

# 外源硫化氢对镉胁迫下黄瓜胚轴和胚根生理生化特性的影响

于立旭<sup>1</sup>, 尚宏芹<sup>2</sup>, 张存家<sup>1</sup>, 王秀峰<sup>1</sup>, 魏 珉<sup>1</sup>, 杨凤娟<sup>1</sup>, 史庆华<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> 山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; <sup>2</sup> 菏泽学院生命科学系, 山东菏泽 274015)

**摘 要:** 以黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 种子为试材, 研究了外源 H<sub>2</sub>S 预处理对镉胁迫下黄瓜胚轴和胚根生理生化特性的影响。结果表明: 用浓度为 300、600、900 和 1 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 H<sub>2</sub>S 供体 NaHS 预处理黄瓜种子均能显著缓解镉胁迫对其胚轴和胚根的抑制作用, 其中以 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 处理效果最好。NaHS 处理显著提高了镉胁迫下黄瓜子叶中淀粉酶的活性及胚轴与胚根中 SOD、POD、CAT 和 APX 活性, 提高了二苯代苦味酰基自由基 (DPPH $\cdot$ ) 清除能力和羟基自由基 (OH $\cdot$ ) 清除能力, 从而降低了 MDA 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量, 而其他钠盐 (Na<sub>2</sub>S、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaHSO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>、NaHSO<sub>3</sub> 和 NaAc) 处理效果甚微, 表明 NaHS 缓解镉胁迫对黄瓜胚轴和胚根生长的抑制作用归因于其释放出的 H<sub>2</sub>S。

**关键词:** 黄瓜; 胚轴; 胚根; 硫化氢; 镉; 抗氧化酶

**中图分类号:** S 642.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2011) 11-2131-09

## Effects of Exogenous H<sub>2</sub>S on the Physiological and Biochemical Characteristics of the Cucumber Hypocotyls and Radicles under Cadmium Stress

YU Li-xu<sup>1</sup>, SHANG Hong-qin<sup>2</sup>, ZHANG Cun-jia<sup>1</sup>, WANG Xiu-feng<sup>1</sup>, WEI Min<sup>1</sup>, YANG Feng-juan<sup>1</sup>, and SHI Qing-hua<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> State Key laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; <sup>2</sup> Department of Life Sciences, Heze University, Heze, Shandong 274015, China)

**Abstract:** The effects of exogenous H<sub>2</sub>S on physiological and biochemical characteristics of cucumber hypocotyls and radicles under cadmium stress were studied. The results showed that the inhibited growth of cucumber hypocotyls and radicles by cadmium was alleviated by different concentrations (300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 600  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 1 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) of NaHS treatment, especially under the 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  treatment. NaHS treatment significantly increased activities of amylase, SOD, POD, CAT and APX as well as the capacity of  $\alpha$ ,  $\alpha$ -diphenyl- $\beta$ -picrylhydrazyl radical (DPPH $\cdot$ ) and hydroxyl radical (OH $\cdot$ ) scavenging in both hypocotyls and radicles of cucumber, as the results, the accumulations of MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> were decreased. Otherwise, the treatments with other sodium salt including Na<sub>2</sub>S, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaHSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, NaHSO<sub>3</sub> and NaAc had no significant effects on the growth of cucumber

收稿日期: 2011-09-05; 修回日期: 2011-10-24

基金项目: 国家“973”项目 (2009CB119000); 国家自然科学基金项目 (30800751); 国家大宗蔬菜产业技术体系项目 (CARS-25-D-03)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: qhshi@sdaa.edu.cn)

hypocotyls and radicles. Based on these results, it could be concluded that the function of NaHS was attributed to  $H_2S$  from it.

**Key words:** cucumber; hypocotyl; radicle; hydrogen sulfide; cadmium; antioxidant enzyme

随着社会工业化进程的加速,汽车尾气排放、人工合成农药和肥料的大量施用,大气和土壤受重金属污染的程度日益严重。目前我国受镉、砷、铬、铅等重金属污染的耕地面积近 2 000 万  $hm^2$ ,约占总耕地面积的 1/5,镉污染问题日益严重(郭笃发,1994;苏年华 等,1994;陈怀满 等,1996;郑喜坤 等,2002; Benavides et al., 2005)。镉易被植物吸收,具有很强的化学活性和生物毒性,其中活性氧的大量积累是镉毒害对植物产生伤害的重要因素(Radotic et al., 2000; Cho & Seo, 2005; Smeets et al., 2008)。

