

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201503013

杜晓华,刘会超,崔向南,等. 水杨酸对大花三色堇幼苗耐热性的影响[J]. 广西植物, 2016, 36(6):728-734

DU XH, LIU HC, CUI XN, et al. Effects of salicylic acid on heat resistance of *Viola × wittrockiana* seedlings [J]. Guihaia, 2016, 36(6):728-734

## 水杨酸对大花三色堇幼苗耐热性的影响

杜晓华\*, 刘会超, 崔向南, 李美灵

(河南科技学院 园艺园林学院, 河南 新乡 453003)

**摘要:** 大花三色堇性喜冷凉、忌酷热。该研究以大花三色堇3个自交系08H、HAR和E01为材料,分别测定了40℃高温处理4、8和12h时不同基因型大花三色堇幼苗的生理指标,以及不同浓度(0.1、1、2 mmol·L<sup>-1</sup>)水杨酸预处理对热胁迫下大花三色堇幼苗耐热性的影响。结果表明:在高温胁迫下大花三色堇电解质外渗量增加,随着处理时间的延长,电解质外渗更多,可溶性糖含量先增加后降低,POD酶活性先提高后降低;与其他2个自交系相比,HAR表现出较好的耐热性,其可溶性糖含量、POD酶活性的增加均较高,而电解质外渗率偏低;与对照相比,3种浓度SA预处理均显著降低了大花三色堇幼苗的电解质外渗率,增加了幼苗体内可溶性糖含量,提高了大花三色堇的幼苗体内脯氨酸含量和POD酶活性;其中1 mmol·L<sup>-1</sup>的SA预处理对高温胁迫下大花三色堇幼苗体内可溶性糖的含量增加最高,最大程度减缓幼苗体内的电解质外渗量,08H和HAR的脯氨酸含量和POD酶活性达到最大值。而对E01而言,0.1 mmol·L<sup>-1</sup>的水杨酸预处理处理的脯氨酸含量和POD酶活性最高。该研究结果探讨了高温胁迫下不同基因型大花三色堇幼苗的生理表现,以及外施水杨酸对增强大花三色堇幼苗耐热性的效果,为大花三色堇抗热栽培提供重要的基础资料。

**关键词:** 三色堇, 高温胁迫, 水杨酸(SA), POD, 可溶性糖

**中图分类号:** Q945.78, S681.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)06-0728-07

## Effects of salicylic acid on heat resistance of *Viola × wittrockiana* seedlings

DU Xiao-Hua\*, LIU Hui-Chao, CUI Xiang-Nan, LI Mei-Ling

(School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** Originated from northern Europe, *Viola × wittrockiana* is accustomed to the cool climate but cannot stand heat stress during its growth and development stages. Three inbred lines of *Viola × wittrockiana*, namely 08H, HAR and E01 were adopted as trial materials to investigate the physiological and biochemical performance of *Viola × wittrockiana* after the seedlings were treated with 40 °C for 4, 8 and 12 h respectively. The results showed that electrolyte leakages of all three *Viola × wittrockiana* seedling leaves increased under the heat stress, compared to the controls. And the longer the time of heat stress was, the more the electrolytes leaked. But the soluble sugar, proline content and activity of POD of *Viola × wittrockiana* increased firstly then decreased with heat stress time prolonged. The peaks of the biochemical indices varied with the index and genotypes. Compared with two other genotypes, the electrolyte leakage rate of HAR was lower under all of heat stress conditions. But its POD enzyme activity was higher all the time. The soluble sugar content

收稿日期: 2015-02-26 修回日期: 2015-04-28

基金项目: 河南省教育厅科学技术项目(13B210009); 河南科技学院大学生创新实验项目(201210467014) [Supported by the Scientific and Technologic Program of Henan Education Office(13B210009); Students Innovation Program of Henan Institute of Science and Technology(201210467014)].

作者简介: 杜晓华(1972-), 男, 陕西岐山人, 博士, 副教授, 研究方向为观赏植物遗传育种, (E-mail) duxiaohua0124@sina.com.

\* 通讯作者

and proline content of HAR were up to the highest under 40°C for 8 h and 4 h respectively. All of these biochemical indices revealed ‘HAR’ had the strongest heat resistance. Furthermore, in order to investigate effects of salicylic acid on heat resistance of *Viola × wittrockiana* seedlings, three genotypes seedlings were pretreated with different salicylic acid concentrations (0.1, 1 and 2 mmol · L<sup>-1</sup>) before they treated with heat stress (40 °C for 12 h). Compared to the contrast, the electrolyte leakage rates of *Viola × wittrockiana* seedlings reduced significantly after treated with SA. The electrolyte leakage rates of all genotypes were up to the lowest when the seedlings pretreated with 1 mmol · L<sup>-1</sup> SA. But the soluble sugar contents of *Viola × wittrockiana* increased when seedlings pretreated with SA, the highest value appeared for three genotypes with SA pretreatment by 1 mmol · L<sup>-1</sup>. The proline contents of seedling also increased after SA pretreatment, but the most suitable SA concentrations were different among genotypes. For 08H and HAR, the most effective concentration of SA was 1 mmol · L<sup>-1</sup>, but for E01 it was 0.1 mmol · L<sup>-1</sup>. With respect to POD activity of *Viola × wittrockiana* seedlings, it also increased significantly for all genotypes when the seedlings pretreated with SA. But the increasing for different genotypes varied with the SA concentration. Pretreatment with 0.1 mmol · L<sup>-1</sup> was best for E01, and 1 mmol · L<sup>-1</sup> pretreatment was the greatest for 08H and HAR. In short, pretreatment with 1 mmol/L SA was suggested for application to improve heat resistance of *Viola × wittrockiana* seedling for it could increase the content soluble sugar and reduce the amount of electrolyte leakage of leaf cell more significantly than the other SA concentration (0.1 and 1 mmol · L<sup>-1</sup>) under heat stress. The results showed the physiological performance of different *Viola × wittrockiana* genotypes under heat stress and effects of SA on heat resistance of *Viola × wittrockiana* seedlings, and provides the basic data for thermal cultivation and breeding of *Viola × wittrockiana*.

