

## 外源水杨酸对镉胁迫下甜瓜幼苗生长、光合作用和活性氧代谢的缓解效应

张永平<sup>1</sup>, 范红伟<sup>2</sup>, 杨少军<sup>1</sup>, 陈幼源<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>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; <sup>2</sup>上海市农业技术推广服务中心, 上海201103

**摘要:** 以甜瓜耐镉品种‘哈密绿’和镉敏感品种‘秀绿’为试验材料, 在人工气候箱内采用基质栽培法, 研究了外源水杨酸(SA)处理对镉(Cd)胁迫下甜瓜幼苗生长、光合作用和活性氧代谢的缓解效应。结果显示: 与对照(CK)比较, Cd处理显著抑制了甜瓜幼苗的生长和光合作用, 降低了叶绿素含量, 抗氧化酶活性、脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量和超氧阴离子(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)产生速率增加; 在Cd胁迫下, SA处理可以有效促进甜瓜幼苗的生长, 增加了叶绿素含量、净光合速率(P<sub>n</sub>)、气孔导度(G<sub>s</sub>)、蒸腾速率(T<sub>i</sub>)、气孔限制值(L<sub>s</sub>)和水分利用效率(WUE), 降低了胞间CO<sub>2</sub>浓度(C<sub>i</sub>); 提高了超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX), 增强植株抗氧化能力, 使Pro和可溶性蛋白含量升高, MDA含量和O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率下降, 能有效抑制镉胁迫引起的膜脂过氧化伤害; 镉敏感品种‘秀绿’变化幅度大于耐镉品种‘哈密绿’。研究结果说明, SA有利于甜瓜幼苗在Cd胁迫下活性氧代谢的提高和对光能的捕获与转换, 促进了甜瓜幼苗的生长, 降低Cd胁迫对甜瓜幼苗的抑制作用, 且对镉敏感品种‘秀绿’效果大于耐镉品种‘哈密绿’。

**关键词:** 外源水杨酸; 甜瓜; 镉胁迫; 光合作用; 活性氧代谢

## Alleviating Effects of Exogenous Salicylic Acid on Growth, Photosynthesis and Reactive Oxygen Metabolism in Melon Seedlings under Cadmium Stress

ZHANG Yong-Ping<sup>1</sup>, FAN Hong-Wei<sup>2</sup>, YANG Shao-Jun<sup>1</sup>, CHEN You-Yuan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology, Horticultural Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; <sup>2</sup>Shanghai Agriculture Technology Extension and Service Center, Shanghai 201103, China

**Abstract:** The experiment was carried out by ‘Hamilü’ (cadmium-tolerant) and ‘Xiulü’ (cadmium-sensitive) in climate chambers and substrates to investigate the alleviating effects of exogenous salicylic acid (SA) on melon seedlings for growth, photosynthesis and reactive oxygen metabolism under cadmium stress. The results showed that under Cd stress, melon-seedling growth, photosynthesis and chlorophyll contents were decreased, the antioxidant enzyme activities, proline, MDA content and O<sub>2</sub><sup>-</sup> producing rate were increased. SA could increase melon-seedling growth, chlorophyll contents, net photosynthetic rate (P<sub>n</sub>), stomatal conductance (G<sub>s</sub>), transpiration rate (T<sub>i</sub>), stomatal limitation (L<sub>s</sub>) and water use efficiency (WUE), while reduce intercellular carbon dioxide concentration (C<sub>i</sub>) under cadmium stress. SA also raised leaf the activity of superoxid dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX), proline and soluble protein content, reduced MDA content and O<sub>2</sub><sup>-</sup> producing rate, suppressed the membrane lipid peroxidation under cadmium stress. Under cadmium stress condition, we not only found that SA caused enhancement in photosynthesis and antioxidant enzyme activity of two melon genotypes, but also found that the enhancement of cadmium-sensitive ‘Xiulü’ was higher than cadmium-tolerant ‘Hamilü’. Obviously, SA was favorable for the seedlings to increase the growth and reactive oxygen metabolism, capture and converse solar energy, thus improving melon growth and abating the inhibitory effects of cadmium stress on melon, These findings suggested that ameliorative effect of SA on melon seedlings with cadmium stress was effective, especially for cadmium -sensitive genotypes.

**Key words:** exogenous salicylic acid; melon; cadmium stress; photosynthesis; reactive oxygen metabolism

甜瓜属于葫芦科(Cucurbiaceae)甜瓜属(*Cucumis*), 是一种蔓生草本植物, 果实营养丰富、甘甜爽口、风味独特, 是深受大众喜爱的消暑珍品, 名列世界十大水果之一。近年来, 随着我国农业经济结构的调整, 其栽培面积逐步扩大, 为农民增