近年来国内外有关镉对水稻、玉米等大田作物种子萌发、生理代谢的影响已有大量的报道(张国屏 等,2002;曾翔 等,2007; He et al., 2008),在蔬菜方面,重金属毒害的报道多集中在叶菜类(孙光闻 等,2004;李德明 等,2005)。随着我国设施蔬菜的迅速发展,温室大棚中由于不合理施肥和喷洒农药,导致设施土壤重金属污染日益严重。为此,开展镉毒害对设施蔬菜生理代谢的影响及调控技术具有重要的意义。

硫化氢( $H_2S$ )存在于许多工业废弃物中,起初被作为一种生物有毒气体。近年来研究发现它在调控动植物体的代谢方面扮演重要的角色。目前在动物体试验中,通过用 NaHS 作为供体证明  $H_2S$  作为一种气体信号分子具有调节心脏功能,增强消化道和血管平滑肌的张力,以及抑制血管平滑肌细胞增殖等作用(Zhao et al., 2001)。目前关于植物体内  $H_2S$  作为信号分子的研究报道还比较少,有研究表明  $H_2S$  供体 NaHS 处理提高了铝胁迫和铜胁迫下小麦种子的发芽率,显著促进种子快速整齐地萌发(Zhang et al., 2008, 2010),而有关  $H_2S$  在缓解蔬菜重金属胁迫生理生化方面的研究,国内外尚未有报道。本试验中以设施栽培面积较大的黄瓜为试材,研究外源  $H_2S$  处理对镉胁迫下黄瓜胚轴和胚根生理生化特性的影响,为深入探讨镉胁迫下  $H_2S$  调控黄瓜生理代谢的机制提供一定的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料的处理

试验于 2010 年 9—11 月在山东农业大学园艺科学与工程学院设施与无土栽培实验室中进行,取黄瓜(*Cucumis sativus* L.)‘津研 4 号’种子,经消毒处理后于 25  $^{\circ}C$  生化培养箱中用 NaHS 溶液(0、300、600、900 和 1 200  $\mu mol \cdot L^{-1}$ )浸种 12 h,然后在 28  $^{\circ}C$  生化培养箱中催芽。挑选整齐、健壮的露白种子放置于 9 cm  $\times$  9 cm 培养皿中(每盘 20 粒),种子下铺 3 层层析滤纸,种子上铺一层,在铺好滤纸后加 7 mL 800  $\mu mol \cdot L^{-1}$   $CdCl_2$  溶液(在摆种子前后分两次加入,空白对照用蒸馏水代替)。摆好种子后在培养皿上罩保鲜膜,防止水分散失。每个处理 3 次重复。将培养皿置于 28  $^{\circ}C$  生化培养箱中,48 h 后取样测定相关指标。为确定在本试验中 NaHS 对镉胁迫的缓解效应是否归因于其释放出的  $H_2S$ ,选择 900  $\mu mol \cdot L^{-1}$   $Na_2S$ 、 $Na_2SO_4$ 、 $NaHSO_4$ 、 $Na_2SO_3$ 、 $NaHSO_3$  和  $NaAc$  等钠盐代替 NaHS 对黄瓜种子进行预处理,方法与 NaHS 一致。

### 1.2 测定方法

处理 48 h 后,用直尺测量胚轴和胚根长度。将胚轴与胚根分别取样称量质量,根据  $\alpha$ -淀粉酶

不耐酸 (pH 3.6 以下迅速钝化) 和  $\beta$ -淀粉酶不耐热 (70 °C 15 min 被钝化) 的不同理化性质利用比色法测定其活性 (赵世杰 等, 2002); 抗氧化酶液提取参照 Moerschbacher 等 (1988) 的方法, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定参照 Gismopolitis 和 Ries (1977) 的方法, 过氧化氢酶 (CAT) 活性测定参照 Kraus 和 Fletcher (1994) 的方法。抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性测定参照 Nakano 和 Asada (1981) 的方法。过氧化物酶 (POD) 活性测定参照 Moerschbacher 等 (1988) 的方法。丙二醛 (MDA) 含量测定采用 Herth 和 Paker (1986) 的硫代巴比妥酸法;  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量测定采用 Brennan & Frenkel (1977) 的四氯化钛还原法; 二苯代苦味酰基自由基 (DPPH $\cdot$ ) 清除能力、羟自由基 ( $\text{OH}\cdot$ ) 清除能力测定均参照 Manda 等 (2010) 的方法。

