

不同基因型番茄幼苗对镉胁迫的生理响应及镉吸收差异

张 微¹, 吕金印², 柳 玲²

(1.西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学生命科学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:采用盆栽试验,通过研究不同浓度镉(1、5、10 mg·kg⁻¹)胁迫下 4 种基因型番茄圣粉 1 号、东圣 1 号、农城 906 和宝冠 1 号幼苗地上部及根部生物量、镉吸收量、活性氧含量(ROS)及其他生理指标,筛选出镉低积累基因型番茄品种。结果表明,不同基因型番茄对镉胁迫响应存在差异。随镉处理浓度增加,4 个品种番茄幼苗地上部生物量显著下降($P<0.05$)。地上部 Cd 吸收量呈增加趋势,在中浓度(5 mg·kg⁻¹)镉处理下达到峰值,品种间为宝冠 1 号>圣粉 1 号、农城 906>东圣 1 号。4 个品种番茄幼苗 Cd 转移率随镉处理浓度增加显著降低,其中东圣 1 号 Cd 转移率较低,根部 Cd 滞留较多,向地上部转移较少。4 个品种番茄幼苗生理活性存在差异,宝冠 1 号番茄幼苗 ROS 含量及抗氧化酶(POD, CAT)活性随镉处理浓度增加变化幅度较大,东圣 1 号变化幅度相对较小。综合各项指标,4 个基因型番茄中东圣 1 号为镉低积累品种。

关键词:番茄; Cd 吸收量; Cd 转移率

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)06-1065-07

Different of Cadmium Absorption and Physiological Responses of Different Varieties of Tomatoes to Cadmium Stress

ZHANG Wei¹, LV Jin-yin², LIU Ling²

(1.College of Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to screen out and to identify tomatoes varieties with low cadmium enrichment. The biomass, the Cd absorption, the content of ROS and other physiological characteristics of four tomato varieties Shengfen 1, Dongsheng 1, Nongcheng 906 and Baoguan 1 grown in Cd spiked soil were studied. The results showed that for all varieties, the upper part of the biomass was decreased($P<0.05$) and Cd absorption was increased with the increasing concentrations of soil Cd²⁺. However, the Cd absorption was different among four varieties, in 5 mg·kg⁻¹Cd²⁺ concentration, the Cd enrichment of all varieties was ranked Baoguan 1, Shengfen 1, Nongcheng 906 and Dongsheng 1. The translocation factor(TF) of four tomatoes was dropped with Cd content increasing, and TF of Dongsheng 1 was the lowest among varieties because Cd absorption of root was bigger than upper part. Under Cd stress, the physiological activity of four genotype tomatoes were also different. The content of ROS and the activities of antioxidant enzymes(POD, CAT) changed obviously of Baoguan1 with Cd content increasing, but the variation of Dongsheng1 was relatively small among four tomatoes. From the above we could easily conclude that Dongsheng 1 was low-accumulation of cadmium tomato.

Keywords: tomato; Cd absorption; Cd translocation factor

近年来,由于农药、化肥不合理施用及工业废物排放量的增加,造成农田土壤中重金属镉(Cd)含量升高。在全国第二次污灌普查中,Cd 污染面积达重金属污染超标土壤面积的 59.6%^[1]。通过对我国不同地

区蔬菜地土壤重金属含量研究表明,Cd 超标率达 24.7%(按 GB 15618—1995),Cd、Hg、Zn 等是华东及华中蔬菜地土壤主要污染元素,西北地区部分菜区土壤 Cd 含量也超出国家 II 级标准,各地区蔬菜中 Cd 含量均有不同程度超出国家食品标准(按 GB 18406.1—2001)^[2]。Cd 具有较高的生物有效性,易在蔬菜中累积,威胁人类健康^[3-4]。因此,筛选 Cd 低积累蔬菜品种显得较为重要和迫切。随着现代农业产业结构的调整,我国蔬菜种植面积 53.3 万 hm² 中的一半

收稿日期:2009-11-13

基金项目:农业部农业公益性行业科研专项“核技术农业应用”(200803034)