**Key words:** *Viola × wittrockiana*, heat stress, salicylic acid (SA), POD, soluble sugar

大花三色堇 (*Viola × wittrockiana*) 原产欧洲, 为堇菜科堇菜属多年草本花卉, 常作两年生栽培, 其品种繁多, 花色鲜艳, 花期长, 耐寒, 在欧、美、日等国家十分盛行, 素有“花坛皇后的美誉”(张其生等, 2010)。近年来已成为我国南方各大城市最常用的冬春季花卉和北方城市重要的早春花卉。然而, 大花三色堇性喜冷凉, 忌酷热, 气温高于 30 °C 时, 幼苗生长不良, 成苗率下降, 花芽开始消失, 35 °C 以上持续高温将导致植株枯萎死亡(王晓磊和胡宝忠, 2008)。而我国南方地区冬春季大花三色堇用花, 其育苗正值高温季节, 由于高温引起的成苗率低及移栽初期死亡率高, 已成为影响大花三色堇生产的重要问题。

水杨酸(Salicylic acid, SA), 即邻羟基苯甲酸, 作为一种植物体内产生的小分子酚类化合物, 被认为是植物应对冷害、重金属离子毒害、干旱胁迫、盐害等非生物胁迫的一种重要的植物激素(Rskin, 1992a), 在提高植物的抗逆性方面具有重要作用(Rskin, 1992b; 王延书等, 2007)。近年来已在一些重要作物, 如大麦(孙歆等, 2011)、小麦(王林华等, 2010)、水稻(吕俊等, 2009)、苹果(厚永冰等, 1997)、葡萄(王利军等, 2003)、辣椒(张素勤等, 2008)、百合(陈秋明等, 2008)等植物上开展了相关研究。然而, 有关 SA 对大花三色堇耐热性的影响尚未见报道。本研究以 3 个大花三色堇自交系为试材, 探讨了高温胁迫对不同基因型

大花三色堇幼苗的生理影响, 及外施 SA 对高温胁迫下大花三色堇幼苗耐热性的影响, 旨在为大花三色堇耐热栽培提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料

试验材料为河南科技学院草花育种课题组多年选育的 3 个大花三色堇自交系 08H、E01 和 HAR, 其中 08H 和 HAR 的亲本源自荷兰, E01 的亲本源自我国上海。种子经常规消毒、浸种后播种穴盘, 2 叶 1 心期移入直径 10 cm 的营养钵中, 光照培养箱中培养, 保持温度 18°C, 光照强度 4 000 lx, 光周期 12 h, 每天浇水 1 次, 保持基质湿润, 每周喷施 1 次 200 mg · kg<sup>-1</sup> 的硝酸钙叶面肥。培养至 5 叶 1 心期进行高温和水杨酸处理。

### 1.2 方法

高温处理: 把培养至 5 叶 1 心期的幼苗放入 40 °C 下进行高温处理, 分别在高温处理的 4、8 和 12 h 取植株叶片, 测定各项生理生化指标, 每组设 3 次重复。SA 处理: 参考相关文献(何亚丽等, 2002; 吕俊等, 2009; 厚永冰等, 1997), 在高温处理前 12 h, 先分别用 0.1、1、2 mmol · L<sup>-1</sup> 的 SA 对大花三色堇幼苗进行叶面喷施处理, 试验设 3 次重复, 然后分别进行 40 °C 高温

12 h 的处理,以 40 °C 12 h 处理为对照(只喷等量清水)。电解质外渗率用 DDS-11A 型电导仪测定;按照彭华婷等(2012)的方法计算电解质外渗率;可溶性糖用蒽酮比色法测定,游离脯氨酸含量采用茚三酮法测定,过氧化物酶采用愈创木酚法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 喷施 SA 对高温胁迫下大花三色堇幼苗电解质外渗率的影响

图 1 和表 1 表明,40 °C 高温胁迫 4 h,08H 和 E01 的电解质外渗率明显增加;而 HAR 无显著变化,在高温处理 8 h 后才出现显著增加。与 08H 和 E0 相比,在高温处理的各时段内,HAR 的电解质外渗率相对较低。