收、农业增效开辟了一条途径(王霞霞2004)。但

收稿 2014-04-18 修定 2014-08-18

资助 上海市西甜瓜产业体系项目、上海市科技成果转化项目(123919N1800)和上海市闵行区科技项目(2012MH102)。

\* 通讯作者(E-mail: yy12@saas.sh.cn; Tel: 021-52630133)。

是,有些种植者为追求高产,大量施用化肥和农药,加上工业“三废”排放量日益增加,土壤污染愈来愈严重(Wu等2010;刘柿良等2013)。在我国,土壤镉污染最为严重,且由于含镉工业产品用途广泛而使土壤污染大幅加剧(马学文等2011)。有研究表明,即使环境中含有较低浓度的镉,也会通过影响养分吸收、光合作用使植物体内代谢过程紊乱,生长发育受到抑制(Milone等2003)。镉污染问题已成为威胁土壤生态安全和制约农业可持续发展的重要因素(Clememte等2003;曹会聪等2007)。

水杨酸(salicylic acid, SA)作为一类新型的植物生长调解物质,在诱导植物抗病性、激活植物过敏反应和系统获得抗性方面起重要信号调解作用(夏瑾华等2012),能在一定程度上缓解铜胁迫对玉米造成的伤害(黄丽华和陆凤秀2009)。丁佳红等(2013)研究表明SA能够提高铜胁迫下水稻幼苗的POD、CAT和SOD的活性,强化植物体内保护酶的功能,增强水稻幼苗对铜毒害的能力。适宜浓度的SA能显著缓解铅胁迫对小白菜幼苗生长的抑制,可通过协调植株体内抗氧化酶系统活性,减轻氧化胁迫程度,从而增强植物抗氧化能力(夏瑾华等2012)。但关于外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗生长、光合作用和抗氧化酶系统研究报道甚少。本试验以甜瓜为试材,研究了外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗生长、光合作用及活性氧代谢的影响,探讨SA诱导甜瓜抗Cd胁迫的可能性及部分机理,旨在为缓解镉污染造成的毒害和农业生态环境保护提供一定的理论依据,也为农业生产上提高甜瓜作物抗重金属的栽培措施提供一种途径。

## 材料与方法

### 1 试材培育

供试的甜瓜(*Cumumis melo* L.)品种为‘哈密绿’(耐镉品种)和‘秀绿’(镉敏感品种),种子由上海市农业科学院园艺所提供,试验在上海市农业科学院园艺所进行。2013年8月20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,然后放置于光照培养箱中进行幼苗培养,温度设置为昼(30±1) °C/夜(20±1) °C,光照12 h,光照强度为400 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>左右。

### 2 试验处理

2013年9月5日,当幼苗长到3~4片真叶时,进

行4种试验处理:(1) 1/2浓度日本园试营养液作对照(下文简称CK,下同);(2) 100 μmol·L<sup>-1</sup> SA (SA);(3) 100 mg·L<sup>-1</sup> Cd (Cd);(4) 100 μmol·L<sup>-1</sup> SA+100 mg·L<sup>-1</sup> Cd (SA+Cd)。叶面喷施甜瓜幼苗,每种处理10株,3次重复,随机排列。处理10 d后选取幼苗生长点下第2片完全展开叶进行各项指标的测定。

SA购买于上海国药集团,先用95%的乙醇溶解,后用蒸馏水配制1 000 μmol·L<sup>-1</sup>的母液,4 °C保存,用时按试验所需浓度进行稀释。Cd供体为氯化镉(CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O,国产分析纯)。

### 3 测定项目与方法

参照李合生(2000)的方法进行测定叶绿素含量;利用LI-6400光合仪(美国LI-COR公司生产)于上午9~11时测定净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ ),气孔导度( $G_s$ )和胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ ),测定时光照强度约800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,温度为(30±1) °C,CO<sub>2</sub>浓度约为(400±10) μmol·mol<sup>-1</sup>,计算气孔限制值( $L_s$ )=1- $C_i/C_o$  ( $C_o$ 为叶外空气CO<sub>2</sub>浓度),水分利用效率(WUE)= $P_n/T_r$  (李伟等2008);超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法(Dhindsa等1981),以抑制NBT光化还原的50%为一个酶活力单位(U);过氧化物酶(POD)活性采用Kochba等(1977)的方法测定,以OD<sub>470</sub>每增加1为一个酶活力单位(U);过氧化氢酶(CAT)活性采用Dhindsa等(1981)的方法测定,以OD<sub>240</sub>每分钟减少0.1为一个酶活力单位(U);抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的测定按照Nakano和Asada (1981)的方法;可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝G250法(李合生2000);脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮比色法(张殿忠等1990);丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法(Heath和Packer 1968);超氧阴离子(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)产生速率的测定参照王爱国和罗广华(1990)的方法;处理结束后进行生长指标的测定,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;叶面积公式采用叶长×叶宽×0.66,叶长和叶宽的测定以最大值为基准(王加蓬等2009)。

### 4 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。

## 实验结果

### 1 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗生长的影响

由表1可以看出, 单一Cd处理(Cd), 两个甜瓜品种幼苗生长量显著低于对照(CK), ‘哈密绿’的株高、茎粗和叶面积分别下降了26.73%、24.39%和19.15%, ‘秀绿’分别下降了30.25%、26.41%和25.33%, Cd处理对‘秀绿’生长的抑制程度明显大于‘哈密绿’; SA单独处理时, 2个品种的生长量与CK差异均不显著; 与Cd处理相比, SA+Cd处理使两个甜瓜品种的株高、茎粗和叶面积显著增加(‘哈密绿’叶面积除外), ‘哈密绿’分别增加了19.35%、21.61%和10.99%, ‘秀绿’分别增加了20.67%、29.97%和22.96%, ‘秀绿’增加幅度大于‘哈密绿’。可见, SA能有效缓解Cd胁迫对甜瓜幼苗生长的抑制作用, 且对镉敏感品种效果好于耐镉品种。

