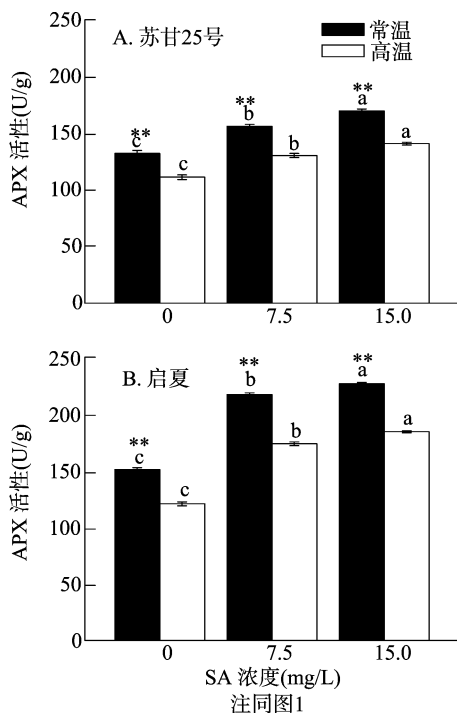


图4 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗APX活性的影响

可以使苏甘25号的MDA含量明显降低,对于启夏来说,只要施用水杨酸就可以显著降低甘蓝幼苗体内的MDA含量。15 mg/L水杨酸可以显著提高甘蓝幼苗的抗热性。在高温条件下,启夏幼苗的MDA含量略低于苏甘25号幼苗的MDA含量,因此启夏的耐热性略好于苏甘25号。

**2.2.3 水杨酸处理对甘蓝幼苗体内脯氨酸含量的影响** 脯氨酸也是反映植物抗逆性的重要指标之一。在高温条件下,脯氨酸含量显著上升,在苏甘25号中高达10.96  $\mu\text{g/mL}$ ,在耐热甘蓝启夏中也达到10.24  $\mu\text{g/mL}$ 。经过水杨酸处理后,苏甘25号和启夏幼苗体内的脯氨酸含量均显著降低,15 mg/L水杨酸使幼苗体内积累的脯氨酸含量降低最多,分别降低了20.99%和17.59%。在常温条件下,甘蓝幼苗的脯氨酸含量没有显著差异。

**2.2.4 水杨酸处理对甘蓝幼苗体内可溶性蛋白含量的影响** 经过高温处理后,甘蓝幼苗体内可溶性蛋白的含量明显升高,使用过水杨酸处理的幼苗体内可溶性蛋白的含量更高,在高温和施用15 mg/L水杨酸情况下,苏甘25号体内可溶性蛋白含量可达常温未处理幼苗的3.06倍,启夏体内可溶性蛋白含量可达3.39倍,含量增加显著。水杨酸对常温状态下的甘蓝幼苗可溶性蛋白含量的增加也有作用,苏甘25号增幅为1.38 mg/g,启夏增幅为1.32 mg/g,比起温度影响要小得多。温度的升高是幼苗体内可溶性蛋白含量上升的主导因素。2个甘蓝品种间差异显著(图7)。

**2.2.5 水杨酸处理对甘蓝幼苗电导率的影响** 电导率反映了植物细胞膜系统的受损程度。高温胁迫下细胞膜系统严重受损,电导率显著上升。经过水杨酸处理后,甘蓝幼苗的电导率有所降低,但仍与常温时电导率有明显差距。使用15 mg/L水杨酸处理后甘蓝幼苗的电导率降低最多,苏甘25号降低12.93%,启夏降低12.6%,降低幅度相当。处理过后仅在高温施用不同浓度水杨酸条件下2个品种之间电导率差异显