作者简介:张 微(1985—),女,吉林磐石人,在读硕士生,主要从事植物微量元素吸收代谢机理研究。E-mail:zw8519@126.com

通讯作者:吕金印 E-mail:Jinyinlu@163.com

已为设施蔬菜(2003)^[5]。多年连作和化肥、农药等化学制剂大量施用,使设施大棚土壤中 Cd 含量逐年增加。已有研究表明,不同基因型小白菜^[6]、菠菜^[7]、甘蓝^[8]、莴苣^[7]及四季豆^[7]等蔬菜对镉吸收存在较大差异,其他种类蔬菜对镉吸收也可能存在差异,可作为筛选镉低积累蔬菜品种的依据。番茄(*Lycopersicon esculentu*)为我国反季节温室大宗蔬菜,品种较多,为筛选低积累番茄品种奠定了基础。本研究采用西北地区大面积种植的 4 个基因型温室番茄品种,测定不同浓度镉处理下不同基因型番茄幼苗植株生物量及对 Cd 吸收量的变化,比较不同基因型番茄 Cd 吸收差异,为镉低积累番茄品种筛选及蔬菜无害化栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试番茄品种为东圣 1 号、农城 906、圣粉 1 号及宝冠 1 号,购自西北农林科技大学农星种子站,盆土为大田耕层(0~20 cm)土垫旱耕人为土,土壤基础养分及 Cd 含量如表 1。

表 1 盆栽供试土壤基础养分及镉含量

Table 1 Basic nutrition and Cd content of the potted soil

pH (H ₂ O)	有机质/ %	速效氮/ mg·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹	总镉/ mg·kg ⁻¹
8.02	1.12	86.93	39.13	81.54	1.71	0.13

1.2 镉处理方法

盆栽试验于 2009 年 2 月在西北农林科技大学生命学院光合培养室进行。选取籽粒饱满的番茄种子,55℃温水消毒 15 min,播入 10 cm×20 cm 育苗槽中,光合培养室育苗。培养室昼/夜温度为(27±3)/(21±3)℃;湿度为(65±5)%;昼/夜光照为 14/10 h;光强 150 μmol·m⁻²·s⁻¹。每 2 d 浇水 1 次,每 5 d 浇灌营养液。营养液组成为:Ca(NO₃)₂ 5 mmol·L⁻¹、KNO₃ 5 mmol·L⁻¹、KH₂PO₄ 1 mmol·L⁻¹、MgSO₄ 2 mmol·L⁻¹、H₃BO₃ 29.6 μmol·L⁻¹、MnSO₄ 10 μmol·L⁻¹、Fe-EDTA 50 μmol·L⁻¹、ZnSO₄ 1.0 μmol·L⁻¹、H₂MoO₄ 0.05 μmol·L⁻¹、CuSO₄ 0.95 μmol·L⁻¹。

培养 15 d 后将番茄幼苗移入直径 20 cm,高 15 cm 装土 1.2 kg 的营养钵中,1 株·钵⁻¹。幼苗培养期间定期浇水及追肥,保证幼苗正常生长,移栽 40 d 后采用 3CdSO₄·8H₂O 溶液(pH6.5)浇灌处理,使每钵土中 Cd²⁺浓度达到 0、1、5、10 mg·kg⁻¹,处理 10 d 后采样,测

定番茄幼苗生理指标及 Cd 含量。各处理设 10 个重复。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤基础养分测定

土壤 pH 测定采用电位法(水:土=2.5:1);有机质含量测定采用重铬酸钾滴定法;速效氮含量测定采用 0.01 mol·L⁻¹ NaCl 浸提、酚二磺酸比色法;速效磷含量测定采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提、钼锑抗比色法;速效钾含量测定采用 1.0 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提、火焰光度法;全磷含量测定采用 NaOH 熔融、钼锑抗试剂比色法;总镉含量测定采用 HNO₃-HClO₄ 联合消化、原子吸收分光光度计测定。

1.3.2 叶片叶绿素含量测定

采用 80%丙酮浸提、分光光度法。

1.3.3 丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)含量测定

参照孙群等方法^[9-10]。

1.3.4 过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性测定

酶液提取:称取番茄叶片 1.0 g,加入磷酸缓冲液(pH7.5),冰浴研磨 4℃下离心(4 000 r·min⁻¹)15 min,上清液即为 SOD、CAT 粗酶提取液,反复浸提 2 次后合并上清液,定容 50 mL。称番茄叶片 1.0 g,蒸馏水冰浴研磨,上清液为 POD 粗酶提取液,定容 50 mL。CAT 活性采用紫外分光光度法,SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)比色法,POD 活性采用愈创木酚比色法^[9-10]。

1.3.5 过氧化氢(H₂O₂)、超氧阴离子(O₂⁻)含量测定

过氧化氢(H₂O₂)含量采用预冷丙酮提取,4℃离心,弃沉淀,上清液加入 5%硫酸钛和浓氨水,离心去除上清液,丙酮清洗沉淀 4~5 次,加入 2 mol 硫酸定容,415 nm 比色法测定;超氧阴离子(O₂⁻)含量采用磷酸缓冲液(pH7.8)提取上清液,对氨基苯磺酸显色,530 nm 比色法测定^[11]。