### 2 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗叶绿素含量的影响

从表2可以看出, Cd处理使两个甜瓜品种幼

苗叶片叶绿素和类胡萝卜素含量均显著低于CK; 与CK相比, ‘哈密绿’的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)和类胡萝卜素含量分别下降了54.92%、43.53%、51.52%和35.25%, ‘秀绿’分别下降了60.85%、53.09%、58.62%和39.06%; 与Cd处理相比, SA+Cd处理显著提高甜瓜幼苗的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)和类胡萝卜素含量, ‘哈密绿’分别增加了89.63%、48.75%、75.57%和28.40%, ‘秀绿’分别增加111.27%、52.68%、92.23%和37.56%, ‘秀绿’上升的幅度明显大于‘哈密绿’; SA处理下, 两个品种叶片叶绿素含量与CK差异均不显著。

### 3 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗光合作用的影响

如图1-A所示, Cd处理导致两个甜瓜品种幼苗叶片净光合速率( $P_n$ )均显著低于CK, ‘哈密绿’和‘秀绿’分别下降了75.44%和77.84%。与Cd处理相比, SA+Cd处理均显著提高了 $P_n$ , ‘哈密绿’和‘秀绿’分别增加了191.33%和211.47%, ‘秀绿’增加幅度大于‘哈密绿’。SA处理时, ‘哈密绿’和‘秀绿’幼苗的 $P_n$ 与CK差异均不显著。在相同处理时, ‘哈密绿’的 $P_n$ 均大于‘秀绿’。气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和气孔限制值( $L_s$ )与 $P_n$ 的变化趋势基本一致, 与Cd处理相比, SA+Cd处理也显著提高了两个甜瓜品种的 $G_s$ 、 $T_r$ 和 $L_s$ (图1-B、D和E), ‘哈密绿’分别增加了80.28%、159.15%和177.30%, ‘秀绿’分别增加了162.55%、93.63%和215.86%, ‘秀绿’增加幅度大于‘哈密绿’( $T_r$ 除外)。由图1-C可以看出, Cd处理导致两个甜瓜品种的胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )增加, ‘哈密绿’和‘秀绿’幼苗的 $C_i$ 分别比CK增加了126.97%和178.87%, 与Cd处理相比, SA+Cd处理的 $C_i$ 显著降低。耐镉品种‘哈密绿’水分利用效率(WUE)各处理间差异不显著, 镉敏感品种‘秀绿’SA+Cd处理明

表1 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗生长的影响

Table 1 Effects of exogenous SA on the growth of melon seedlings under cadmium stress

| 品种    | 处理    | 株高/cm                   | 茎粗/mm                  | 叶面积/cm <sup>2</sup>      |
|-------|-------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| ‘哈密绿’ | CK    | 14.33±0.91 <sup>a</sup> | 4.10±0.36 <sup>a</sup> | 38.38±3.48 <sup>ab</sup> |
|       | SA    | 14.70±0.53 <sup>a</sup> | 4.03±0.35 <sup>a</sup> | 39.95±2.04 <sup>a</sup>  |
|       | Cd    | 10.50±0.90 <sup>c</sup> | 3.10±0.26 <sup>b</sup> | 31.03±2.74 <sup>b</sup>  |
|       | SA+Cd | 12.67±0.67 <sup>b</sup> | 3.77±0.36 <sup>a</sup> | 34.44±2.59 <sup>ab</sup> |
| ‘秀绿’  | CK    | 16.30±1.05 <sup>a</sup> | 3.90±0.30 <sup>a</sup> | 36.75±2.66 <sup>a</sup>  |
|       | SA    | 16.93±0.85 <sup>a</sup> | 3.90±0.26 <sup>a</sup> | 36.49±2.43 <sup>a</sup>  |
|       | Cd    | 11.37±0.74 <sup>c</sup> | 2.87±0.15 <sup>b</sup> | 27.44±1.09 <sup>b</sup>  |
|       | SA+Cd | 13.57±0.86 <sup>b</sup> | 3.73±0.21 <sup>a</sup> | 33.74±0.56 <sup>a</sup>  |

