

# 外源水杨酸预处理对低温胁迫下甜瓜幼苗生长及其抗逆生理特性的影响

刁倩楠<sup>1</sup>, 蒋雪君<sup>2</sup>, 陈幼源<sup>1</sup>, 张永平<sup>1\*</sup>

(1 上海市农业科学院园艺研究所, 上海市设施园艺技术重点实验室, 上海 201403; 2 上海市金山区农业技术推广中心, 上海 201599)

**摘要:**以甜瓜品种‘红优’幼苗为试验材料,在人工气候箱内采用基质栽培法,对其叶面喷施不同浓度(0.1、0.5、1.0、2.0 mmol·L<sup>-1</sup>)水杨酸(SA),研究SA预处理对低温(昼12℃/夜6℃)胁迫7d及恢复7d后甜瓜幼苗生长、叶绿素含量、渗透调节物质含量以及抗氧化系统的影响。结果表明:(1)低温胁迫能明显抑制甜瓜幼苗的生长,外源施用不同浓度SA预处理均能缓解低温对甜瓜幼苗的伤害,并以1.0 mmol·L<sup>-1</sup> SA作用最明显,且显著提高了低温胁迫下甜瓜幼苗的株高、茎粗、地上鲜重和叶绿素含量。(2)适宜浓度的外源SA预处理可明显提高低温胁迫下甜瓜幼苗叶片的渗透调节物质可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸的含量,增强其渗透调节作用。(3)低温胁迫下外源SA预处理能够诱导提高甜瓜幼苗叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)和脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)的活性,增加甜瓜幼苗叶片中抗坏血酸(ASA)、谷胱甘肽(GSH)含量、ASA/DHA及GSH/GSSG,从而有效降低叶片电解质渗透率、丙二醛(MDA)和活性氧(ROS)含量。研究发现,适宜浓度的外源SA预处理,能够在低温胁迫条件下通过增加渗透调节物质的含量,诱导增强抗氧化酶活性,以及激活ASA-GSH循环系统,促进甜瓜幼苗的生长,从而提高甜瓜幼苗的耐低温性能。

**关键词:**外源水杨酸;甜瓜幼苗;低温胁迫;植株生长;渗透调节物质;抗氧化系统

中图分类号:Q945.78;S652.4 文献标志码:A

## Effects of Exogenous Salicylic Acid Pretreatment on Growth and Resistance Physiological Indexes in Melon Seedling under Chilling Stress

DIAO Qiannan<sup>1</sup>, JIANG Xuejun<sup>2</sup>, CHEN Youyuan<sup>1</sup>, ZHANG Yongping<sup>1\*</sup>

(1 Horticultural Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology, Shanghai 201403, China; 2 Shanghai Agriculture Technology Extension and Service Center, Shanghai 201599, China)

**Abstract:** The aim of the study was to investigate the effect of exogenous salicylic acid (SA) pretreatment on the growth, chlorophyll contents, osmotic adjustment substance contents and antioxidant system of melon seedlings under chilling stress (12 °C/6 °C) and 7 days' recovery condition (28 °C/22 °C). Cultivar 'Hongyou' seedlings were treated with different concentrations of SA (including 0.1, 0.5, 1.0 and 2.0

收稿日期: 2018-07-05; 修改稿收到日期: 2018-10-17

基金项目: 上海市瓜果产业技术体系(沪农科产字[2017]第1号); 上海市农口系统青年人才成长计划(沪农青字[2018]第1-13号); 农科创2017(B-06)

作者简介: 刁倩楠(1988-), 女, 博士, 助理研究员, 从事甜瓜育种栽培工作。E-mail: diaoqiannan@126.com

\* 通信作者: 张永平, 副研究员, 主要从事甜瓜育种栽培工作。E-mail: zyp123944@126.com

mmol · L<sup>-1</sup>) in climate chambers. The results showed that: (1) chilling stress significantly inhibited the growth of melon seedlings, different concentrations of exogenous SA pretreatment could alleviate the damage induced by chilling stress, and 1.0 mmol · L<sup>-1</sup> SA has the most notable effect. 1.0 mmol · L<sup>-1</sup> SA significantly increased plant height, stem thickness, and fresh weight of melon seedlings. (2) Suitable exogenous SA pretreatment also increased soluble sugar, soluble protein and proline contents, promoted osmotic adjustment. (3) In addition, exogenous SA pretreatment could strengthen the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX), glutathione reductase (GR) and dehydroascorbate reductase (DHAR), increase the contents of ascorbic acid (AsA) and glutathione (GSH), improve the ratios of ASA/DHA and GSH/GSSG, so the electrolyte leakage, malondialdehyde (MDA) content and reactive oxygen species (ROS) greatly reduced. Overall, appropriate concentration of exogenous SA pretreatment could promote the growth and chilling tolerance of melon seedlings, through increasing osmotic adjustment substance contents, enhancing antioxidant enzyme activities and activating AsA-GSH cycle.

**Key words:** exogenous salicylic acid; melon seedling; chilling stress; growth; osmotic adjustment substance; antioxidant system