1.3.6 镉含量测定

将镉处理番茄植株分为根、地上两部分,为保证根的完整性,采样前对处理营养钵浇水浸泡,自来水淋洗,取出根系。自来水浸泡 10 h,除去根系表面 Cd 离子。离子水冲洗,吸干水分,105℃杀青 15 min,70℃烘干至恒重,磨碎混匀,采用 HNO₃-HClO₄(4:1,V/V)混合酸在 220℃沙浴消化,Perkin Elmer AA180-80 型号火焰原子吸收分光光度计测定 Cd 含量^[12-13]。

1.3.7 Cd 转移率(translocation factors)计算方法

参照 Wu F Y 等重金属转移率(translocation factors)计算不同基因型番茄对 Cd 吸收转移率^[14]。

Cd 转移率 (TF)= 植株地上部 Cd 含量/根中 Cd 含量

转移率增大,表明地上部分积累高于根部,Cd 向地上部转移较多;转移率下降,表明根部积累高于地上部分,Cd 向地上部转移较少。

1.4 数据统计

本研究各项指标测定均设 3 个重复,结果以平均值±标准差表示,采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 镉处理对番茄幼苗生物量的影响

地上部和根系生物量变化可作为植物对重金属耐性指标。本研究中随着镉处理浓度增加,4 个番茄品种地上部生物量及圣粉 1 号、农城 906 和宝冠 1 号根生物量显著下降($P<0.05$),而东圣 1 号根生物量无显著差异($P>0.05$)(表 2)。高浓度($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)镉处理下,圣粉 1 号、东圣 1 号、农城 906 和宝冠 1 号 4 个品种地上部生物量分别比对照降低了 53.2%、36.8%、68.3%和 54.4%,根生物量分别比对照降低了 58.8%、16.6%、67.6%和 53.1%,其中东圣 1 号地上部及根部生物量下降幅度较小,农城 906 下降幅度相对较大。

2.2 镉处理下番茄幼苗对 Cd 吸收量的影响

4 个基因型番茄地上部对 Cd 吸收量随镉处理浓度增加先升后降,根部则显著增加($P<0.05$)(表 3)。

在中浓度($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)镉处理下地上部 Cd 吸收量最大,其中圣粉 1 号和农城 906 分别是对照的 2.6 倍和 2.3 倍,东圣 1 号及宝冠 1 号品种分别比对照增加了 33.3%和 43.7%。而高浓度($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)镉处理下 4 个品种地上部 Cd 吸收量均下降,尤其是圣粉 1 号和农城 906 下降幅度相对较大(58.1%、62.9%)。对于高浓度($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)镉处理,根系 Cd 吸收量增加,地上部减小,可能是由于镉对地上部伤害大于根部。同时表明植物根部是 Cd 主要积累器官。4 个品种相比,东圣 1 号地上部及根部 Cd 吸收量相对较低,其他 3 个品种相对较高。

2.3 镉处理对番茄幼苗 Cd 转移率的影响

转移率(TF)是反映植株富集重金属能力的指标之一^[15]。由图 1 可以看出,随着 Cd^{2+} 处理浓度增加,4 个基因型番茄 Cd 转移率显著降低($P<0.05$)。在低、中浓度($1, 5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)镉处理下,东圣 1 号 Cd 转移率低于圣粉 1 号、农城 906 和宝冠 1 号,宝冠 1 号 Cd 转移率明显高于其他 3 个基因型番茄,表明东圣 1 号品种根部滞留 Cd 较多,向地上部转运较少,宝冠 1 号根部 Cd 向地上部转移较多。

2.4 镉处理对番茄幼苗叶片叶绿素含量的影响

植物叶绿体是易受重金属及逆境伤害的细胞器,Cd 通过抑制叶绿体色素生物合成及光合电子传递而影响叶绿体的正常功能^[16]。随着镉处理浓度增加,4 个

表 2 不同浓度镉处理对番茄幼苗生物量的影响

Table 2 Effect of different concentrations of cadmium on biomass of tomato seedlings

镉浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	圣粉 1 号/ $\text{g}\cdot 10\text{ 株}^{-1}$		东圣 1 号/ $\text{g}\cdot 10\text{ 株}^{-1}$		农城 906/ $\text{g}\cdot 10\text{ 株}^{-1}$		宝冠 1 号/ $\text{g}\cdot 10\text{ 株}^{-1}$	
	地上部分	根部	地上部分	根部	地上部分	根部	地上部分	根部
CK	4.66±0.50a	0.17±0.02b	4.65±0.27a	0.12±0.02a	5.99±0.24a	0.34±0.02a	5.70±0.63a	0.32±0.07a
1	3.39±0.23b	0.14±0.02b	4.52±0.20a	0.19±0.05a	3.81±0.17b	0.26±0.02b	4.16±0.35b	0.27±0.05ab
5	2.87±0.07b	0.12±0.10b	3.48±0.21b	0.11±0.02a	2.88±0.05c	0.19±0.03c	3.36±0.15bc	0.21±0.10bc
10	2.18±0.19c	0.07±0.06a	2.93±0.03b	0.10±0.03a	1.90±0.15d	0.11±0.05d	2.60±0.08c	0.15±0.04c

注:同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性(LSD 检验, $P=0.05$)。Values with different letter in the same column indicate a significant difference at $P=0.05$ level according to LSD test.