统计分析是在品种内进行的。同列数值旁不同字母表示差异达5%显著水平, 下图表同此。

表2 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of exogenous SA on chlorophyll content of melon seedlings under cadmium stress

| 品种    | 处理    | 叶绿素a/mg·g <sup>-1</sup> (FW) | 叶绿素b/mg·g <sup>-1</sup> (FW) | 叶绿素a+b/mg·g <sup>-1</sup> (FW) | 类胡萝卜素/mg·g <sup>-1</sup> (FW) |
|-------|-------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| ‘哈密绿’ | CK    | 10.27±0.64 <sup>ab</sup>     | 4.25±0.15 <sup>a</sup>       | 14.52±0.61 <sup>ab</sup>       | 2.61±0.26 <sup>ab</sup>       |
|       | SA    | 11.28±1.06 <sup>a</sup>      | 4.57±0.44 <sup>a</sup>       | 15.85±0.89 <sup>a</sup>        | 2.95±0.26 <sup>a</sup>        |
|       | Cd    | 4.63±0.41 <sup>c</sup>       | 2.40±0.15 <sup>b</sup>       | 7.04±0.24 <sup>c</sup>         | 1.69±0.09 <sup>c</sup>        |
|       | SA+Cd | 8.78±0.32 <sup>b</sup>       | 3.57±0.35 <sup>a</sup>       | 12.36±0.57 <sup>b</sup>        | 2.17±0.17 <sup>bc</sup>       |
| ‘秀绿’  | CK    | 10.88±1.06 <sup>a</sup>      | 4.37±0.36 <sup>a</sup>       | 15.25±1.00 <sup>a</sup>        | 2.97±0.27 <sup>a</sup>        |
|       | SA    | 10.94±1.02 <sup>a</sup>      | 4.46±0.44 <sup>a</sup>       | 15.40±1.16 <sup>a</sup>        | 2.81±0.29 <sup>a</sup>        |
|       | Cd    | 4.26±0.33 <sup>b</sup>       | 2.05±0.17 <sup>b</sup>       | 6.31±0.11 <sup>b</sup>         | 1.81±0.15 <sup>b</sup>        |
|       | SA+Cd | 9.00±0.68 <sup>ab</sup>      | 3.13±0.30 <sup>a</sup>       | 12.13±0.09 <sup>a</sup>        | 2.49±0.12 <sup>ab</sup>       |

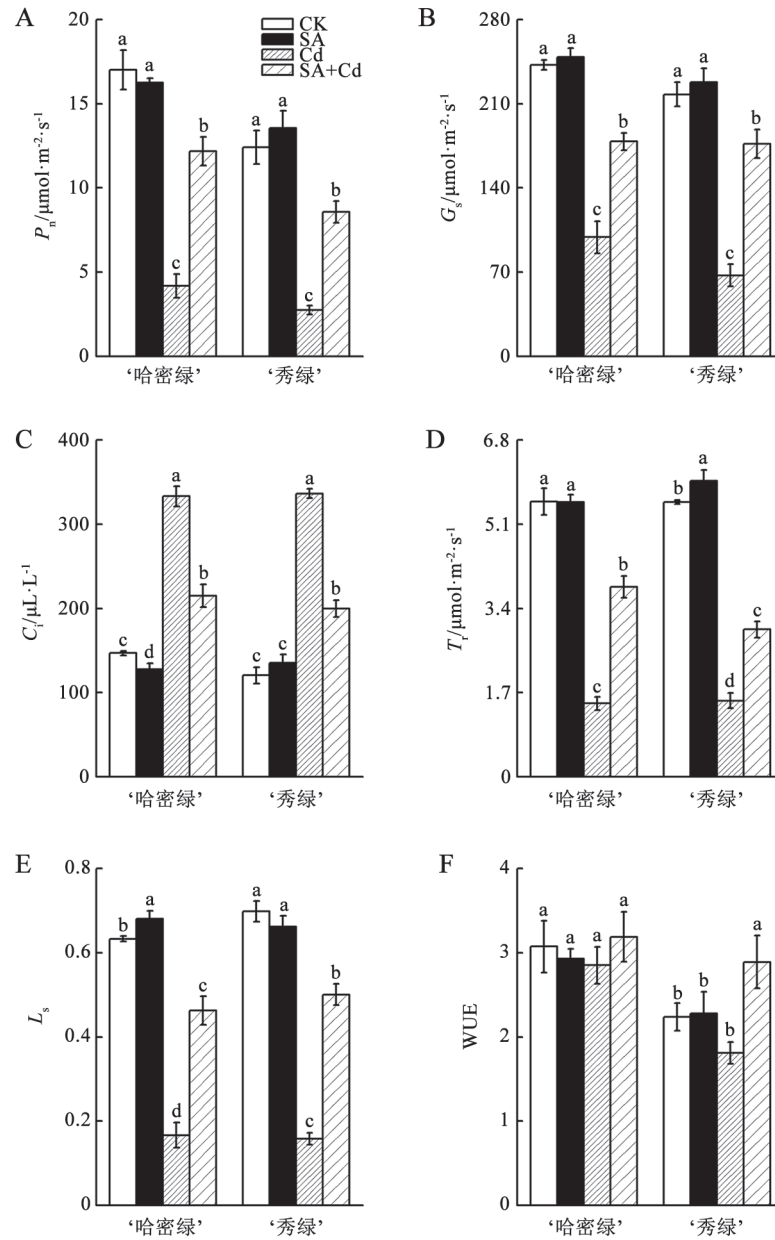


图1 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗光合作用的影响

Fig.1 Effects of exogenous SA on photosynthesis of melon seedlings under cadmium stress

显高于CK、SA和Cd处理(图1-F)。由此可见, Cd胁迫抑制了甜瓜幼苗光合作用, SA处理不同程度的提高了甜瓜幼苗 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 和 $L_s$ , 并降低了 $C_i$ , 且对镉敏感品种作用效果大于耐镉品种。