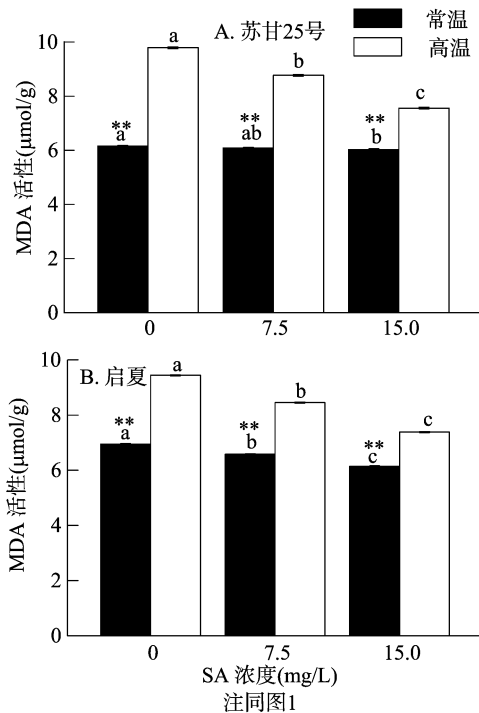


图5 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗MDA含量的影响

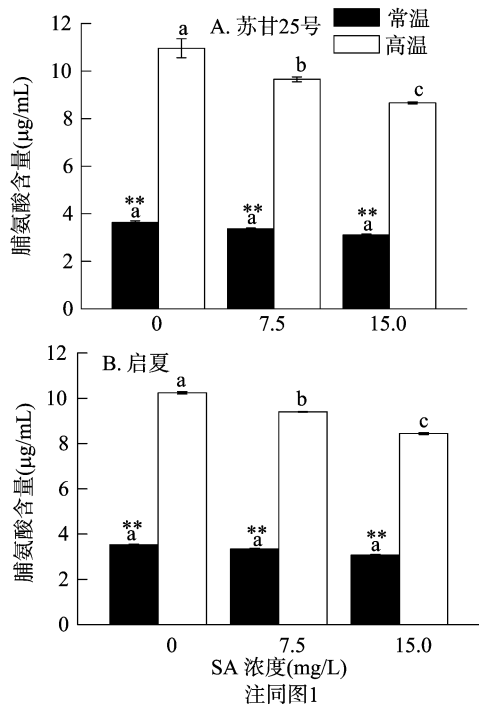


图6 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗脯氨酸含量的影响

著,其他处理组合电导率差异均不显著(图8)。

**2.2.6 水杨酸处理对甘蓝幼苗 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量的影响** 甘蓝幼苗体内 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量在热处理后升高,经水杨酸处理后 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量下降。在常温条件下,对苏甘25号施用外源水杨酸后 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量相对于空白对照差异明显,但不同浓度水杨酸处理后甘蓝幼苗体内 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量差异不明显,对启夏施用7.5 mg/L外源水杨酸后的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量对于空白对照的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量和施用15 mg/L外源水杨酸的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量差异不明显,但施用15 mg/L外源水杨酸后相对于空白对照的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量差异明