采用 DPS 软件对数据进行方差分析及最小显著差异性检验 (Duncan's 新复极差法,  $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 NaHS 处理对镉胁迫下发芽黄瓜种子胚轴与胚根长度的影响

由图 1 可以看出, 镉胁迫使黄瓜种子胚根、胚轴长度与空白对照 (0+0) 相比显著降低, 而外施 NaHS 则有效缓解了镉对黄瓜种子发芽过程中胚根与胚轴生长的抑制。在本试验中, 以 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理效果最好, 胚轴、胚根长度分别比单独镉处理提高了 68.7%、103.4%。

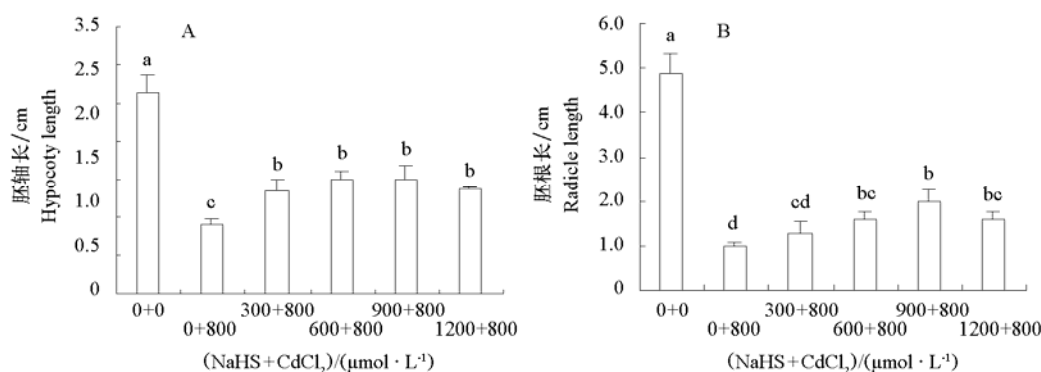


图 1 NaHS 对镉胁迫下黄瓜胚轴 (A) 和胚根 (B) 长度的影响

Fig. 1 Effects of NaHS on the length of cucumber hypocotyls (A) and radicles (B) under cadmium stress

### 2.2 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜子叶中淀粉酶活性的影响

淀粉酶是种子发芽过程中的一种重要酶, 由图 2 可以看出, 镉胁迫下黄瓜种子发芽过程中子叶总淀粉酶、 $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶均比对照显著降低, 而外施 NaHS 则显著提高了镉胁迫下黄瓜种子发芽过程中总淀粉酶的活性, 但提高的幅度差异较大, 不同浓度 NaHS 处理之间  $\alpha$ -淀粉酶活性没有显著差异 (图 2, B), 而  $\beta$ -淀粉酶则与处理浓度密切相关, 其中以 NaHS 浓度 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  增长最为显著, 比单独镉处理提高了 101% ( $P < 0.05$ ) (图 2, C)。说明 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜子叶总淀粉酶活性的促进作用主要归因于其对  $\beta$ -淀粉酶活性的诱导。

### 2.3 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根中 MDA 及 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量的影响

不同处理之间 MDA 及  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量的变化趋势一致 (图 3)。镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根中的 MDA 与  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量均比对照显著升高, 而外施 NaHS 则使其升高幅度降低, 并随着 NaHS 处理浓度的升高其含量呈现先降低再升高的趋势, 两者均以 NaHS 浓度为 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时效果最好。与单独镉处理

相比, 外施 NaHS 处理的 MDA 在胚轴与胚根中的含量分别降低了 75%和 76.7% ( $P < 0.05$ ),  $H_2O_2$  在胚轴和胚根中的含量分别降低了 68.9%和 58.1%。