表 3 不同浓度镉处理下番茄幼苗 Cd 吸收量变化

Table 3 Cd absorption by the seedlings of tomato grow in soil with different content of cadmium

镉浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	圣粉 1 号/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		东圣 1 号/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		农城 906/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		宝冠 1 号/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	地上部分	根部	地上部分	根部	地上部分	根部	地上部分	根部
CK	0.023±0.001b	0.032±0.003c	0.021±0.001b	0.032±0.00d	0.026±0.003c	0.028±0.002c	0.048±0.009b	0.029±0.002d
1	0.027±0.001b	0.035±0.002c	0.026±0.001b	0.041±0.004c	0.049±0.003b	0.047±0.002b	0.063±0.005a	0.042±0.002c
5	0.062±0.003a	0.071±0.002b	0.040±0.004a	0.059±0.002b	0.062±0.004a	0.071±0.002a	0.069±0.001a	0.060±0.001b
10	0.026±0.001b	0.083±0.003a	0.019±0.002c	0.071±0.004a	0.023±0.002c	0.074±0.004a	0.031±0.004c	0.073±0.004a

注:同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性(LSD 检验, $P=0.05$)。Values with different letter in the same column indicate a significant difference at $P=0.05$ level according to LSD test.

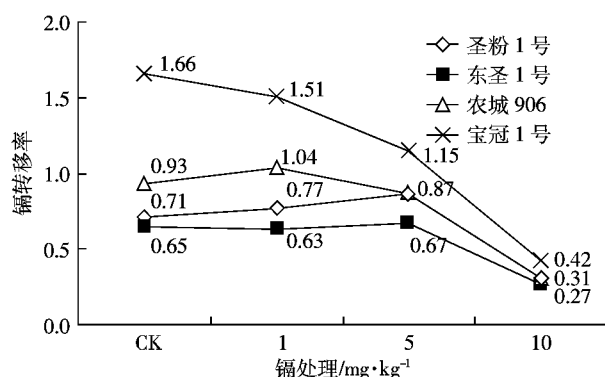


图 1 不同浓度镉处理番茄幼苗 Cd 转移率

Figure 1 Effect of Cd translocation factors on the seedlings of tomatoes under Cd²⁺ stress

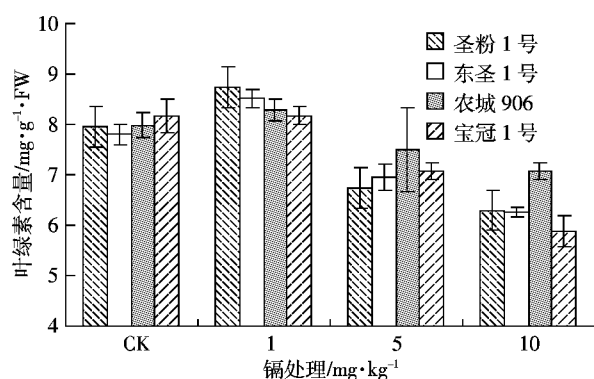


图 2 不同浓度镉处理对番茄叶片叶绿体色素含量的影响

Figure 2 Effects of chlorophyll content in leaves of tomatoes under Cd²⁺ stress

品种番茄幼苗叶片叶绿素含量显著下降($P<0.05$),其中宝冠 1 号下降幅度较大,高浓度(10 mg·kg⁻¹)镉处理下比对照降低了 30.1%(图 2)。

2.5 镉处理对番茄幼苗叶片脯氨酸及丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)作为植物在逆境下细胞膜脂过氧化程度的指标^[7],本研究中随着镉处理浓度的增加,各番茄品种 MDA 含量显著升高($P<0.05$)(图 3)。高浓度(10 mg·kg⁻¹)镉处理下宝冠 1 号幼苗叶片 MDA 含量上升幅度较大,是对照 3.1 倍,农城 906 较低,是对照的 2.5 倍。

随着镉处理浓度增加,番茄叶片游离脯氨酸(Pro)总体呈增加趋势,中浓度(5 mg·kg⁻¹)镉处理下达到峰值,其中东圣 1 号叶片 Pro 含量最高,是对照的 6.5 倍(图 4)。表明镉胁迫下东圣 1 号品种叶片具有较强的渗透调节能力。