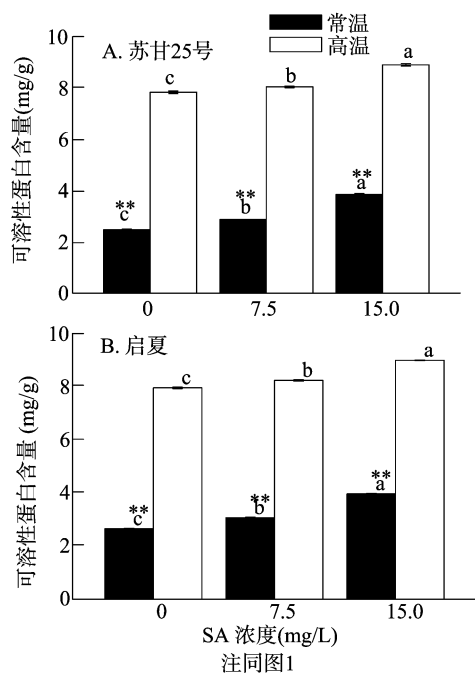


图7 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗可溶性蛋白含量的影响

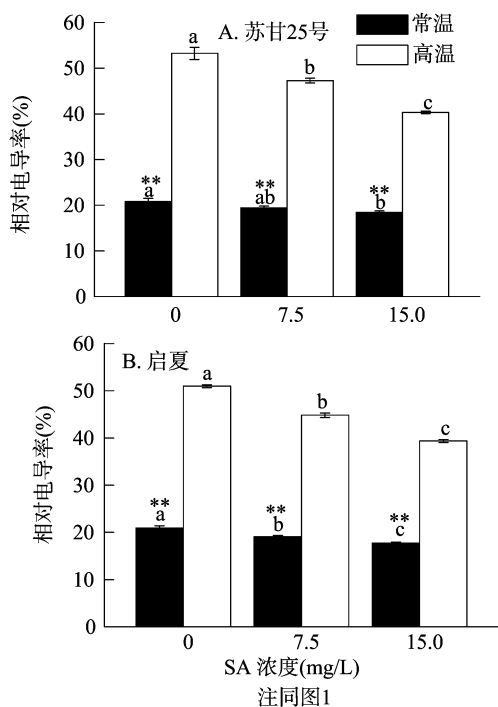


图8 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗电导率的影响

显。在高温条件下,对苏甘 25 号不施用外源水杨酸和施用 7.5 mg/L 外源水杨酸后  $H_2O_2$  含量无明显差异,而施用 15 mg/L 外源水杨酸效果显著,对启夏而言,施用外源水杨酸与不施用外源水杨酸差异明显,而 2 个水杨酸浓度所带来的效果无明显差异(图 9)。

### 3 讨论

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。前人研究表明无论生长指标还是生理指标都可以在一定范围内反映植物受到热胁迫和植物耐热性的程

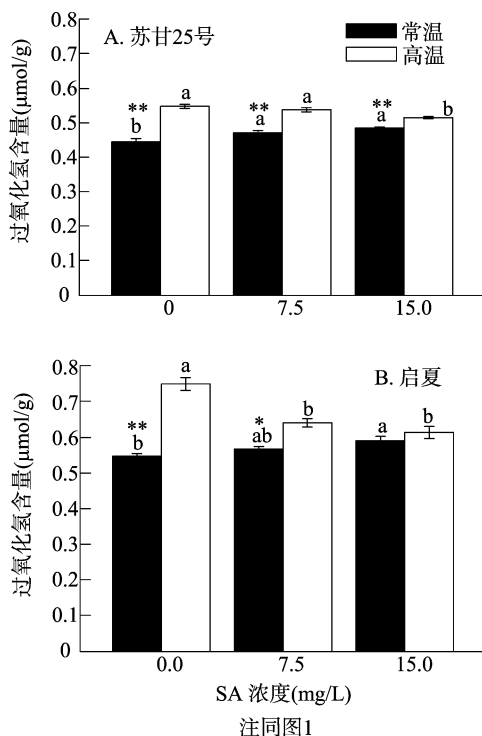


图9 水杨酸处理对不同温度下甘蓝幼苗过氧化氢含量的影响

度<sup>[20-21]</sup>。本研究中,由于处理时间短,甘蓝幼苗株高、茎粗变化不大,差异不明显,所以并不适合作为分析甘蓝幼苗耐热性的指标。秦舒浩等研究表明在高温强光下,水杨酸处理有利于结球甘蓝株高增长<sup>[22]</sup>。本试验中,甘蓝幼苗生长指标的根长差异较为明显。根作为植物主要的营养器官之一有着重要的吸水作用,而植物通过蒸腾作用排出水可以起到调节体温、维持正常的生理状态的作用,根部的生长更利于幼苗吸收土壤中的水分来抵御高温状态下蒸腾作用强烈造成的缺水状况。同时也有研究指出,水杨酸可以显著提高高温条件下百日草幼苗的根活力,根长的显著增长和地下部鲜质量的增加体现了植物耐热性的提高<sup>[23]</sup>。