#### 4 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

从图2可以看出, Cd处理导致两个甜瓜品种幼苗的SOD、POD、CAT和APX活性均显著高于CK。与CK相比, '哈密绿'幼苗的SOD、POD、

CAT和APX活性分别升高了94.81%、199.38%、127.64%和99.24%, '秀绿'分别升高了17.22%、77.47%、116.35%和67.60%, '秀绿'升高幅度低于'哈密绿'; 与Cd处理相比, SA+Cd处理均提高了两个甜瓜品种幼苗的SOD、POD、CAT和APX活性, '哈密绿'分别升高了21.93%、34.30%、14.32%和19.22%, '秀绿'分别升高了54.90%、45.85%、111.66%和39.25%, '秀绿'比'哈密绿'升高幅度大。在相同处理条件下, 耐镉品种'哈密绿'幼苗的

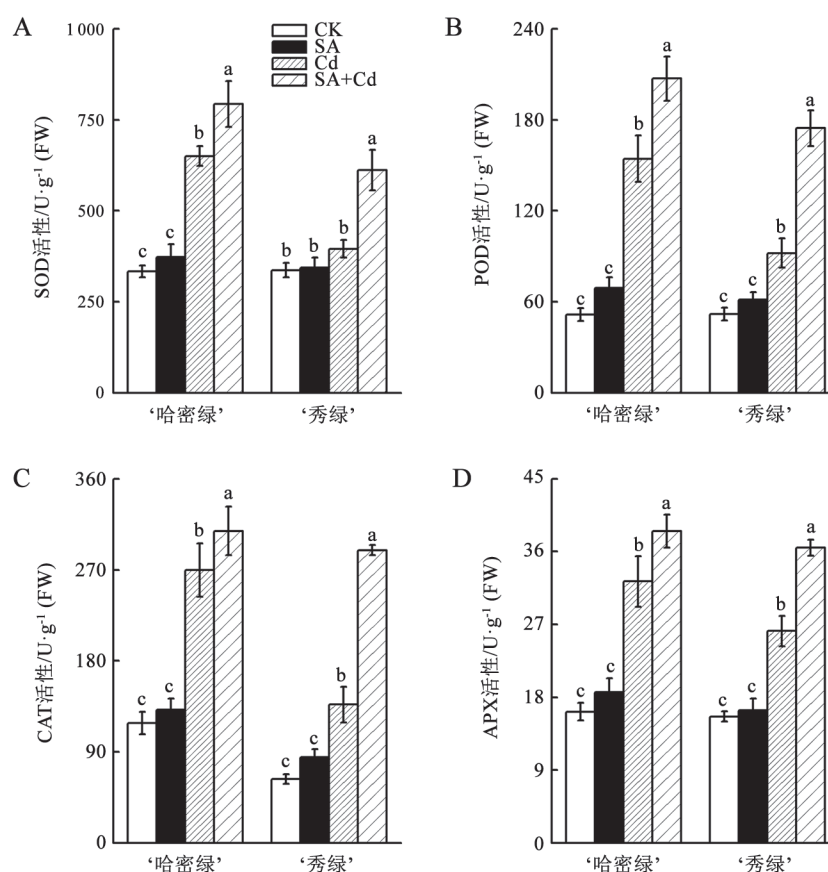


图2 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Effects of exogenous SA on antioxidant enzyme activities of melon seedlings under cadmium stress

SOD、POD、CAT和APX活性均比镉敏感品种‘秀绿’要高。从以上结论可以看出, SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗抗氧化酶活性的提高有促进作用, 从而增强植株的抗逆能力。

### 5 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗可溶性蛋白、脯氨酸、MDA含量和O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率的影响

图3-A表明, 与CK相比, Cd处理使‘哈密绿’可溶性蛋白含量升高, 而‘秀绿’含量降低, ‘哈密绿’升高了39.77%, ‘秀绿’降低了40.28%; 与Cd处理相比, SA+Cd处理均提高了两个甜瓜品种的可溶性蛋白含量。由图3-B可知, Cd处理下, 两个甜瓜品种幼苗脯氨酸含量显著高于CK, ‘哈密绿’和‘秀绿’脯氨酸含量分别升高了120.54%和206.53%; 与Cd处理相比, SA+Cd处理的脯氨酸含量显著增加, ‘哈密绿’和‘秀绿’分别增加了27.03%和32.24%, ‘秀绿’升高幅度大于‘哈密绿’; SA单独处理时, ‘哈密绿’和‘秀绿’幼苗的脯氨酸含量与CK差异不显著。如图3-C和D所示, Cd处理使两个甜瓜品种幼苗MDA含

量和O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率均显著高于CK, ‘哈密绿’分别升高了97.03%和63.74%, ‘秀绿’分别升高了119.40%和121.30%, ‘秀绿’的MDA含量和O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率升高幅度显著大于‘哈密绿’; 与Cd处理相比, SA+Cd处理显著降低了两个甜瓜品种幼苗MDA含量和O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率, 且‘秀绿’的降低幅度大于‘哈密绿’。以上结论表明, SA处理能有效缓解由Cd胁迫引起的膜脂过氧化伤害, 降低细胞膜的受损程度, 提高幼苗抗Cd胁迫的能力。