甜瓜(*Cucumis melo*)属葫芦科甜瓜属,一年生蔓性草本植物,甜瓜喜温耐热,生育期适温为 25~35 °C,在世界园艺生产中占有重要地位,甜瓜具有很高的营养价值和药用价值。甜瓜栽培历史悠久,中国作为甜瓜生产大国,栽培面积和产量历年均居世界首位。但在甜瓜栽培过程中,尤其是早春栽培中,经常遇到低温危害,导致生长发育受到抑制,果实品质受到影响,进而降低经济效益。低温不仅对作物的光合能力、抗氧化酶活性产生影响,还能诱导活性氧大量产生,造成氧化伤害,甚至导致植株死亡<sup>[1]</sup>。水杨酸(salicylic acid, SA),作为一种简单的酚类衍生物,广泛存在于高等植物体中,不仅能参与植物体内多种生理过程,还与植物抗逆性之间存在密切的关系<sup>[2]</sup>。研究发现,外源施用 SA 能通过提高抗氧化酶活性,增加渗透调节物质的含量来减轻干旱、盐害、低温等胁迫对植株造成的伤害<sup>[3-6]</sup>。前人研究表明,适应浓度的 SA 能通过激活抗氧化酶活性,调节渗透调节物质的含量,加强光合效率来增强番茄<sup>[7]</sup>、黄瓜<sup>[8]</sup>、萝卜<sup>[9]</sup>和甜瓜<sup>[10]</sup>等作物的耐低温性。然而,Janda 等的研究发现,正常条件下施用 SA 后,玉米植株的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率都发生了下降<sup>[11]</sup>,说明 SA 也可能产生毒害作用。低温会严重影响甜瓜的产量与品质。外源施用 SA 能有效提高多种植物的抗逆性,然而不同作物,不同环境条件下 SA 的保护作用不尽相同。因此,本研究以甜瓜幼苗为试材,通过外源喷施的方法,比较不同浓度 SA 对低温胁迫下甜瓜幼苗生长、膜系统、渗透调节物质及活性氧清除系统的影响,旨在寻求外源 SA 诱导甜瓜幼苗耐低温性的最佳浓度阈

值,为外源施用 SA 缓解低温伤害提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料培养与处理

供试的甜瓜品种为‘红优’,种子由上海市农业科学院园艺研究所提供;SA 购买于上海源叶生物有限公司,用蒸馏水配制 1 000 mmol · L<sup>-1</sup> 的母液,4 °C 保存,用时按试验所需浓度进行稀释。试验在上海市农业科学院园艺研究所进行,2017 年 12 月 27 日将饱满、整齐一致的种子浸种催芽,出芽后播于 10 cm × 10 cm 的塑料营养钵中,以蛭石作基质,然后置于光照培养箱中进行幼苗培养,温度设置为昼(28 ± 1) °C/夜(22 ± 1) °C,光照 12 h,光照强度为 400 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 左右。

2018 年 1 月 22 日,当幼苗长到 3~4 片真叶时,选取生长一致的幼苗用浓度分别为 0、0.1、0.5、1.0、2.0 mmol · L<sup>-1</sup> 的水杨酸(SA)溶液(含 1/8 浓度日本园试营养液)喷施甜瓜幼苗,每株 50 mL,连续喷施 3 d,以便甜瓜幼苗充分吸收 SA,分别置于昼(28 ± 1) °C/夜(22 ± 1) °C,光照强度为 400 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 左右的光照培养箱内,3 d 后将处理的幼苗进行昼(12 ± 1) °C/夜(6 ± 1) °C<sup>[12]</sup> 低温处理。以喷施 1/8 浓度日本园试营养液,置于昼(28 ± 1) °C/夜(22 ± 1) °C 幼苗为对照(CK)。每种处理 50 株,3 次重复。低温处理与对照培养箱除温度不同外,光照和湿度状况均一致。低温培养 7 d 后温度调为昼(28 ± 1) °C/夜(22 ± 1) °C,进行 7 d 恢复处理。低温处理 7 d 和恢复 7 d 时分别取样进行各项指标的测定。

## 1.2 测定项目与方法

**1.2.1 生长量** 每处理取6株,用直尺测量幼苗株高(子叶节至生长点);利用游标卡尺测量茎粗,即子叶展开方向的子叶节的直径;用去离子水冲洗植株并吸干水分,称地上鲜重。

**1.2.2 生理指标** 相对电导率的测定采用电导率仪(Mettler Toledo-FG3);叶绿素含量的测定参照李合生的方法<sup>[13]</sup>;脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法测定<sup>[14]</sup>;可溶性糖和可溶性蛋白含量的测定参照李合生的方法<sup>[13]</sup>;丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸法<sup>[15]</sup>;过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)含量测定参照郭欣欣等的方法<sup>[16]</sup>;超氧阴离子(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)产生速率测定参照王爱国等的方法<sup>[17]</sup>。

**1.2.3 抗氧化系统活性** 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用四唑氮蓝法<sup>[18]</sup>测定;过氧化物酶(POD)的活性采用愈创木酚显色法测定<sup>[19]</sup>;过氧化氢酶(CAT)活性的测定参照 Dhindsa 等的方法<sup>[20]</sup>;抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的测定参照 Nakano 和 Asada 的方法<sup>[21]</sup>;抗坏血酸(AsA)含量的测定参考 Law 等的方法<sup>[22]</sup>;还原型谷胱甘肽(GSH)含量参照 Griffith 等的方法<sup>[23]</sup>;单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)活性的测定参照 Nakano 和 Asada 的方法<sup>[21]</sup>;脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)活性的测定参照 Hossain 等的方法<sup>[24]</sup>。

## 1.3 数据统计分析

每个指标测定重复3次,取平均值。数据采用

Origin 软件绘图,用 SPSS 统计软件对平均数用 Duncan's 新复极差法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源 SA 对低温胁迫下甜瓜幼苗生长的影响

如表1所示,经过低温胁迫及恢复处理7 d后,T<sub>0</sub>处理甜瓜幼苗的株高与对照(CK)相比分别显著降低了28.47%、36.36%( $P < 0.05$ ),地上鲜重则分别显著降低36.80%、34.92%,而低温对植株茎粗影响不显著。与T<sub>0</sub>处理相比,不同浓度SA处理均能诱导低温胁迫甜瓜幼苗的形态指标不同程度增加,且随SA浓度增加呈先升后降的变化趋势,但仍低于对照。其中,1.0 mmol·L<sup>-1</sup> SA处理(T<sub>1.0</sub>)作用最为突出,其低温胁迫7 d幼苗株高、茎粗和地上鲜重与相应T<sub>0</sub>处理相比分别增加了36.24%、5.21%和51.89%,恢复7 d幼苗则分别增加了40.34%、7.66%和38.21%。由此说明,低温胁迫处理使甜瓜幼苗的生长受到显著抑制,而外源SA能够缓解这种抑制作用,其中以1.0 mmol·L<sup>-1</sup> SA处理的效果最好。