图 2 和表 2 表明,与未喷施 SA 的高温胁迫幼苗(对照)相比,喷施 3 种浓度的 SA 使大花三色堇 3 个自交系的幼苗电解质外渗率均显著下降,其中以喷施 1 mmol · L<sup>-1</sup> SA 的幼苗电解质外渗率最低。

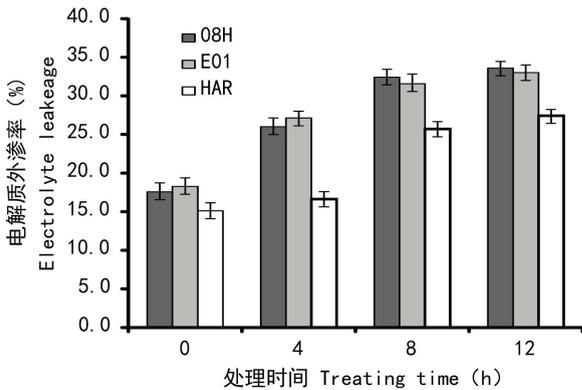


图 1 高温胁迫对大花三色堇幼苗叶片电解质外渗  
Fig. 1 Effects of heat stress on electrolyte leakage  
of leaves in *Viola × wittrockiana* seedlings

### 2.2 喷施 SA 对高温胁迫下大花三色堇幼苗可溶性糖含量的影响

从图 3 和表 1 看出,在高温胁迫下,3 个自交系的可溶性糖含量均出现了增加。其中高温处理 4 h 时,3 个自交系的可溶性糖含量出现显著上升;当高温胁迫 8 h 时,HAR 的可溶性糖含量快速增高;而 08H 和 E01 的可溶性糖含量则开始出现下降;当高温处理 12 h 时,HAR 的可溶性糖含量出现下降。

从图 4 和表 2 可以看出,与对照相比,喷施 3 种

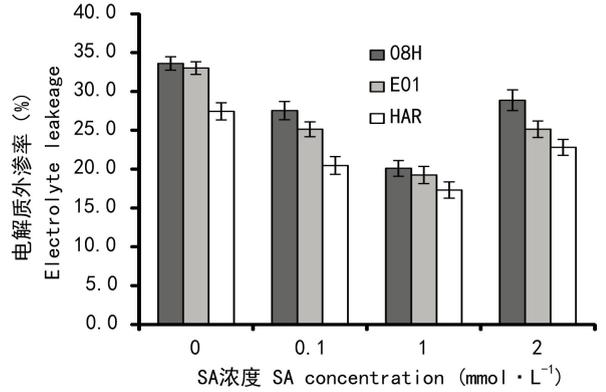


图 2 喷施 SA 对大花三色堇热胁迫下电解质外渗率的影响  
Fig. 2 Effects of spraying SA solution on electrolyte  
leakage of *Viola × wittrockiana* under heat stress

表 1 高温胁迫不同时间大花三色堇生理指标的比较  
Table 1 Comparison of physiological index of *Viola × wittrockiana* under heat stress in different time

生理指标 Physiological index	高温时间 Heating time (h)	08H	E01	HAR
电解质外渗率 Electrolyte leakage	0	17.6± 1.15d	18.3± 1.11c	15.1± 1.06b
	4	26.0± 1.15c	27.1± 0.90b	16.6± 0.97b
	8	32.4± 1.03b	31.6± 1.26a	25.7± 0.96a
	12	33.6± 0.86a	33.0± 1.00a	27.4± 0.81a
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0	2.1± 0.15c	2.2± 0.16c	2.0± 0.09c
	4	3.0± 0.16a	3.2± 0.17a	2.8± 0.11b
	8	2.5± 0.13b	2.4± 0.11bc	3.8± 0.16a
	12	2.5± 0.09b	2.5± 0.09b	2.9± 0.13b
脯氨酸含量 Proline content	0	6.2± 0.31c	20± 1.42b	3.4± 0.22d
	4	8.7± 0.36b	38.6± 1.8a	7.8± 0.28c
	8	10.3± 0.67b	20.4± 1.46b	19.8± 1.25a
	12	19.2± 0.86a	14.5± 1.08c	9.9± 0.56b
POD	0	307± 10.5d	368± 12.1d	426± 15.1c
	4	353± 12.1c	409± 14.5c	601± 19.0b
	8	528± 14.5a	509± 18.0a	714± 20.0a
	12	401± 13.9b	454± 15.1b	603± 17.5b

注:不同字母表示差异达显著水平(5%)。下同。

Note: Different letters stand for significant differences at 5%. The same below.