2.6 镉处理对番茄幼苗叶片中超氧阴离子(O₂⁻)和过氧化氢(H₂O₂)含量的影响

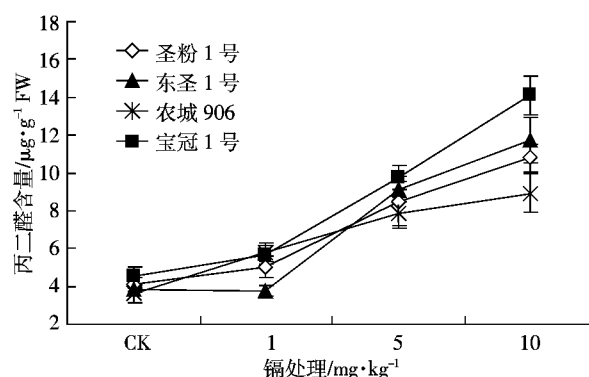


图 3 不同浓度镉处理对番茄叶片丙二醛含量的影响

Figure 3 Effect of Cd²⁺ stress on MDA content in leaves of tomato seedlings

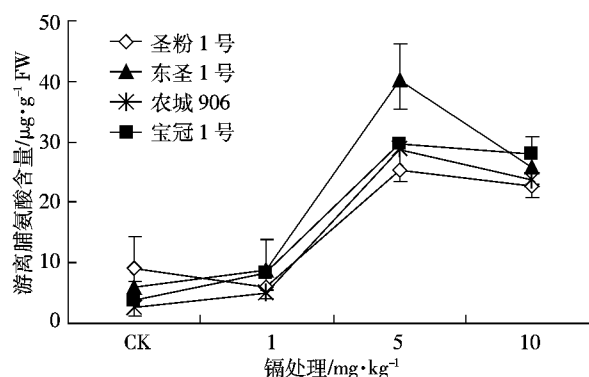


图 4 不同浓度镉处理对番茄叶片游离脯氨酸含量的影响

Figure 4 Effect of Cd²⁺ stress on Pro content in leaves of tomato seedlings

重金属胁迫会造成植物组织活性氧代谢平衡失调,细胞膜脂过氧化,影响膜的结构和功能。本研究中番茄叶片 O₂⁻产生速率及 H₂O₂ 积累量随镉处理浓度增加呈升高趋势(图 5,图 6),高浓度(10 mg·kg⁻¹)镉处理下,宝冠 1 号叶片 O₂⁻产生速率是对照的 2.4 倍, H₂O₂ 含量是对照的 2.2 倍,均高于其他 3 个品种。表

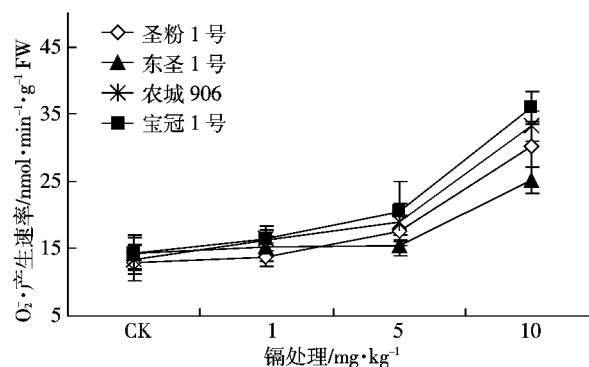
图 5 不同浓度镉处理对番茄叶片中 O₂⁻含量的影响

Figure 5 Effects of Cd²⁺ stress on O₂⁻ contents in leaves of tomato seedlings

明高浓度 Cd^{2+} 处理加速了番茄叶片细胞膜脂过氧化, 对生长发育造成一定伤害。

2.7 镉处理对番茄幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

随着 Cd^{2+} 处理浓度增加圣粉 1 号、东圣 1 号及农城 906 3 个品种番茄幼苗叶片过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性均呈增加趋势, 在中浓度($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)镉处理下达到最大值

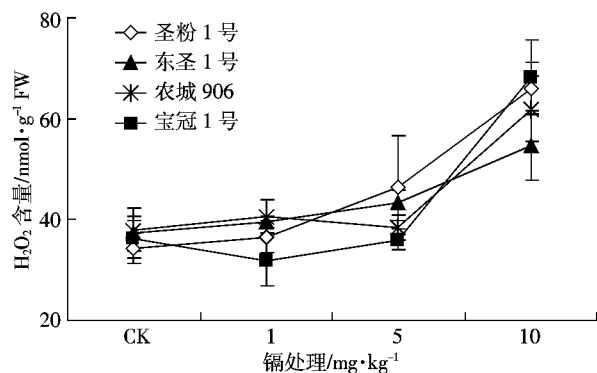


图 6 不同浓度镉处理对番茄叶片中 H_2O_2 含量的影响

Figure 6 Effect of Cd^{2+} stress on H_2O_2 contents in leaves of tomato seedlings