## 讨论

Cd胁迫对植物的光合及生长有抑制作用。本试验中甜瓜幼苗在Cd胁迫下叶绿素含量显著降低, 可能是由于Cd胁迫引起活性氧积累发生氧化破坏, 加速了这些色素的降解, 生长受到严重抑制。喷施SA后, 甜瓜叶绿素含量、株高、茎粗和叶片面积显著提高, 表明外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗的生长和叶绿素合成具有促进效应, 与SA能调控植

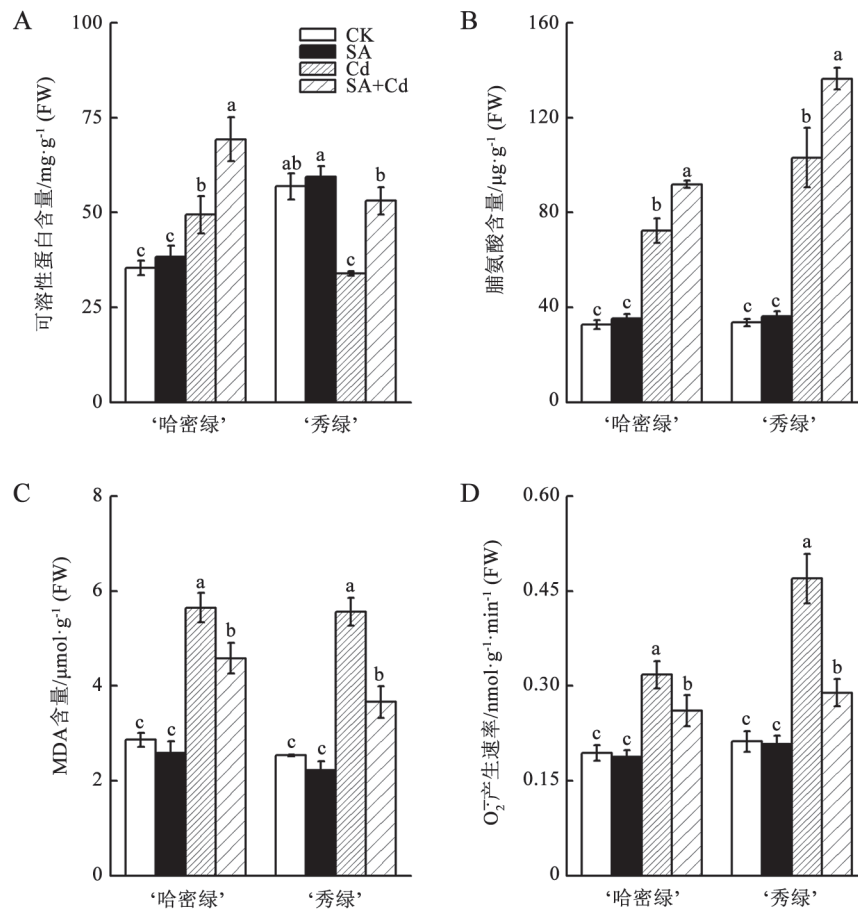


图3 外源SA对Cd胁迫下甜瓜幼苗叶片可溶性蛋白、脯氨酸、丙二醛以及O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率的影响

Fig.3 Effects of SA on soluble protein, proline, MDA contents and O<sub>2</sub><sup>-</sup> producing rate of melon seedlings under cadmium stress

物组织内的氮代谢和光合功能有关(Shi等2006),与李彩霞等(2006)和Krantev等(2008)研究结果相一致,进一步证实了SA在诱导作物抗逆性上的积极作用。

光合作用是作物生长的基础,是植物赖以生长和生物量递增所必需的重要生理过程,它的强弱对于植物生长、产量及其抗逆性都具有十分重要的影响,因而可以作为判断植物生长和抗逆性大小的指标。已有众多学者研究发现Cd胁迫对植物光合作用产生一定的抑制作用(谷巍等2002;张杰等2005)。本结果表明,Cd胁迫下,甜瓜幼苗 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $L_s$ 均较CK显著降低,而 $C_i$ 较CK显著增大,根据前人的观点可以认为Cd胁迫下 $P_n$ 的下降是非气孔因素造成的,这与在黑麦草(*Lolium perenne* L.)、玉米(*Zea mays* L.)上的研究结果相一致(刘建新等2009;张磊等2008)。SA+Cd处理的 $P_n$ 、 $G_s$ 和 $L_s$ 明显高于Cd处理,说明SA对Cd诱导的光合活性下降

具有缓解作用,能够提高Cd胁迫下叶肉细胞的光合能力。与Cd处理相比,SA+Cd处理的两个甜瓜品种 $T_r$ 显著升高,镉敏感品种‘秀绿’WUE显著升高,而耐镉品种‘哈密绿’差异不显著,表明施用SA促进植物具有较高的水分利用率,且对镉敏感品种作用大于耐镉品种。众所周知,光合作用是植物生物产量的主要决定因素之一,Cd胁迫使甜瓜幼苗光合作用下降,导致植株生长减慢,而SA能有效促进甜瓜幼苗在Cd胁迫下的光合作用,从而促进植株生物产量的增加。