### 2.2 外源 SA 对低温胁迫下甜瓜幼苗叶绿素含量的影响

图1显示,在单独低温处理下(T<sub>0</sub>),甜瓜幼苗叶片的叶绿素a、叶绿素b及叶绿素a+b含量均显著降低,低温处理7 d幼苗与对照相比分别下降了29.26%、49.17%和34.81%,恢复7 d幼苗则分别

表1 外源 SA 预处理对低温胁迫以及恢复处理的甜瓜幼苗生长的影响

Table 1 Effects of exogenous SA pretreatment on the growth of melon seedlings under chilling stress and resume treatment

处理 Treatment	株高 Plant height/cm		茎粗 Stem thickness/mm		地上鲜重 Fresh weight of plant/g	
	处理 7 d Treatment 7 d	恢复 7 d Resume 7 d	处理 7 d Treatment 7 d	恢复 7 d Resume 7 d	处理 7 d Treatment 7 d	恢复 7 d Resume 7 d
CK	7.06±0.18a	8.14±0.05a	2.42±0.20a	2.58±0.02a	1.25±0.14a	1.89±0.08a
T <sub>0</sub>	5.05±0.22e	5.18±0.30e	2.30±0.08a	2.35±0.07c	0.79±0.38d	1.23±0.25d
T <sub>0.1</sub>	5.82±0.04d	6.04±0.12cd	2.33±0.25a	2.41±0.12bc	0.93±0.22c	1.44±0.40cd
T <sub>0.5</sub>	6.14±0.06cd	6.35±0.25c	2.39±0.18a	2.5±0.13ab	1.12±0.11b	1.62±0.05bc
T <sub>1.0</sub>	6.88±0.12b	7.27±0.38b	2.42±0.09a	2.53±0.10ab	1.20±0.02ab	1.70±0.08b
T <sub>2.0</sub>	6.06±0.38cd	6.20±0.04c	2.28±0.10a	2.30±0.10c	1.10±0.13b	1.51±0.12cd

注:CK. 对照,无低温和外源 SA 处理;T<sub>0</sub>. 单纯低温处理;T<sub>0.1</sub>. 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> SA+低温处理;T<sub>0.5</sub>. 0.5 mmol·L<sup>-1</sup> SA+低温处理;T<sub>1.0</sub>. 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> SA+低温处理;T<sub>2.0</sub>. 2.0 mmol·L<sup>-1</sup> SA+低温处理;相同处理时间内不同小写字母表示处理间差异达0.05显著水平;下同

Note: CK. Control, without chilling stress and SA treatment; T<sub>0</sub>. chilling stress; T<sub>0.1</sub>. 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> SA+ chilling stress; T<sub>0.5</sub>. 0.5 mmol·L<sup>-1</sup> SA+ chilling stress; T<sub>1.0</sub>. 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> SA+ chilling stress; T<sub>2.0</sub>. 2.0 mmol·L<sup>-1</sup> SA+ chilling stress; The different normal letters within the same treatment time indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same as below

降低 27.54%、42.95% 和 31.63%。低温胁迫下施用不同浓度 SA 均能不同程度增加甜瓜叶片的叶绿素 a、b 和 a+b 含量,但各低温处理仍明显低于对照(CK);1.0 mmol · L<sup>-1</sup> SA 处理的增幅最大,其低温处理 7 d 幼苗叶绿素 a、b 和 a+b 含量分别比 T<sub>0</sub> 处理显著增加 27.66%、59.49% 和 34.60%,其恢复 7 d 幼苗则分别比相应 T<sub>0</sub> 处理显著增加 19.68%、58.96% 和 28.37%。可见,低温胁迫能诱导甜瓜幼苗叶片叶绿素含量显著降低,而外源 SA 能够缓解这种下降趋势,并以 1.0 mmol · L<sup>-1</sup> SA 处理的效果最好。