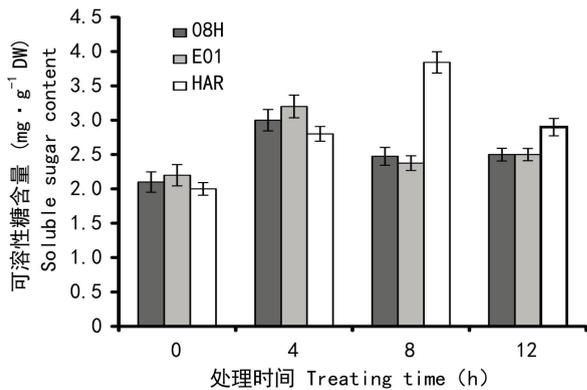


图3 高温胁迫对大花三色堇幼苗可溶性糖含量的影响

Fig. 3 Effects of heat stress on soluble sugar content of *Viola × wittrockiana* seedling leaves

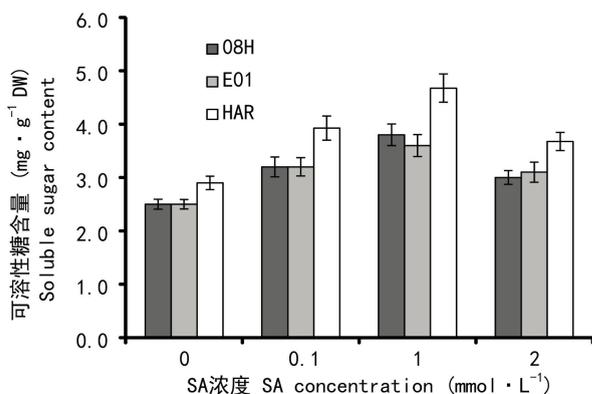


图4 喷施 SA 对热胁迫下大花三色堇可溶性糖含量的影响  
Fig. 4 Effects of spraying SA solution on soluble sugar content of *Viola × wittrockiana* under heat stress

浓度的 SA 均显著增加了 3 个自交系幼苗可溶性糖含量,其中以喷施 1 mmol · L<sup>-1</sup>的 SA 的幼苗可溶性糖含量增加最多。

### 2.3 喷施 SA 对高温胁迫下大花三色堇幼苗游离脯氨酸含量的影响

图 5 和表 1 显示,随着高温胁迫时间的延长,08H 幼苗脯氨酸含量一直呈上升趋势,并在高温胁迫 12 h 时迅速上升。E01 和 HAR 的脯氨酸含量则呈先上升后下降,其中 E01 在高温胁迫 4 h 时达到最大值,而 HAR 在高温胁迫 8 h 时达到最大值。

图 6 和表 2 显示,与对照相比,喷施 0.1 和 1 mmol · L<sup>-1</sup>的 SA 显著增加了 3 个自交系的脯氨酸含量;而喷施 2 mmol · L<sup>-1</sup>的 SA 除了对 HAR 脯氨酸含量有显著增加外,对于其他 2 个自交系没有明显变化。对于 08H 和 HAR 而言,喷施 1 mmol · L<sup>-1</sup>的

表 2 SA 预处理对热胁迫下大花三色堇生理指标的影响  
Table 2 Effects of pretreatment of SA on physiological index of *Viola × wittrockiana* under heat stress

生理指标 Physiological index	SA 浓度 SA concentration (mmol · L <sup>-1</sup> )	08H	E01	HAR	
电解质外渗率 Electrolyte leakage	0	33.6±0.86a	33.0±0.81a	27.4±1.10a	
	0.1	27.5±1.17b	25.1±0.96b	20.5±1.14c	
	1	20.1±1.01c	19.3±1.10c	17.3±1.05d	
	2	28.9±1.33b	25.1±1.06b	22.8±1.03b	
	可溶性糖含量 Soluble sugar content	0	2.5±0.09c	2.5±0.09b	2.9±0.13c
		0.1	3.2±0.19b	3.2±0.17a	3.9±0.23b
1		3.8±0.20a	3.6±0.21a	4.7±0.27a	
2		3.0±0.13b	3.1±0.19a	3.7±0.17b	
脯氨酸含量 Proline content		0	19.2±0.86c	14.5±1.08c	9.9±0.56d
		0.1	33.2±1.37b	50.5±1.56a	48.3±1.78b
	1	39.1±1.46a	22.7±1.45b	62.2±2.07c	
	2	18±1.14c	14.8±1.36c	38.7±1.41b	
	POD 活性	0	401±13.9c	454±15.1c	603±17.5b
		0.1	553±16.8b	557±13.4a	606±19.2b
1		633±18.9a	506±14.7b	733±23.0a	
2		431±16.7c	481±14.6bc	574±14.1c	

SA 的脯氨酸含量增加最多;而对于 E01 而言,喷施 0.1 mmol · L<sup>-1</sup>的 SA 幼苗脯氨酸含量增加最多。

### 2.4 喷施 SA 对高温胁迫下大花三色堇幼苗过氧化物酶活性的影响

图 7 和表 1 表明,随着高温胁迫时间的延长,3 个大花三色堇自交系幼苗的 POD 酶活性表现为先上升后下降,且在高温胁迫 8 h 时,POD 酶活性达到最高。在高温胁迫的各时间段,HAR 的 POD 酶活性均高于其他 2 个自交系。

图 8 和表 2 表明,与对照相比,喷施 0.1 和 1 mmol · L<sup>-1</sup>的 SA 显著提高了 3 个自交系的 POD 酶活性;而喷施 2 mmol · L<sup>-1</sup>的 SA 除了对 HAR 的 POD