甘蓝幼苗的生理指标对环境变化响应更为敏感。高温胁迫下,甘蓝幼苗的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均下降,水杨酸处理使得各类酶活性上升。丙二醛的含量反映并影响了植物细胞膜系统的受损程度,高温胁迫下 MDA 含量显著增高,代谢产生的 MDA 会继续影响膜系统的完整性,在水杨酸处理后 MDA 的含量下降,受损程度降低,甘蓝幼苗的耐热性有所增强。脯氨酸在逆境条件下如高温、低温、干旱时会在植物体内大量积累。在未使用水杨酸处理的情况下,高温胁迫使得脯氨酸含量显著升高,前人研究表明抗逆性较强的植株脯氨酸含量高,但本试验中,高温胁迫下水杨酸处理后脯氨酸含量反而下降,可能是经过水杨酸处理的植株抗逆性增强,在一定程度上降低了高温逆境的相对严重程度,使得植物体内脯氨酸含量有所下降。高温胁迫条件下热激蛋白含量增加,因而可溶性蛋白明显增加<sup>[11]</sup>,本研究与前人研究结果一致。电导率直接反映了植物细胞膜系统的受损程度,高温条件下细胞膜破裂电解质外渗,导致电导率显著升高,用水杨酸处理能够显著降低甘蓝幼苗的电导率,在水稻幼苗的耐热性研究中发现水杨酸也可以缓解水稻幼苗的电解质渗出<sup>[24]</sup>,所以电导

率可以作为植物耐热性的判断指标。低浓度的过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )可作为信号物质,高浓度的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 会对植物产生胁迫,也是反映植物受到胁迫程度的一项重要指标。本研究中,在高温胁迫条件下,甘蓝幼苗体内的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量显著上升,而电导率也增加,因而应是作为伤害物质,在经过外源水杨酸处理后有所下降,体现了外源水杨酸可减轻由高温引起的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量的上升,减轻其对作物的伤害。

根据前人的试验结果,在组织培养时,培养基中添加水杨酸可提高马铃薯组织抗性<sup>[25]</sup>。但耐热性的提高与水杨酸浓度相关,研究发现,在 $10 \sim 500 \mu\text{mol/L}$ 范围内,芥菜耐热性随水杨酸浓度增加而增强,但高于 $500 \mu\text{mol/L}$ 时则不能诱导耐热性继续增加<sup>[9]</sup>。研究发现低浓度水杨酸( $0.1$ 、 $0.5$ 、 $1.0 \text{ mmol/L}$ )可提高甘蓝幼苗耐低温的能力,以 $0.5 \text{ mmol/L}$ 效果最明显<sup>[26]</sup>。本研究表明, $15 \text{ mg/L}$ 的水杨酸为提高甘蓝幼苗耐热性的较佳浓度。

启夏 SOD、POD、APX 活性高于苏甘 25 号,MDA 及电导率等低于苏甘 25 号,所以在高温胁迫时启夏受到的高温伤害比苏甘 25 号轻,各项指标反映出水杨酸对启夏的作用要明显大于对苏甘 25 号的作用,因此在高温胁迫后接受水杨酸处理时,启夏更易于恢复到未受高温伤害的水平。因此可以认为启夏的耐热性优于苏甘 25 号。

本研究表明,在甘蓝幼苗期施用外源水杨酸可显著促进甘蓝幼苗的根的生长,提高植株的根冠比和启夏的干鲜质量和 G 值;可以显著提高因高温胁迫而降低的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性,降低因高温而显著升高的 MDA、脯氨酸、 $\text{H}_2\text{O}_2$  含量和电导率。综合来看,水杨酸可以有效地提高甘蓝幼苗的抗热性,浓度以 $15 \text{ mg/L}$ 效果较佳。在 2 个甘蓝品种间,水杨酸对启夏的作用比对苏甘 25 号的作用效果要明显。研究结果可为水杨酸提高甘蓝耐热性在生产中的应用提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 李关发. 早春花椰菜出现异常症状的原因及预防[J]. 科学种养, 2008(12): 28.
- [2] 丁秀英, 苏宝林, 张军, 等. 水杨酸在植物抗病中的作用[J]. 植物学通报, 2001, 18(2): 163–168.
- [3] 张宝珍, 张文明, 刘莉莉, 等. 花椰菜春季栽培高产稳产新技术[J]. 长江蔬菜, 2008(5): 9–10.
- [4] 王利军, 战吉成. 水杨酸与植物抗逆性[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(6): 619–624.
- [5] 李国婧, 周燮. 水杨酸与植物抗非生物胁迫[J]. 植物学通报, 2001, 18(3): 295–302.
- [6] 孟雪娇, 邸昆, 丁国华. 水杨酸在植物体内的生理作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 207–214.
- [7] 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.
- [8] Dat J F, Lopez-Delgado H, Foyer C H, et al. Parallel changes in  $\text{H}_2\text{O}_2$  and catalase during thermotolerance induced by salicylic acid or