SOD、POD、CAT和APX等抗氧化酶类在植物体内具有协同作用,在胁迫条件下清除过量的活性氧,维持活性氧代谢的平衡,保护膜结构,从而使植物在一定程度上忍耐、减轻或抵御胁迫伤害(Liang等2003)。本试验对耐镉性不同的两个甜瓜品种的研究结果表明,与CK相比,Cd胁迫下两个甜瓜品种SOD、POD、CAT和APX显著升高,且

耐镉品种升高幅度大于镉敏感品种,这与史静等(2013)对耐性不同的两个水稻品种体内几种抗氧化酶在Cd胁迫下的研究结果一致。SA处理可不同程度的提高Cd胁迫下甜瓜幼苗SOD、POD、CAT和APX的活性,有利于及时清除自由基,减少膜脂过氧化产物MDA的生成,保护膜的结构和功能的完整,且镉敏感品种抗氧化酶活性升高的幅度大于耐镉品种。

逆境诱导植物基因表达发生改变,正常蛋白合成受阻,逆境蛋白被诱导合成(贺志理和王洪春1991)。Cd胁迫诱导可溶性蛋白含量增加,可能是植物抵抗镉毒害的一种解毒机制(吴桂容和严重玲2006)。本试验结果表明,与CK相比,Cd胁迫下耐镉品种可溶性蛋白含量升高,镉敏感品种降低,说明Cd处理促进了耐镉品种细胞蛋白质的合成代谢,诱导合成更多可溶性蛋白,参与渗透调节,提高其抗逆性。SA处理均提高了Cd胁迫下两个甜瓜品种的可溶性蛋白含量,表明SA能促进Cd胁迫下甜瓜幼苗叶片内的蛋白合成,维持植株的水分运输和叶片光合功能,从而促进植株生长并提高其耐镉性。积累游离脯氨酸是植物在逆境条件下的普遍反应,但在其抗逆性方面仍存在争议,一些研究认为游离脯氨酸含量的增加能调控植物渗透势,提高植株的耐性,也有人认为,植物体内脯氨酸的积累是反映植物所受胁迫强弱的指标(陈成升等2009; Wang等2007)。本试验中,Cd处理显著促进了甜瓜幼苗叶片中脯氨酸的积累,这与李清飞和仇荣亮(2012)及姜永雷等(2013)研究结果一致。SA处理的两个甜瓜幼苗在Cd胁迫下其脯氨酸含量显著增加,脯氨酸能维持细胞的结构和调节渗透压,使植物具有一定的抗性。本试验结果较好的反映了SA可缓解Cd对甜瓜幼苗造成的伤害。丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化的主要产物,过量积累将严重抑制植物的正常生长发育,其含量直接反映了细胞膜结构的损伤程度(Parida和Jha 2010)。活性氧( $O_2^-$ )水平的提高可以诱发脂质过氧化链式反应,从而导致细胞膜的完整性遭受破坏。王芳等(2013)研究认为,镉与植物膜脂过氧化及体内活性氧清除酶系统有密切关系。本研究中,与CK相比,Cd胁迫下MDA的含量和 $O_2^-$ 产生速率显著增加,说明在Cd胁迫下,细胞膜脂过氧化严重,植株的正

常代谢受到影响。在SA处理下,MDA含量和 $O_2^-$ 产生速率显著降低,说明SA对植物细胞膜具有良好的保护或修复作用,其原因可能是SA可以减少植物对镉的吸收,从而减轻镉胁迫对植物造成的伤害。

综上所述,Cd胁迫抑制了甜瓜幼苗的生长,SA处理提高了甜瓜幼苗叶片中叶绿素含量,和光合作用,同时提高了SOD、POD、CAT和APX活性,有效的清除活性氧,降低了膜质过氧化伤害,从而缓解了Cd胁迫对植株的伤害作用,促进植株生长。