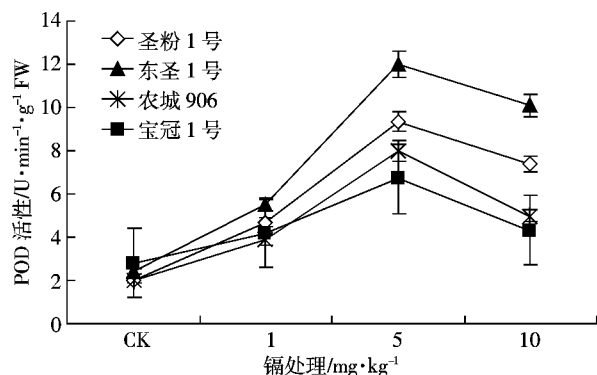


图 7 不同浓度镉处理对番茄叶片过氧化物酶活性的影响

Figure 7 Effect of Cd^{2+} stress on POD in leaves of tomato seedlings

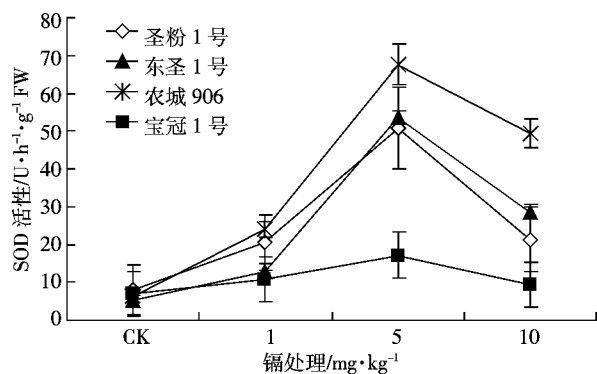


图 8 不同浓度镉处理对番茄叶片超氧化物歧化酶活性的影响

Figure 8 Effect of Cd^{2+} stress on SOD in leaves of tomato seedlings

(图 7、8、9)。不同浓度镉处理下, 东圣 1 号品种 POD 及 CAT 活性变幅较大, 农城 906 SOD 活性变幅较大。镉胁迫下番茄幼苗叶片 3 种保护酶活性的增加, 有助于活性氧清除, 是对重金属逆境的一种适应性响应。

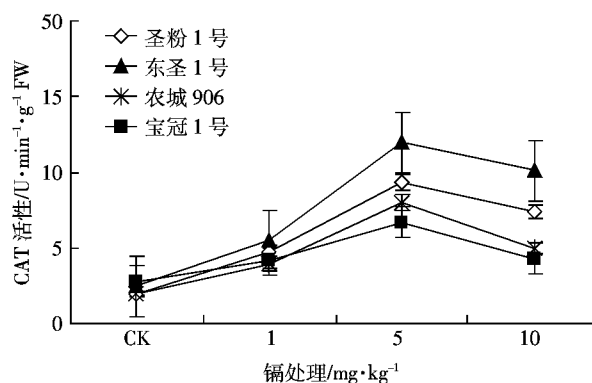


图 9 不同浓度镉处理对番茄叶片中过氧化氢酶活性的影响

Figure 9 Effect of Cd^{2+} stress on CAT in leaves of tomato seedlings

3 讨论

陈瑛等通过镉处理不同基因型小白菜, 研究指出镉低积累品种应具有以下特性: 镉含量相对值较低、对镉浓度增加有较大的抗性(其镉含量递增率低于土壤镉含量递增率)、基本不受影响的生物量^[6]。王松良等认为植株茎叶干物质是筛选重金属耐性指标之一^[18]。本研究随镉处理浓度增加, 4 个基因型番茄地上及根部生物量均降低, 其中东圣 1 号地上部及根部生物量下降幅度较小, 表明该品种生长受镉胁迫影响较小。圣粉 1 号、农城 906 及宝冠 1 号地上部及根部生物量降低幅度相对较大。土壤中高浓度镉会抑制植株正常生长, 这与前人在青菜^[19]、白菜^[19]、菠菜^[19]、甘蓝^[8]及大白菜^[20]的研究结果相符。