- heat acclimation in mustard seedlings[J]. Plant Physiology, 1998, 116(4): 1351–1357.
- [9] Zhang T T, Kang J, Fan S X. Physiological and biochemical changes in lettuce under high temperature stress after exogenous salicylic acid treatments[R]. Beijing: Beijing Key Laboratory of New Technology in Agricultural Application, College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, 2009.
- [10] Liu H T, Liu Y P, Huang W D. Root-fed salicylic acid in grape involves the response caused by aboveground high temperature[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(6): 761–767.
- [11] 孙军利, 赵宝龙, 郁松林. 外源水杨酸(SA)对高温胁迫下葡萄幼苗耐热性诱导研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 290–294, 299.
- [12] Yalpani N, Enyedi A J, León J, et al. Ultraviolet light and ozone stimulate accumulation of salicylic acid, pathogenesis-related proteins and virus resistance in tobacco[J]. Planta, 1994, 193(3): 372–376.
- [13] 李纲, 郑子松. 早熟甘蓝新品种——启夏[J]. 江苏农村经济, 2013(5): 38.
- [14] 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.
- [15] 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, 17(3): 82–83.
- [16] Arora R, Wisniewski M E. Cold acclimation in genetically related (sibling) deciduous and evergreen peach [*Prunus persica* (L.) Batsch.]. II. A 60-kilodalton bark protein in cold-acclimated tissues of peach is heat stable and related to the dehydrin family of proteins[J]. Plant Physiology, 1994, 105(1): 95–101.
- [17] 强伟, 王洪伦, 周昌范, 等. 考马斯亮蓝 G-250 染色法测定柠条锦鸡儿种子中可溶性蛋白含量[J]. 氨基酸和生物资源, 2011, 33(3): 74–76.
- [18] 陈爱葵, 韩瑞宏, 李东洋, 等. 植物叶片相对电导率测定方法比较研究[J]. 广东教育学院学报, 2010, 30(5): 88–91.
- [19] 章亚彦, 林荔, 苏必桔. 碘化钾碘蓝分光光度法测定微量过氧化氢[J]. 分析试验室, 2001, 20(4): 41–42.
- [20] 姜宗庆, 汤庚国, 肖文华, 等. 茉莉酸对高温胁迫下银杏盆栽苗叶片生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(6): 211–212.
- [21] 李晓慧, 张恩让, 何玉安, 等. 亚高温及外源物质调节下番茄的生理响应[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 135–137.
- [22] 秦舒浩, 王丽丽, 王廷娟. 高温强光下水杨酸对结球甘蓝幼苗生长特征及生理特性的影响[J]. 蔬菜, 2013(12): 5–8.
- [23] 曹淑红, 李宁毅. 水杨酸对高温胁迫下百日草幼苗耐热性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(1): 91–94.
- [24] 吕俊, 张蕊, 宗学风, 等. 水杨酸对高温胁迫下水稻幼苗抗热性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1168–1171.
- [25] 王延书, 郁松林, 张森. 水杨酸与植物抗热性研究进展[J]. 新疆农业科学, 2007, 44(4): 524–528.
- [26] 周忆堂, 梁丽娇, 马红群, 等. 水杨酸预处理对甘蓝幼苗冷害的缓解效应[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2007, 32(5): 99–103.