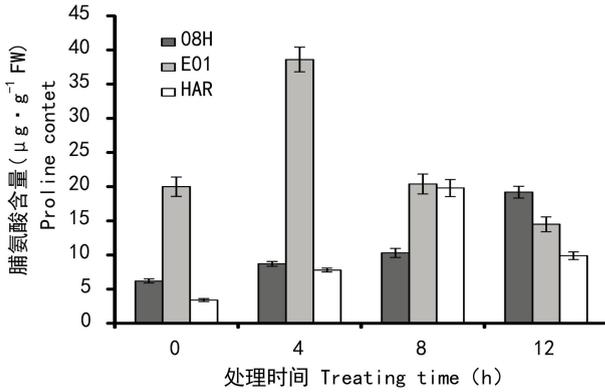


图5 高温胁迫对大花三色堇幼苗脯氨酸含量的影响  
Fig. 5 Effects of heat stress on proline content of *Viola × wittrockiana* seedling leaves

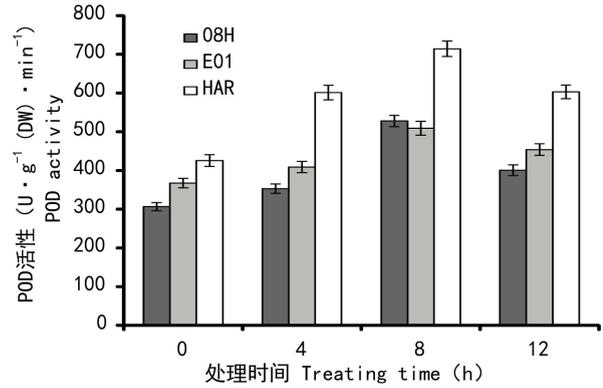


图7 高温胁迫对大花三色堇幼苗 POD 活性的影响  
Fig. 7 Effects of heat stress on POD of *Viola × wittrockiana* seedling leaves

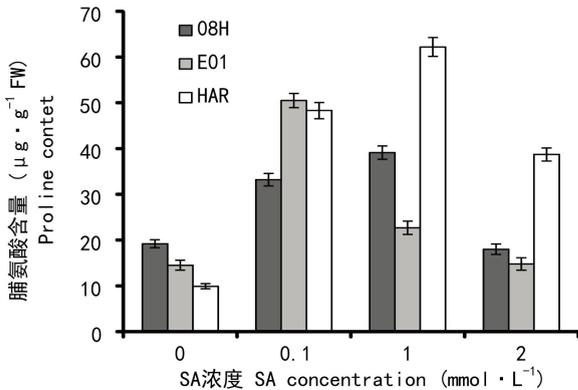


图6 喷施 SA 对热胁迫下大花三色堇脯氨酸含量的影响  
Fig. 6 Effects of spraying SA solution on proline content of *Viola × wittrockiana* under heat stress

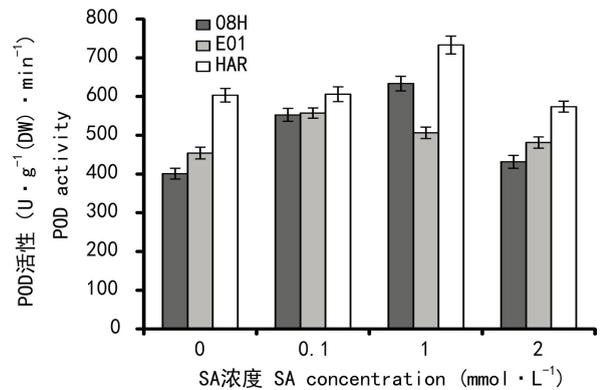


图8 喷施 SA 对热胁迫下大花三色堇 POD 含量的影响  
Fig. 8 Effects of spraying SA solution on POD of *Viola × wittrockiana* under heat stress

酶活性有提高外,对于其他2个自交系 POD 酶活性提高并不显著。对于 08H 和 HAR 而言,喷施  $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 SA 的 POD 酶活性最高;而对于 E01 而言,喷施  $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 SA 幼苗 POD 酶活性最高。

### 3 讨论与结论

细胞膜系统是热损伤和耐热的中心,细胞膜的热稳定性反应了植物耐热能力的大小。在高温条件下细胞膜蛋白变性,膜脂液相化,膜透性增大,导致电解质大量外渗。本研究结果显示,随着高温胁迫时间的延长,大花三色堇的电解质外渗率增加,表现热伤害症状。与其他2个自交系相比,HAR 在热胁迫

下电解质外渗率增加较缓慢,反映出其良好的耐热性能。说明在耐热性方面,不同大花三色堇种质间存在显著差异,这与彭华婷等(2012)的研究结果相一致。植物在逆境条件下细胞中生物氧自由基的产生和累积是造成细胞伤害及致死的主要原因,植物体内的酶促防御系统,如过氧化物酶(POD)等具有清除自由基的能力,能减轻膜脂过氧化程度(陈少裕,1989)。本研究结果显示,在高温胁迫下大花三色堇的过氧化物酶活性先上升后下降,且耐热性强的材料 POD 酶活性较高,与葡萄(王利军等,2003)和珍珠菜属植物(徐桂芳和张朝阳,2009)上的研究结果相一致,说明在高温胁迫下,植物体可通过 POD 酶活性的增高来清除自由基,减轻对膜脂的伤害;随着高温延长,POD 酶活性逐渐下降。但在其他一些作物上却出现了不同的情况,例如,对大白