已有研究表明, 大豆^[21]、甘蓝^[5]、小白菜^[6]、萝卜与豌豆^[7]等品种间对 Cd 吸收存在差异, 不同品种植物的遗传特性差异决定其对重金属元素的吸收量, 可作为筛选重金属低积累品种的生理基础^[22-23]。研究表明, 随着镉处理浓度的增加, 4 个基因型番茄地上部 Cd 吸收量呈增加趋势, 中浓度($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)镉处理下达到峰值, 品种间为: 宝冠 1 号 > 圣粉 1 号 > 农城 906 > 东圣 1 号。各品种根部 Cd 吸收量随着镉处理浓度的增加逐渐升高, 高浓度处理下达到最大, 品种间为: 圣粉 1 号 > 农城 906 > 宝冠 1 号 > 东圣 1 号。虽然各番茄品种地上部及根中 Cd 含量递增率均低于土壤 Cd 含量递增率, 但对 4 个基因型番茄比较, 东圣 1 号在中、高浓度镉处理下, 植株 Cd 吸收量最低。高浓度(10

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)镉处理下 4 个基因型番茄地上部 Cd 吸收量减小,而根部吸收量增加。可能是镉对番茄幼苗地上部的毒害大于根部,生长形态表现为叶片萎蔫发黄及出现暗黄斑。另外,番茄幼苗叶片叶绿素含量下降,MDA、超氧阴离子($\text{O}_2\cdot^-$)产生速率和 H_2O_2 含量升高,3 种保护酶活性的下降,也证明高浓度镉处理对地上部细胞的损伤较大。

张燕等对大棚土壤 Cd 含量与番茄中 Cd 吸收量的生物有效性关系研究表明,蔬菜大棚土壤中 Cd 总量、有效 Cd 含量与番茄叶片 Cd 含量之间达显著正相关^[24]。本研究通过计算 4 个基因型番茄 Cd 转移率,在不同浓度镉处理下圣粉 1 号、东圣 1 号及农城 906 Cd 转移率均大于 1,说明这 3 个基因番茄植株对 Cd 吸收后主要滞留在根部,向地上部转运较少。而宝冠 1 号在低、中浓度($1.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)镉处理下 Cd 转移小于 1,表明向地上部镉转移较多。

镉胁迫下,4 个基因型番茄幼苗生理活性存在差异。高浓度($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)镉处理对宝冠 1 号生理活性影响较大。表现为叶片总叶绿素含量较低、MDA 含量最高。超氧阴离子($\text{O}_2\cdot^-$)和过氧化氢(H_2O_2)含量均高于其他品种,SOD 与 CAT 活性低于其他 3 个品种;而东圣 1 号受镉胁迫影响相对较小,POD 与 CAT 活性较高,起到很好的抗氧化调节作用,有效清除 $\text{O}_2\cdot^-$ 及 H_2O_2 产生的毒害,增强植株抗性^[17]。