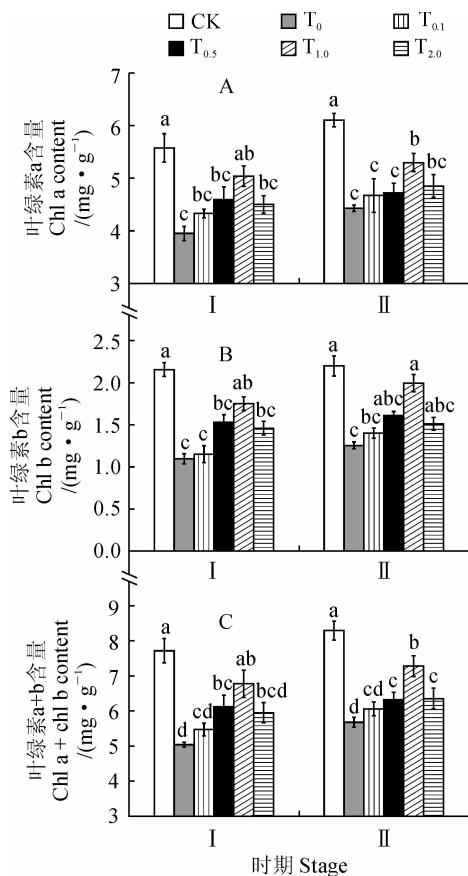
### 2.3 外源 SA 对低温胁迫下甜瓜幼苗渗透调节物质含量的影响

从图 2 可知,与对照(CK)相比,低温处理 7 d 后甜瓜叶片中可溶性糖和脯氨酸含量分别显著提高 12.22% 和 27.63%,而其可溶性蛋白含量却显著降

低了 39.66%。与单独低温胁迫(T<sub>0</sub>)相比,外源 SA 能够不同程度地增加甜瓜叶片中可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量,且随浓度的增加呈先上升后下降的趋势,1.0 mmol · L<sup>-1</sup> SA 处理的可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量最高,与 T<sub>0</sub> 相比分别显著增加了 68.97%、58.10% 和 44.30%。恢复处理 7 d 后,各处理甜瓜幼苗叶片可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白含量的变化趋势与低温胁迫处理 7 d 相似,1.0 mmol · L<sup>-1</sup> SA 处理的可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸的含量分别比 T<sub>0</sub> 处理显著增加了 54.79%、66.92% 和 44.86%,并高于相应的对照水平。说明低温胁迫下施用不同浓度的 SA 能够增加甜瓜叶片中渗透调节物质的积累,减轻低温对甜瓜幼苗造成的伤害,且 1.0 mmol · L<sup>-1</sup> SA 处理作用最明显。

### 2.4 外源 SA 对低温胁迫下甜瓜幼苗活性氧和膜脂过氧化的影响

从图 3 来看,与常温对照(CK)相比,单独低温处理(T<sub>0</sub>)7 d 后显著提高了甜瓜叶片中的 MDA 含



I. 处理 7 d; II. 恢复 7 d。下同

图 1 外源 SA 预处理对低温胁迫以及恢复处理的甜瓜幼苗叶绿素含量的影响

I. Treatment 7 d; II. Resume 7 d. The same as below  
Fig. 1 Effects of exogenous SA pretreatment on chlorophyll contents of melon seedlings under chilling stress and resume treatment

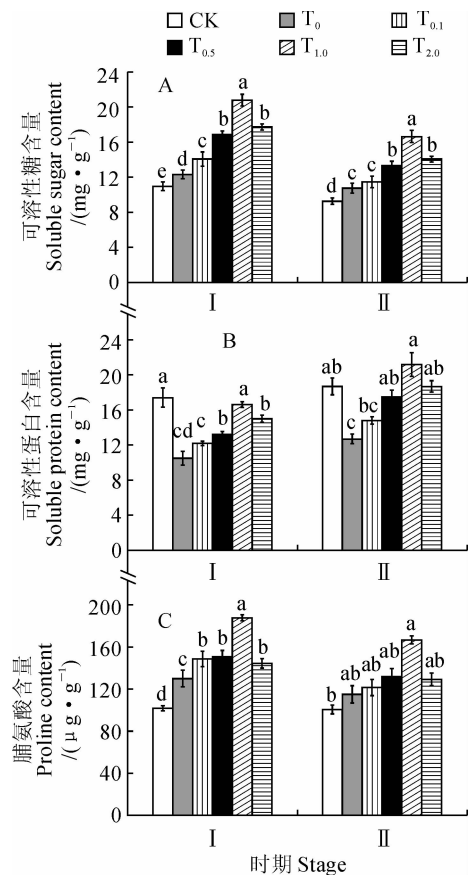


图 2 外源 SA 预处理对低温胁迫以及恢复处理的甜瓜幼苗渗透调节物质含量的影响

Fig. 2 Effects of exogenous SA pretreatment on osmotic adjustment substances of melon seedlings under chilling stress and resume treatment

量、 $H_2O_2$  含量、 $O_2^-$  产生速率及电解质渗透率,相应增幅分别为 72.00%、77.35%、79.02%和 47.77%。在不同浓度外源 SA 处理下,低温处理 7 d 甜瓜叶片中 MDA 含量、 $H_2O_2$  含量、 $O_2^-$  产生速率及电解质渗透率相比  $T_0$  处理均有所降低,其中以 1.0  $mmol \cdot L^{-1}$  SA 处理最低,比  $T_0$  处理分别下降了 30.72%、56.98%、65.35%、33.92%。恢复 7 d 后,各处理甜瓜幼苗叶片 MDA 含量、 $H_2O_2$  含量、 $O_2^-$  的产生速率和电解质渗透率的变化趋势与低温胁迫 7 d 相似,1.0  $mmol \cdot L^{-1}$  SA 处理的 MDA 含量、 $H_2O_2$  含量及  $O_2^-$  产生速率比相应  $T_0$  处理分别降低了 63.64%、56.29% 和 63.41%。以上结果说明 SA 处理能够有效缓解低温胁迫对甜瓜幼苗造成的膜脂过氧化伤害,提高甜瓜幼苗的耐低温能力。

### 2.5 外源 SA 对低温胁迫下甜瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

图 4 显示,与常温对照(CK)相比,低温胁迫 7 d 后,单独低温胁迫( $T_0$ )甜瓜幼苗叶片 SOD、POD、CAT、GR 和 DHAR 活性分别降低 23.80%、20.95%、29.63%、68.42%和 54.54%,而 APX 活性则升高 26.83%;低温胁迫下经不同浓度 SA 处理的甜瓜幼苗叶片中各抗氧化酶活性均比  $T_0$  处理不同程度增加,且活性随 SA 浓度的增加呈现先上升

后下降的变化趋势,并在 SA 浓度为 1.0  $mmol \cdot L^{-1}$  时各抗氧化酶活性均达最大值,此时比单独低温处理分别提高了 36.31%、118.07%、55.26%、48.08%、233.33%和 100.00%。在恢复 7 d 后,除 CAT 以外,甜瓜幼苗叶片其他抗氧化酶活性与低温胁迫 7 d 相比均有不同程度的增加,它们随 SA 浓度的变化规律与低温胁迫 7 d 相似,同样以 1.0  $mmol \cdot L^{-1}$  SA 处理的甜瓜幼苗叶片抗氧化酶活性最大,且与常温对照相比显著增加(CAT 和 DHAR 活性除外)。以上结果表明低温胁迫下喷施不同浓度的 SA 能诱导甜瓜幼苗抗氧化酶活性明显增强,其中以 1.0  $mmol \cdot L^{-1}$  SA 处理的作用最为显著。