菜(吴国胜等,1995)、小菊(陈发棣等,2001)热激后,植株体内的 POD 活性出现下降;高温胁迫下的柑桔(肖顺元和赵大中,1990)、辣椒(姚元干等,1998)、猕猴桃(彭永宏和章文才,1995)POD 活性的变化没有一定的规律。造成以上研究结果的差异,其原因还有待进一步研究探明。可溶性糖是植物体内一种重要的渗透调节物质,具有溶解性高,分子量小,生成迅速,对植物细胞具有渗透调节及保护细胞膜结构稳定的作用。在干旱、高温、低温等逆境条件下,植物会主动积累一些可溶性糖,降低渗透势和冰点,以适应外界条件的变化(黄希莲和宋丽莎,2007)。游离脯氨酸也是植物体内一种重要的渗透调节物质,但脯氨酸作为渗透调节物质在植物耐热性研究方面颇多争议(黄希莲和宋丽莎,2007)。本研究显示,3个大花三色堇自交系在高温胁迫下,其可溶性糖和脯氨酸含量均出现了增加,与新铁炮百合(王凤兰等,2003)、仙客来(曲复宁等,2002)等研究结果基本一致。就材料的耐热性来看,以上生理指标均显示 HAR 具有较强的耐热性,这也与其田间表现相一致,在华北地区 08H 和 E01 因不耐热,常在 5 月下旬逐渐枯萎,而 HAR 要延续到 6 月中旬。其耐热性与其在一定热胁迫下可溶性糖含量和脯氨酸含量增加及 POD 酶活性较高有关。

水杨酸(SA)作为一种能调节植物许多生长发育过程的小分子酚类物质,SA 参与植物体内的许多生理生化过程,如植物开花、产热、种子发芽、气孔关闭,膜通透性及离子的吸收等(Rskin,1992)。王延书等(2007)研究发现,SA 具有提高非生物抗逆性的作用尤其是植物的耐热性。本研究结果显示,喷施适宜浓度的 SA 能提高大花三色堇幼苗 POD 酶的活性,增加可溶性糖和脯氨酸的含量,有效降低电解质外渗率。关于外源 SA 的适宜使用浓度,孙艳和王鹏(2003)研究表明,喷施  $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 SA 对黄瓜四叶期的幼苗效果最优,何亚丽等(2002)研究发现, $0.1\sim 1.0\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 SA 均可提高 3 叶龄高羊茅幼苗的耐热性。可见,SA 提高植物耐热性的有效浓度因植物种类,秧龄及处理时间的不同而不同(王延书等,2007)。本研究显示,喷施  $1\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 SA 对提高大花三色堇耐热性效果较好,浓度过高效果下降。关于外源 SA 提高植物耐热性的机理,现有研究表明,一定浓度的 SA 能减少植物体内  $\text{H}_2\text{O}_2$  的含量,提高植物体内 POD 活性,保持叶片较高的光合速率,SA 是响应高温锻炼的重要信号分子,外

施 SA 和高温锻炼可能有相似的提高耐热机制(王延书等,2007;王利军等,2003)。SA 提高植物耐热性的详细机制阐明还有待植物生理学尤其是信号传导方面研究的进一步深入。