不同基因型番茄对 Cd 的吸收存在较大的差异,有选择的种植重金属低积累品种对蔬菜无害化栽培具有重要的意义。综合各项指标及 Cd 转移率,本研究中 4 个基因型番茄东圣 1 号为镉低积累品种。由于本试验仅在番茄幼苗期进行镉处理,对不同基因型番茄生育后期植株对镉的胁迫响应以及果实中 Cd 的累积量差异有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨肖娥,李廷强.我国农业环境质量和农产品污染剖析[J].中国食物营养,2003(10):22-24.
- [2] Zeng X B, Li L F, Mei X R. Heavy metal content in Chinese vegetable plantation land soils and related source analysis[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(9):1115-1126.
- [3] 张金彪,黄维南.镉胁迫对草莓光合的影响[J].应用生态学报,2007,18(7):1673-1676.
- [4] 唐秀梅,龚春风,刘 鹏.镉胁迫下龙葵叶中三种抗氧化酶的活性和抗坏血酸含量的变化[J].植物生理学通讯,2008,44(6):1135-1136.
- [5] TANG Xiu-mei, GONG Chun-feng, LIU Peng. Variations of three antioxidant enzymes activities and AsA content in leaves of *Solanum nigrum* L. under cadmium stress[J]. *J Comm Plant Phys*, 2008, 44(6):1135-1136.
- [6] Zhao H L, Li H J, Xiao L L, et al. Effect of N and K fertilizers on yield and quality of greenhouse vegetable crops[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4):496-502.
- [7] 陈 瑛,李廷强,杨肖娥,等.不同品种小白菜对镉的吸收积累差异[J].应用生态学报,2009,20(3):736-740.
- [8] CHEN Ying, LI Ting-qiang, YANG Xiao-e, et al. Differences in cadmium absorption and accumulation of *Brassica varieties* on cadmium-polluted soil[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, 20(3):736-740.
- [9] Alexander P D, Alloway B J, Dourado A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144:736-745.
- [10] 孙建云,沈振国.镉胁迫对不同甘蓝基因型光合特性和养分吸收的影响[J].应用生态学报,2007,18(11):2605-2610.
- [11] SUN Jian-yun, SHEN Zhen-guo. Effects of Cd stress on photosynthetic characteristics and nutrient uptake of cabbages with different Cd^{2+} tolerance[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(11):2605-2610.
- [12] 孙 群,胡景江.植物生理研究技术[M].陕西:西北农林科技大学出版社,2006:168-170,176-178.
- [13] SUN Qun, HU Jing-jiang. Research technology of plant physiology[M]. Shannxi:Northwest Agriculture and Forestry University Press, 2006:168-170,176-178.
- [14] 高俊凤.植物生理实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006:192-201.
- [15] GAO Jun-feng. Guidance of plant physiology experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:192-201.
- [16] 孙守琴,何 明,曹 同,等. Pb、Ni 胁迫对大羽蕨抗氧化酶系统的影响[J].应用生态学报,2009,20(4):937-942.
- [17] SUN Shou-qin, HE Ming, CAO Tong, et al. Effects of Pb and Ni stress on antioxidant enzyme system of *Thuidium cymbifolium*[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, 20(4):937-942.
- [18] Liu W T, Zhou Q X, Sun Y B, et al. Identification of Chinese cabbage genotypes with low cadmium accumulation for food safety[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 1-7.
- [19] Arora M, Kiran B, Rani S T, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111:811-815.
- [20] Wu F Y, Leng H M, Wu S C, et al. Variation in arsenic, lead and zinc tolerance and accumulation in six populations of *Pteris vittata* L. from China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:2394-2404.
- [21] Sun L N, Niu Z X, Sun T H. Effects of Amendments of N, P, Fe on phytoextraction of Cd, Pb, Cu, and Zn in soil of Zhangshi by mustard, cabbage, and sugar beet[J]. *Environmental Toxicology*, 2007, 10:565-570.
- [22] 何 冰,何计兴,何新华,等.铅胁迫对杨梅生理特性的影响[J].农

- 业环境科学学报, 2009, 28(6):1263-1268.
- HE Bing, HE Ji-xing, HE Xin-hua, et al. Effects of lead on physiological characteristics of bayberry (*myrica rubra*) seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6):1263-1268.
- [17] 谢 飞, 王宏斌, 王海娟, 等. 砷胁迫对不同砷富集能力植物叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7):1379-1385.
- XIE Fei, WANG Hong-bin, WANG Hai-juan, et al. Effects of arsenic stress on activities of antioxidant enzymes in the fronds of plants with different abilities to accumulate arsenic[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1379-1385.
- [18] 王松良, 陈选阳, 陈 辉, 等. 小白菜镉耐性形成的生理生化机理研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5):120-124.
- WANG Song-liang, CHEN Xuan-yang, CHEN Hui, et al. Phys-chemical mechanism of cadmium tolerance of Chinese cabbage[J]. *Chin J Eco-Agri*, 2007, 15(5):120-124.
- [19] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇, 等. Cd、Pb 污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1):63-68.
- ZONG Liang-gang, SUN Jing-ke, SHEN Qian-yu, et al. Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic-symptoms[J]. *Asian J Eco-toxi*, 2007, 2(1):63-68.
- [20] 刘志华, 伊晓云, 王火焰, 等. 不同品种大白菜苗期吸收积累镉的差异研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):987-993.
- LIU Zhi-hua, YI Xiao-yun, WANG Huo-yan, et al. Cd accumulation in different Chinese cabbage seedlings under Cd stress[J]. *Acta Pedological Sinica*, 2008, 45(5):987-993.
- [21] 张治安, 王振民, 徐克章. Cd 胁迫对萌发大豆种子中活性氧代谢的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4):670-673.
- ZHANG Zhi-an, WANG Zhen-min, XU Ke-zhang. Effect of cadmium stress on active oxygen metabolism in germinated soybean seeds [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4):670-673.
- [22] Kim Y Y, Yang Y Y, Lee Y S. Pb and Cd uptake in rice roots[J]. *Physiology Plant Arum*, 2002, 116:368-372.
- [23] Patrick A, Christiane C. Allocation plasticity and plant-mental partitioning: Meta-analytical perspectives in phytoremediation[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156:290-296.
- [23] 张 燕, 廖超英. 大棚土壤和番茄中 Cd 含量及其生物有效性[J]. 西北农业学报, 2008, 17(3):246-249, 253.
- ZHANG Yan, LIAO Chao-ying. Content and bioavailability of Cd in soil and tomato of greenhouse[J]. *Agri Bore-Occi Sinica*, 2008, 17(3):246-249, 253.