### 参考文献

- 曹会聪,王金达,任慧敏,赵卫,张学林(2007). 土壤镉暴露对玉米和大豆的生态毒性评估. 环境科学学报, 27 (2): 298~303
- 陈成升,谢志霞,刘小京(2009). 早盐互作对冬小麦幼苗生长及其抗逆生理特性的影响. 应用生态学报, 20 (4): 811~816
- 丁佳红,薛正莲,杨超英(2013). 水杨酸对铜胁迫下水稻幼苗膜脂过氧化作用的影响. 黑龙江农业科学, (1): 14~18
- 谷巍,施国新,张超英,王文,徐勤松,徐楠,曾晓敏,张小兰,周红卫(2002).  $Hg^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 和 $Cu^{2+}$ 对菹草光合系统及保护酶系统的毒害作用. 植物生理与分子生物学学报, 28 (1): 69~74
- 贺志理,王洪春(1991). 盐胁迫下苜蓿中盐蛋白的诱导产生. 植物生理学报, 17 (1): 71~79
- 黄丽华,陆凤秀(2009). 水杨酸对铜胁迫下玉米幼苗生理特性的影响. 种子, 28 (3): 90~93
- 姜永雷,鲁红鼎,邓莉兰,黄晓霞(2013). 镉胁迫对滇润楠幼苗生理特性的影响. 江西农业大学学报, 35 (4): 769~775
- 李彩霞,李鹏,苏永发,郑普勤,张芬琴,张勇(2006). 水杨酸对镉胁迫下玉米幼苗质膜透性和保护酶活性的影响. 植物生理学通讯, 42 (5): 882~884
- 李合生(2000). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 167~169
- 李清飞,仇荣亮(2012). 麻疯树对镉胁迫的生理耐性及富集特征研究. 农业环境科学学报, 31 (1): 42~47
- 李伟,黄金丽,眭晓蕾,王绍辉,关秋竹,周明,胡丽萍,张振贤(2008). 黄瓜幼苗光合及荧光特性对弱光的响应. 园艺学报, 35 (1): 119~122
- 刘建新,胡浩斌,王鑫(2009). 外源一氧化氮供体对镉胁迫下黑麦草幼苗活性氧代谢、光合作用和叶黄素循环的影响. 环境科学学报, 29 (3): 626~633
- 刘楠良,石新生,潘运智,丁继军,何杨,王力(2013). 镉胁迫对长春花生长、生物量及养分积累与分配的影响. 草业学报, 22 (3): 154~161
- 马学文,翁焕新,章金俊(2011). 中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化. 中国环境科学, 31 (8): 1306~1313
- 史静,潘根兴,夏运生,张仕颖,张乃明(2013). 镉胁迫对两品种水稻生长及抗氧化酶系统的影响. 生态环境学报, 22 (5): 832~837
- 王爱国,罗广华(1990). 植物的超氧物自由基与羟胺反应的定量关系. 植物生理学通讯, 6: 55~57
- 王芳,常盼盼,陈永平,彭云玲,方永丰,王汉宁(2013). 外源NO对镉胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响. 草业学报, 22 (2): 178~186

- 王加蓬, 蔡焕杰, 王健, 陈新明(2009). 温室膜下滴灌甜瓜初花期叶面积动态变化与增长模型研究. 节水灌溉, (1): 27~30
- 王霞霞(2004). 土壤干旱对不同生态型甜瓜(*Cucumis melo* L.)生理生化特性及生长发育的影响[学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 12
- 吴桂容, 严重玲(2006). 镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响. 生态环境, 15 (5): 1003~1008
- 夏瑾华, 叶利民, 俞晓凤(2012). 水杨酸对小白菜抗铅胁迫的诱导. 亚热带植物科学, 41 (1): 36~38
- 张殿忠, 汪沛洪, 赵会贤(1990). 测定小麦叶片游离脯氨酸含量的方法. 植物生理学通讯, (4): 62~65
- 张杰, 梁永超, 娄运生, 华海霞(2005). 镉胁迫对两个水稻品种幼苗光合参数、可溶性糖和植株生长的影响. 植物营养与肥料学报, 11 (6): 774~780
- 张磊, 于燕玲, 张磊(2008). 外源镉胁迫对玉米幼苗光合特性的影响. 华北农学报, 23 (1): 101~104
- Clememte R, Walker DJ, Roig A, Bernal MP (2003). Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at Aznalcóllar (Spain). Biodegradation, 14: 199~205
- Dhindsa RS, Plumb P, Thorpe TA (1981). Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. J Exp Bot, 32 (1): 93~101
- Heath RL, Packer L (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Arch Biochem Biophys, 125 (1): 189~198
- Kochba J, Lavee S, Soiegel P (1977). Differences in peroxidase activity and isoenzymes in embryogenic and non-embryogenic 'Shamouti' orange ovular callus lines. Plant Cell Physiol, 18 (2): 463~467
- Krantev A, Yordanova R, Janda T, Szalai G, Popova L (2008). Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. J Plant Physiol, 165 (9): 920~931
- Liang YC, Chen Q, Liu Q, Zhang WH, Ding RX (2003). Exogenous silicon (Si) increase antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). J Plant Physiol, 160 (10): 1157~1164
- Milone MT, Sgherri C, Clijsters H, Navari-Izzo F (2003). Antioxidative responses of wheat treated with realistic concentration of cadmium. Environ Exp Bot, 50 (3): 265~276
- Nakano Y, Asada K (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiol, 22 (5): 867~880
- Parida AK, Jha B (2010). Antioxidative defence potential to salinity in the euhalophyte *Salicornia brachiata*. J Plant Growth Regul, 29: 137~148
- Shi QH, Bao ZY, Zhu ZJ, Ying QS, Qian QQ (2006). Effects of different treatments of salicylic acid on heat tolerance, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzyme activity in seedlings of *Cucumis sativa* L.. Plant Growth Regul, 48: 127~135
- Wang XZ, Wang H, Wu FZ, Liu B (2007). Effects of cinnamic acid on the physiological characteristics of cucumber seedlings under salt stress. Front Agric China, 1 (1): 58~61
- Wu FZ, Yang WQ, Zhang J, Zhou LQ (2010). Cadmium accumulation and growth responses of a poplar (*Populus deltoids* × *Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil. J Hazard Mater, 177: 268~273