## 参考文献:

- CHEN FD, CHEN SM, FANG WM, et al, 2001. Determining heat tolerance for chrysanthemum vestitum and four Ch. morifolium cultivars with small flowers [J]. Acta Agric Shanghai, 17(3): 80-82. [陈发棣,陈素梅,房伟民,等. 2001. 五个小菊品种(或种)的耐热性鉴定 [J]. 上海农业学报, 17(3): 80-82.]
- CHEN QM, YIN H, LI XY, et al, 2008. Effects of salicylic acid on the activities of antioxidant system in lily plants under high temperature stress [J]. J Chin Agric Univ, 13(2): 44-48. [陈秋明,尹慧,李晓艳,等. 2008. 高温胁迫下外源水杨酸对百合抗氧化系统的影响 [J]. 中国农业大学学报, 13(2): 44-48.]
- CHEN SY, 1989. Membrane lipid peroxide and plant adversity stress [J]. Chin Bull Bot, 6(4): 211-217. [陈少裕, 1989. 膜脂过氧化与植物逆境胁迫 [J]. 植物学通报, 6(4): 211-217.]
- HE YL, LIU YL, CHEN Q, et al, 2002. The romotolerance related to antioxidant induced by salicylic acid and heat hardening in tall fescue seedlings [J]. J Plant Physiol, 28(2): 89-95. [何亚丽,刘友良,陈权,等. 2002. 水杨酸和热锻炼诱导的高羊茅幼苗的耐热性与抗氧化的关系 [J]. 植物生理与分子生物学报, 28(2): 89-95.]
- HOU YB, LIU CL, CAI ZG, 1997. Regulation of salicylic acid to hydrogen peroxide content and its mechanism in apple leaves [J]. Acta Hortic Sin, 24(3): 220-224. [厚永冰,刘诚连,蔡志国, 1997. 水杨酸对苹果叶片中过氧化氢水平的调节及机制 [J]. 园艺学报, 24(3): 220-224.]
- HUANG XL, SONG LS, 2007. Research on the physiological and biochemical indexes of heat resistance of plant [J]. J Qiannan Norm Coll, 27(3): 23-26. [黄希莲,宋丽莎, 2007. 植物耐热生理生化指标研究进展 [J]. 黔南民族师范学院学报, 27(3): 23-26.]
- ISMAL C, HORST WJ, 1991. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean [J]. Physiol Pl, 83: 463-468.
- LÜ J, ZHANG R, ZONG XF, et al, 2009. Effect of salicylic acid on heat resistance of the rice seedling under heat stress [J]. Chin J Eco-Agr, 17(6): 1 168-1 171. [吕俊,张蕊,宗学风,等. 2009. 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, 17(6): 1 168-1 171.]
- PENG HT, GAO Y, DU HM, et al, 2012. Effects of heat stress on related physiological indexes of *Viola × wirtrockiana* cultivar seedling [J]. J Shanghai Jiaotong Univ: Agric Sci Ed, 30(6): 66-71. [彭华婷,高悦,杜红梅,等. 2012. 高温胁迫对大花三色堇幼苗相关生理指标的影响 [J]. 上海交通大学学报·农业科学版, 30(6): 66-71.]
- PENG YH, ZHANG WC, 1995. Study on the heat resistance indices of Kiwifruit leaves [J]. J Wuhan Bot Res, 13(1): 70-74. [彭永宏,章文才, 1995. 猕猴桃叶片耐热性指标研究 [J]. 武汉植物学研究, 13(1): 70-74.]
- QU FN, WANG YS, ZHANG M, et al, 2002. Influence of high temperature stress on root vitality and leaf biochemical indexes of cyclamen [J]. Acta Agr Boreal Sin, 17(1): 127-131. [曲复宁,王云山,张敏,等. 2002. 高温胁迫对仙客来根系活力和

- 叶片生化指标的影响 [J]. 华北农学报, 17(1):127-131.]
- RASKIN I, 1992a. Salicylate, a new plant hormone [J]. Plant Physiol, 99(3): 799-803.
- RASKIN I, 1992b. Role of salicylic acid in plants [J]. Ann Rev Pl Physiol Mol Boil, 43: 439-463.
- SUN X, ZENG FC, HU P, 2011. Effect of salicylic acid on the antioxidant activity of the barley seedlings under water stress [J]. J Sichuan Agric Univ, 29(2): 160-163, 206. [孙歆, 曾富春, 胡攀, 2011. 水分胁迫下水杨酸对大麦幼苗抗氧化能力的影响 [J]. 四川农业大学学报, 29(2): 160-163, 206.]
- SUN Y, WANG P, 2003. Effects of salicylic acid (SA) on high-temperature stress resistance of cucumber seedling [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 23 (11): 2 011-2 013. [孙艳, 王鹏, 2003. 水杨酸对黄瓜幼苗抗高温胁迫能力的影响 [J]. 西北植物学报, 23(11): 2 011-2 013.]
- WANG FL, ZHOU HG, HANG YY, et al, 2003. A study on heat-resistance indices of the seedlings of four *Lilium formolongi* lines [J]. J Zhongkai Agrotechnol Coll, 16(2): 38-42. [王凤兰, 周厚高, 黄玉源, 等, 2003. 4 个新铁炮百合品系幼苗的抗热指标测定 [J]. 仲恺农业技术学院学报, 16(2): 38-42.]
- WANG LH, LIANG SR, LÜ SM, et al, 2010. Protective effect of SA on photosynthetic apparatus of wheat leaves under heat and high irradiance stress [J]. J Henan Agric Sci, (4): 21-25. [王林华, 梁书荣, 吕淑敏, 等, 2010. 水杨酸对高温强光胁迫下小麦叶片光合机构的保护作用 [J]. 河南农业科学, (4): 21-25.]
- WANG LJ, HANG WD, ZHANG JC, 2003. The rmtolerance related to antioxidant induced by SA and heat acclimation in grape seedlings [J]. Acta Horti Sin, 30(4): 452-454. [王利军, 黄卫东, 战吉成, 2003. 水杨酸和高温锻炼与葡萄抗热性及抗氧化的关系 [J]. 园艺学报, 30(4): 452-454.]
- WANG XL, HU BZ, 2008. Biological characteristics and cultivation management of *Viola tricolor* [J]. J NE Agric Univ, 39(6): 132-135. [王晓磊, 胡宝忠, 2008. 三色堇 (*Viola tricolor* L.) 生物学特性及栽培管理 [J]. 东北农业大学学报, 39(6): 132-135.]
- WANG YS, YU SL, ZHANG S, 2007. Research advance on salicylic acid and heat stress resistance in plants [J]. Xinjiang Agric Sci, 44(4): 524-528. [王延书, 郁松林, 张森, 2007. 水杨酸与植物抗热性研究进展 [J]. 新疆农业科学, 44(4): 524-528.]
- WU GS, CAO WH, WANG YJ, et al, 1995. Cell membrane thermostability, protective enzymes and heat tolerance in Chinese cabbage [J]. Acta Horti Sin, 22(4): 353-358. [吴国胜, 曹婉虹, 王永健, 等, 1995. 细胞膜热稳定性及保护酶与大白菜耐热性的关系 [J]. 园艺学报, 22(4): 353-358.]
- XIAO SY, ZHAO DZ, 1990. Preliminary studies on physiological and biochemical indices of heat-tolerance of citrus leaves [J]. J Fruit Sci, 7(4): 217-220. [肖顺元, 赵大中, 1990. 柑桔叶片耐热性生理生化指标初探 [J]. 果树科学, 7(4): 217-220.]
- XU GF, ZHANG ZY, 2009. Effect of high-temperature stress on physiological and biochemical indices of four *Lysimachia* plants [J]. Chin J Eco-Agric, 17(3): 565-569. [徐桂芳, 张朝阳, 2009. 高温胁迫对 4 种珍珠菜属植物生理生化指标的影响 [J]. 中国生态农业学报, 17(3): 565-569.]
- YAO YG, SHI XH, YANG JG, et al, 1998. Study on physiological and biochemical indexes of heat resistant of pepper leaves [J]. J Hunan Agric Univ, 24(2): 119-122. [姚元干, 石雪晖, 杨建国, 等, 1998. 辣椒叶片耐热性生理生化指标探讨 [J]. 湖南农业大学学报, 24(2): 119-122.]
- ZHANG QS, BAO MZ, LU XX, et al, 2010. Research advances in breeding of *Viola × wittrockiana* (*Viola × wittrockiana*) [J]. Chin Bull Bot, 45(1): 128-133. [张其生, 包满珠, 卢兴霞, 等, 2010. 大花三色堇育种研究进展 [J]. 植物学报, 45(1): 128-133.]
- ZHANG SQ, GENG GD, TAN YL, 2008. Effects of salicylic acid on chilling resistance of hot-pepper [J]. Acta Agric Boreal Sin, 23 (Suppl.): 118-120. [张素勤, 耿广东, 谭玉丽, 2008. 水杨酸对辣椒抗寒性的影响 [J]. 华北农学报, 23(增刊): 118-120.]