### 2.6 外源 SA 对低温胁迫下甜瓜幼苗抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响

图 5 表明,低温胁迫 7 d 时,单独低温胁迫处理甜瓜幼苗叶片中 ASA、GSH 含量及 ASA/DHA、GSH/GSSG 比值与对照相比均显著降低,降幅分别为 68.29%、74.51%、76.37%和 82.81%;同时,低温胁迫下外源施用 SA 提高了甜瓜幼苗叶片中的 ASA、GSH 含量及 ASA/DHA、GSH/GSSG,且各指标随 SA 浓度的增加呈现先升高后降低的变化趋势,其中在 1.0  $mmol \cdot L^{-1}$  SA 处理时达到最大值,此时比单独低温处理分别提高了 2.20、2.04、2.86

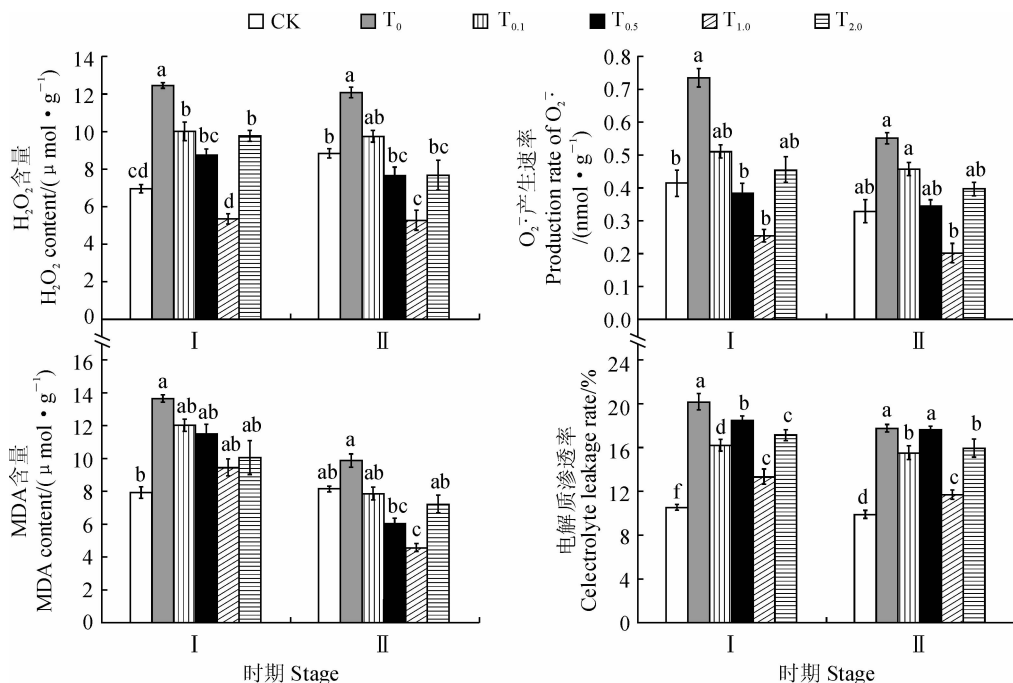


图 3 外源 SA 预处理对低温胁迫以及恢复处理的甜瓜幼苗活性氧及膜脂过氧化和透性的影响

Fig. 3 Effects of exogenous SA pretreatment on  $H_2O_2$  and MDA contents, production rate of  $O_2^-$  and electrolyte leakage of melon seedlings under chilling stress and resume treatment

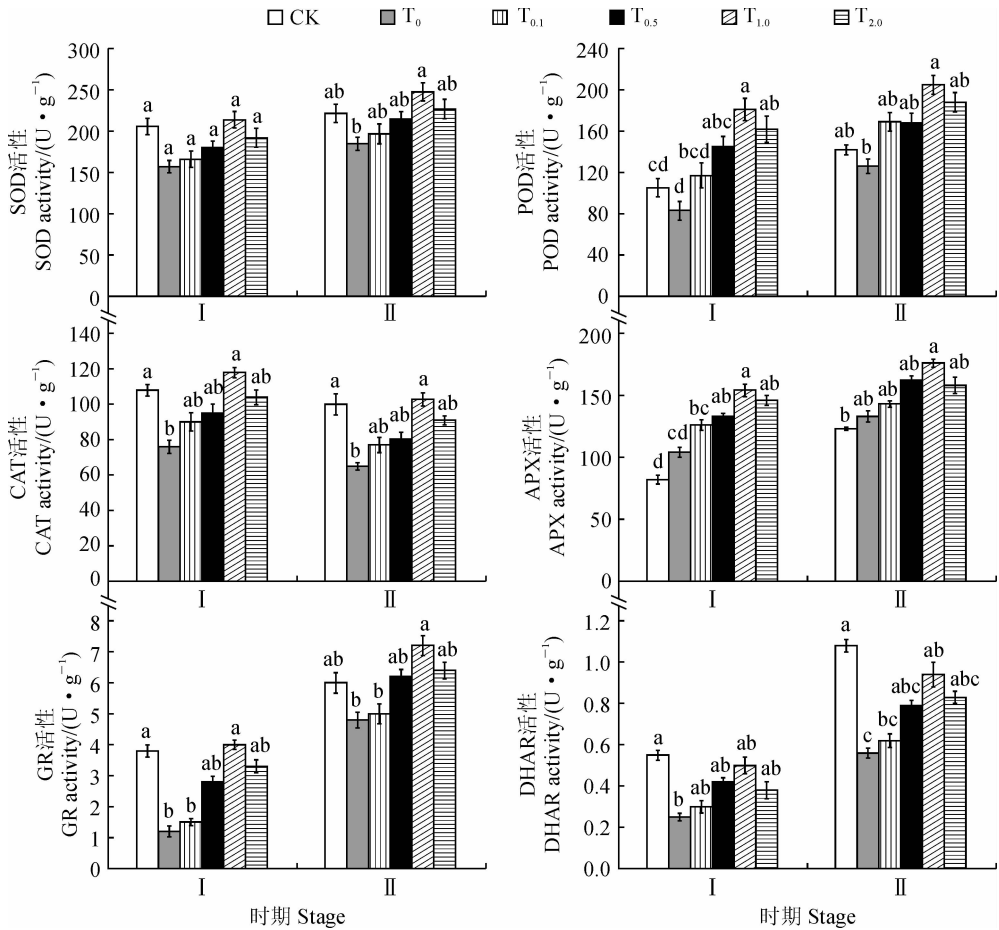


图4 外源 SA 预处理对低温胁迫以及恢复处理的甜瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effects of exogenous SA pretreatment on antioxidant enzyme activities of melon seedlings under chilling stress and resume treatment

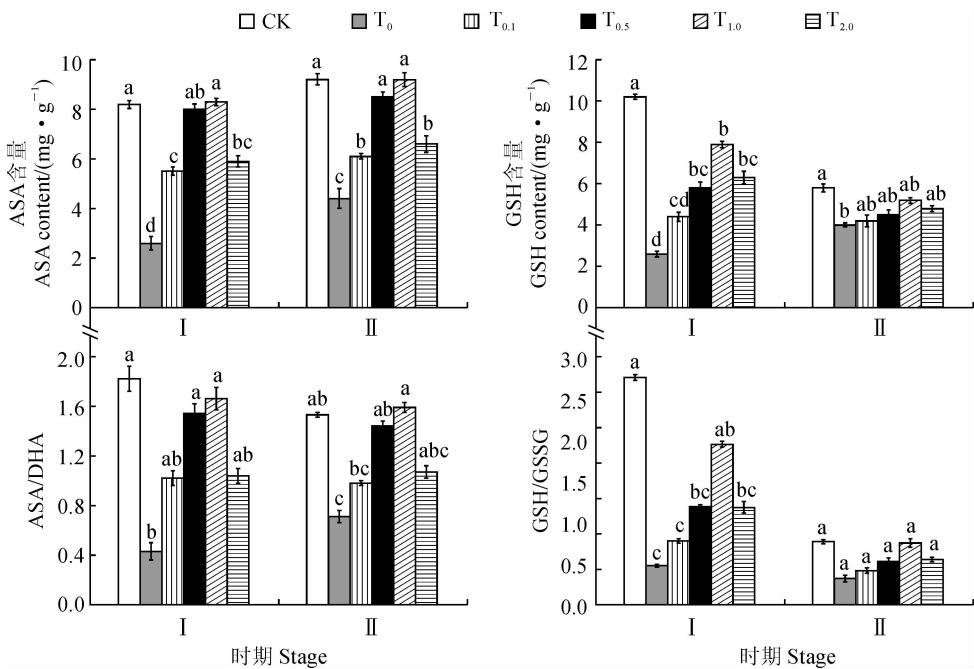


图5 外源 SA 预处理对低温胁迫以及恢复处理的甜瓜幼苗抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响

Fig. 5 Effects of exogenous SA pretreatment on ASA-GSH cycle of melon seedlings under chilling stress and resume treatment

和 3.11 倍。恢复 7 d 后,除了 ASA 含量外,甜瓜幼苗叶片中的 GSH 含量及 ASA/DHA、GSH/GSSG 比值与低温胁迫 7 d 相比均有所降低,单个值的变化规律与低温胁迫 7 d 相似,仍以  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  SA 处理的甜瓜幼苗叶片中 ASA、GSH 含量及 ASA/DHA、GSH/GSSG 比值最大,与常温对照相比无显著性差异,与单独低温胁迫相比显著提高,增幅分别为 1.09、0.30、1.24 和 1.35 倍。以上结果表明低温胁迫下施用不同浓度的 SA 能激活抗坏血酸-谷胱甘肽循环系统,有效减轻低温胁迫对甜瓜幼苗引起的过氧化伤害。

### 3 讨论

植物的生长发育除了受到遗传因素调控外,还会受到环境条件的影响,低温胁迫是影响设施栽培蔬菜作物优质高产的主要限制因子。前人研究已经证明,低温胁迫会导致植物发生一系列生理生化变化,造成生理功能紊乱。本研究中,与常温对照相比,低温胁迫处理明显抑制了甜瓜幼苗的生长,植株的株高、茎粗和地上鲜重显著低于对照,即使经过恢复处理也无法达到对照水平。同时,低温胁迫还降低了甜瓜幼苗叶片中的叶绿素含量。此外,经过低温胁迫处理 7 d 后,甜瓜幼苗叶片的相对电导率明显高于对照,说明长期低温胁迫会使细胞膜受到损伤,细胞膜透性增大,使甜瓜幼苗产生冷害性状。这与前人在黄瓜和水稻等作物上的研究结果一致<sup>[25]</sup>。在本研究中,低温胁迫下施用不同浓度的外源 SA 均能有效缓解低温对甜瓜幼苗的伤害,并以  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  SA 的效果最显著;与单独低温胁迫相比,低温胁迫下施用  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  SA 能显著提高甜瓜幼苗的生长量和叶绿素含量,同时增加可溶性糖、可溶性蛋白及脯氨酸等渗透调节物质的含量,降低叶片的相对电导率,从而提高甜瓜幼苗的耐冷性,这与辛慧慧等在棉花上<sup>[26]</sup>、刘晓静等<sup>[27]</sup>在甘蔗上的研究结果一致。

活性氧爆发是植物抵抗非生物胁迫的早期反应,当活性氧大量产生时,会造成生物大分子的氧化损伤。MDA 作为脂质过氧化的产物,能有效地反映氧化损伤的程度。甜瓜幼苗在受到低温胁迫后,