( 上接第 719 页 Continue from page 719 )

- isotopes; coping with too many sources [J]. Oecologia, 136, 261-269.
- QUEREJETA JI, ESTRADA-MEDINA H, ALLEN MF, et al, 2007. Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate [J]. Oecologia, 152: 26-36.
- QIAN YP, WANG L, 2008. The application of isotope hydrology technology in heihe river basin water cycle research [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press: 5-12. [钱云平, 王玲, 2008. 同位素水文技术在黑河流域水循环研究中的应用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社: 5-12.]
- WANG C, JIN YH, LIU JS, et al, 1999. Root Biomass of natural Japanese red pine in Yanbian area [J]. J Beijing For Univ, 21(1): 44-49. [王成, 金永焕, 刘继生, 等, 1999. 延边地区天然赤松林单木根系生物量的研究 [J]. 北京林业大学学报, 21(1): 44-49.]
- WALKER GR, HUGHES MW, ALLISON GB, et al, 1988. The movement of isotopes of water during evaporation from a bare soil surface [J]. J Hydrol, 97: 181-197.
- WERSHAW R, FRIEDMAN LI, HELLER SH, et al, 1966. Hydrogen isotopic fractionation of water passing through trees [J]. Org Geochem, 55-67.
- WHITE JWC, COOK ER, LAWRENCE JR, et al, 1985. The D/H ratios of sap in trees; implications for water sources and tree ring D/H ratios [J]. Geochim Cosmochim Acta, 49: 237-246.
- WU SH, PAN T, DAI EB, 2006. The progress and prospect of stable isotopes in plants [J]. Progr Geogr, 25(3): 771-801. [吴绍洪, 潘韬, 戴尔阜, 2006. 植物稳定同位素研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 25(3): 771-801.]
- XU Q, AN SQ, LIU SR, et al, 2008. Application of environmental isotopes in water cycle of forest ecosystem [J]. World For Res, 21(3): 11-15. [徐庆, 安树青, 刘世荣, 等, 2008. 环境同位素在森林生态系统水循环研究中的应用 [J]. 世界林业研究, 21(3): 11-15.]
- ZHAO LJ, XIAO HL, CHENG GD, et al, 2008. A preliminary study of water sources of riparian plants in the lower reaches of the Heihe Basin [J]. Acta Geosci Sin, 29(6): 709-718. [赵良菊, 肖洪浪, 程国栋, 等, 2008. 黑河下游河岸林植物水分来源初步研究 [J]. 地球学报, 29(6): 709-718.]
- ZIMMERMANN U, MUNNICH KO, ROETHER W, et al, 1966. Tracers determine movement of soil moisture and evapotranspiration [J]. Science, 152: 346-347.