$\text{H}_2\text{O}_2$  和  $\text{O}_2^-$  等活性氧在体内积累增加,最终会打破活性氧产生与清除的动态平衡,从而可能会造成氧化伤害,同样的,低温胁迫处理显著增加了 MDA 含量,造成膜脂过氧化。植物体内的保护系统能有效清除活性氧,其中的酶促系统包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)和谷胱甘肽还原酶(GR)等抗氧化酶,非酶促抗氧化系统包括抗坏血酸-谷胱甘肽(ASA-GSH)系统等<sup>[28]</sup>。本研究中,低温下施用不同浓度的 SA 均能诱导甜瓜幼苗叶片 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶的活性提高,且随 SA 浓度的增加呈现先升高后下降的趋势,并以  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  SA 的作用最显著,说明外源 SA 通过增加抗氧化酶活性来有效减少植株体内自由基的产生。相似的结果在棉花<sup>[29]</sup>、水稻<sup>[30]</sup>、萝卜<sup>[31]</sup>上也得到证明,也有研究表明高浓度的 SA 会对玉米和烟草产生毒害作用<sup>[32-33]</sup>,因此,SA 对于不同作物以及不同逆境胁迫下的调控作用会因浓度的不同而异。本研究的 4 个 SA 浓度梯度中, $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  SA 能明显提高甜瓜幼苗的耐低温性,而  $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  SA 处理对甜瓜幼苗的耐冷性作用明显降低。同时,ASA-GSH 循环在逆境条件下也能有效清除植物体内累积的活性氧,APX、DHAR 和 GR 是其中涉及到的关键酶,ASA、GSH、ASA/DHA 和 GSH/GSSG 也在此循环中发挥重要作用<sup>[34]</sup>。在本研究中,低温胁迫下施用 SA 能明显提高了甜瓜幼苗叶片中的 APX、DHAR 和 GR 活性,以及 ASA 含量、GSH 含量、ASA/DHA、GSH/GSSG,通过激活 ASA-GSH 循环来达到清除自由基的效果。可见,低温胁迫下施用适宜浓度的 SA 能通过增强抗氧化酶活性,激活 ASA-GSH 循环来清除体内多余的活性氧,从而减轻低温对甜瓜植株造成的氧化损伤。

综上所述,对低温胁迫下甜瓜幼苗叶片喷施适当浓度的外源 SA 后,可以明显改善低温下甜瓜幼苗的生理特性,明显提高其渗透调节物质含量,显著增强 SOD、POD、CAT、APX 等抗氧化酶活性,激活 ASA-GSH 循环,显著降低了活性氧的产生和膜脂过氧化伤害,从而有效缓解低温胁迫对甜瓜幼苗的损害,明显提高幼苗的耐寒能力。

## 参考文献:

- [1] 胡俊杰, 张古文, 胡齐赞, 等. 低温胁迫对菜用大豆生长、叶片活性氧及多胺代谢的影响[J]. 浙江农业学报, 2011, **23**(6): 1 113-1 118.  
HU J J, ZHANG G W, HU Q Z, *et al.* Effects of chilling stress on growth, metabolism of reactive oxygen species and polyamines in vegetable soybean seedlings[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, **23**(6): 1 113-1 118.
- [2] KHAN W, PRITHVIRAJ B, SMITH D L. Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, **160**(5): 485-492.
- [3] YANG Y N, QI M, MEI C. Endogenous salicylic acid protects rice plants from oxidative damage caused by aging as well as biotic and abiotic stress[J]. *The Plant J*, 2004, **40**(6): 909-919.
- [4] 宋士清, 郭世荣, 尚庆茂. 外源 SA 对盐胁迫下黄瓜幼苗的生理效应[J]. 园艺学报, 2006, **33**(1): 68-72.  
SONG S Q, GUO S R, SHANG Q M, *et al.* Physiological effects of exogenous salicylic acid on cucumber seedlings under the salt stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, **33**(1): 68-72.
- [5] HAYAT Q, HAYAT S, IRFANA M. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: a review[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, **68**(1): 14-25.
- [6] 郝敬虹, 易 畅, 尚庆茂, 等. 水杨酸处理对干旱胁迫下黄瓜幼苗氮素同化及其关键酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2012, **39**(1): 81-89.  
HAO J H, YI Y, SHANG Q M, *et al.* Effect of exogenous salicylic acid on nitrogen assimilation of cucumber seedling under drought stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, **39**(1): 81-89.
- [7] 马占青, 李新旭, 孙国钧, 等. 水杨酸在诱导番茄抗冷性中的作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, **49**(4): 515-524.  
MA Z Q, LI X X, SUN G J, *et al.* Effects of salicylic acid on induction of chilling tolerance in tomato seedlings[J]. *Journal of Lanzhou University*, 2013, **49**(4): 515-524.
- [8] 徐晓昫, 郁继华, 颜建明, 等. 水杨酸和油菜素内酯对低温胁迫下黄瓜幼苗光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(9): 3 009-3 015.  
XU X Y, YU J H, XIE J M, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid and brassinolide on photosynthesis of cucumber seedlings under low temperature stress[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(9): 3 009-3 015.
- [9] 吴能表. 外源水杨酸对萝卜低温胁迫的缓解作用[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, **28**(5): 782-785.  
WU N B. Alleviating effect of exogenous salicylic acid (SA) on chilling stress in radish[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2006, **28**(5): 782-785.
- [10] 苗永美, 王万洋, 杨海林, 等. 外源  $\text{Ca}^{2+}$ 、SA 和 ABA 缓解甜瓜低温胁迫伤害的生理作用[J]. 南京农业大学学报, 2013, **36**(4): 25-29.  
MIAO Y M, WANG W Y, YANG H L, *et al.* Physiological effects of exogenous  $\text{Ca}^{2+}$ , SA and ABA in alleviating low temperature stress of melon seedlings[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, **36**(4): 25-29.
- [11] JANDA T, SZALAI G, ANTUNOVICS Z, *et al.* Effect of benzoic acid and aspirin on chilling tolerance and photosynthesis in young maize plants [J]. *Maydica*, 2000, **45**(1): 29-33.
- [12] 张永平, 许 爽, 杨少军, 等. 外源亚精胺对低温胁迫下甜瓜幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2017, **53**(6): 1 087-1 096.  
ZHANG Y P, XU S, YANG S J, *et al.* Effect of exogenous spermidine on the growth and antioxidant system of melon seedlings under low temperature stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, **53**(6): 1 087-1 096.
- [13] 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, 2000: 167-169.
- [14] 张殿忠, 汪沛洪, 赵会贤. 测定小麦叶片游离脯氨酸含量的方法[J]. 植物生理学通讯, 1990, (4): 62-65.  
ZHANG D Z, WANG P H, ZHAO H X. Determination of the content of free proline in wheat leaves[J]. *Plant Physiol Commun*, 1990, (4): 62-65.
- [15] HEATH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts; I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. *Arch Biochem Biophys*, 1968, **125**(1): 189-198.
- [16] 郭欣欣, 李晓锋, 朱红芳, 等. 淹水胁迫对不结球白菜抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响[J]. 植物生理学报, 2015, **51**(12): 2 181-2 187.  
GUO X X, LI X F, ZHU H F, *et al.* Effects of waterlogging stress on ascorbate-glutathione cycle in *Brassica campestris* ssp. *chinensis*[J]. *Plant Physiol J*, 2015, **51**(12): 2 181-2 187.
- [17] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. 植物生理学通讯, 1990, (6): 55-57.  
WANG A G, LUO G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1990, (6): 55-57.
- [18] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases; I. Occurrence in higher plants[J]. *Plant Physiol*, 1977, **59**: 309-314.



- [19] THOMAS R L, JEN J J, MORR C V. Changes in soluble and bound peroxidase, IAA oxidase during tomato fruit development[J]. *J Food Sci*, 1981, 47: 158-161.
- [20] DHINDSA R S, PLUMB-DHINDSA P, THORPE T A. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation and decreased levels of superoxide dismutase and catalase[J]. *J Exp Bot*, 1981, 32: 93-101.
- [21] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant Cell Physiol*, 1981, 22(5): 867-880.
- [22] LAW M Y, CHARLES S A, HALLIWELL B. Glutathione and ascorbic acid in spinach (*Spinacia oleracea*) chloroplasts[J]. *Biochem J*, 1983, 210: 899-903.
- [23] GRIFFITH O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine[J]. *Anal Biochem*, 1980, 106(1): 207-212.
- [24] HOSSAIN M A, ASADA K. Purification of dehydroascorbate reductase from spinach and its characterization as a thiol enzyme[J]. *Plant Cell Physiol*, 1984, 25(1): 85-92.
- [25] 闫小红, 胡文海, 曾守鑫, 等. 低温胁迫下 24-表油菜素内酯对辣椒种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(5): 563-568.
- YAN X H, HU W H, ZENG S X, *et al.* Effects of 24-epibrassinosteroids on the seed germination and seedling growth of pepper under low temperature stress[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2012, 31(5): 563-568.
- [26] 辛慧慧, 李防洲, 侯振安, 等. 低温胁迫下棉花幼苗对外源水杨酸的生理响应[J]. 植物生理学通讯, 2014, 50(5): 660-664.
- XIN H H, LI F Z, HOU Z A, *et al.* Physiological response of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedling to exogenous salicylic acid under low temperature stress[J]. *Plant Physiol J*, 2014, 50(5): 660-664.
- [27] 刘晓静, 郭凌飞, 李 鸣, 等. 水杨酸对低温胁迫下甘蔗苗期抗寒性的效应[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5): 265-268.
- LIU X J, GUO L F, LI M, *et al.* Effect of salicylic acid on sugarcane seedling stage under low temperature stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(5): 265-268.
- [28] XU J, WANG W Y, YIN H X, *et al.* Exogenous nitric oxide improves antioxidative capacity and reduces auxin degradation in roots of *Medicago truncatula* seedlings under cadmium stress[J]. *Plant Soil*, 2010, 326(2): 321-330.
- [29] 武 辉, 张巨松, 石俊毅, 等. 棉花幼苗对不同程度低温逆境的生理响应[J]. 西北植物学报, 2013, 33(1): 74-82.
- WU H, ZHANG J S, SHI J Y, *et al.* Physiological responses of cotton seedlings under low temperature stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(1): 74-82.
- [30] 倪祥银, 齐泽民, 廖 姝, 等. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下大豆种子萌发和幼苗生长生理的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(1): 106-111.
- NI X Y, QI Z M, LIAO S, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on seed germination and seedling growth physiological characteristics of soybean under NaCl stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(1): 106-111.
- [31] 初 敏, 王秀峰, 王淑芬, 等. 外源 SA 预处理对低温胁迫下萝卜幼苗的生理效应[J]. 西北农业学报, 2012, 21(2): 142-145.
- CHU M, WANG X F, WANG S F, *et al.* Physiological effects of exogenous salicylic acid on radish seedlings under low temperature stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(2): 142-145.
- [32] JANDA T, SZALAI G, ANTUNOVICS Z S, *et al.* Effect of benzoic acid and aspirin on chilling tolerance and photosynthesis in young maize plants[J]. *Maydica*, 2000, 45(1): 29-33.
- [33] DAT J F, LOPEZ-DELGADO H, FOYER C H, *et al.* Effects of salicylic acid on oxidative stress and thermo tolerance in tobacco[J]. *J Plant Physiol*, 2000, 156: 659-665.
- [34] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends Plant Sci*, 2002, 7(9): 405-410.

(编辑: 裴阿卫)