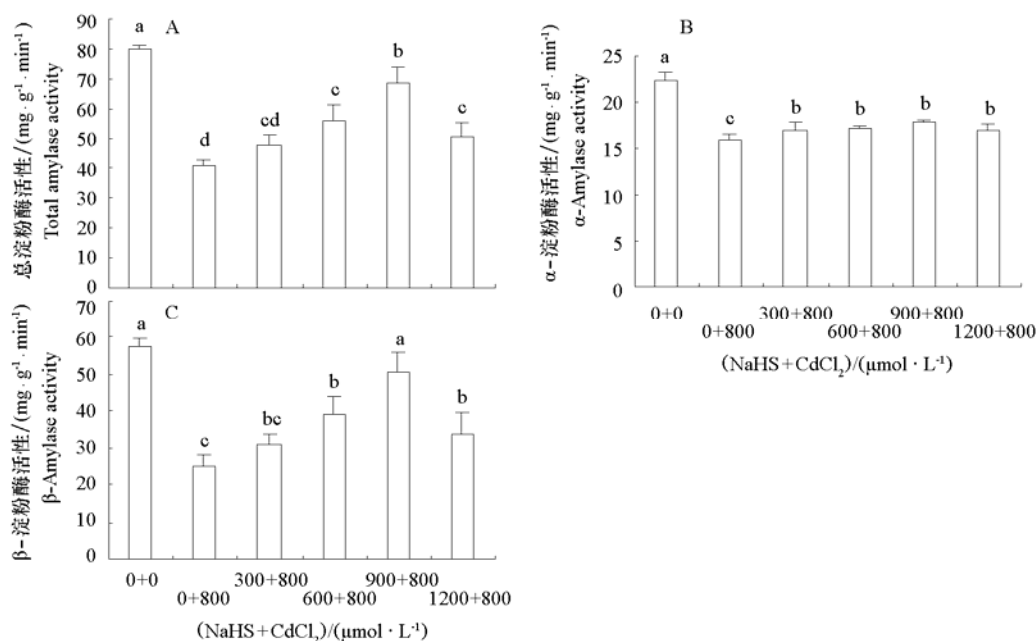


图2 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜子叶中总淀粉酶 (A)、 $\alpha$ -淀粉酶 (B) 及  $\beta$ -淀粉酶 (C) 活性的影响。

Fig. 2 Effects of NaHS on the activities of total amylase (A),  $\alpha$ -amylase (B) and  $\beta$ -amylase (C) activities in cucumber cotyledon under cadmium stress

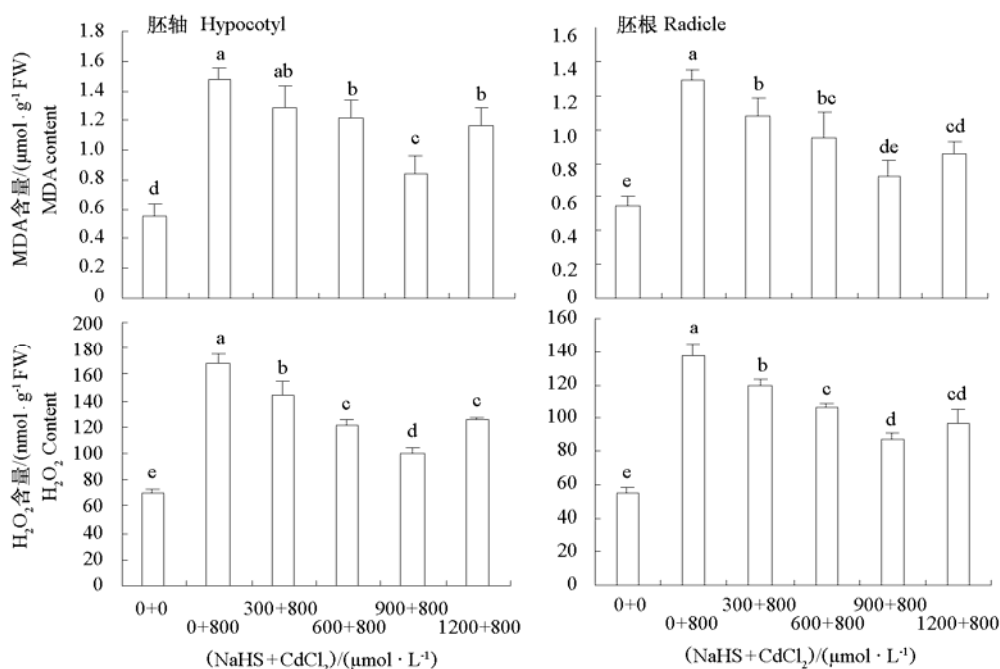


图3 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根中 MDA 及  $H_2O_2$  含量的影响

Fig. 3 Effects of NaHS on the content of MDA and  $H_2O_2$  in cucumber hypocotyls and radicles under cadmium stress

## 2.4 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根抗氧化能力的影响

由图 4 可以看出, 外施 NaHS 显著提高了镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根的抗氧化能力且两者均以 NaHS 浓度为  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  提高最为显著。与单独镉处理相比,  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 处理胚轴与胚根

二苯代苦味酰基自由基 (DPPH•) 清除能力分别增加了 118% 和 257% ( $P < 0.05$ ); 羟基自由基 (OH•) 清除能力分别增加了 32% 和 21.7% ( $P < 0.05$ )。

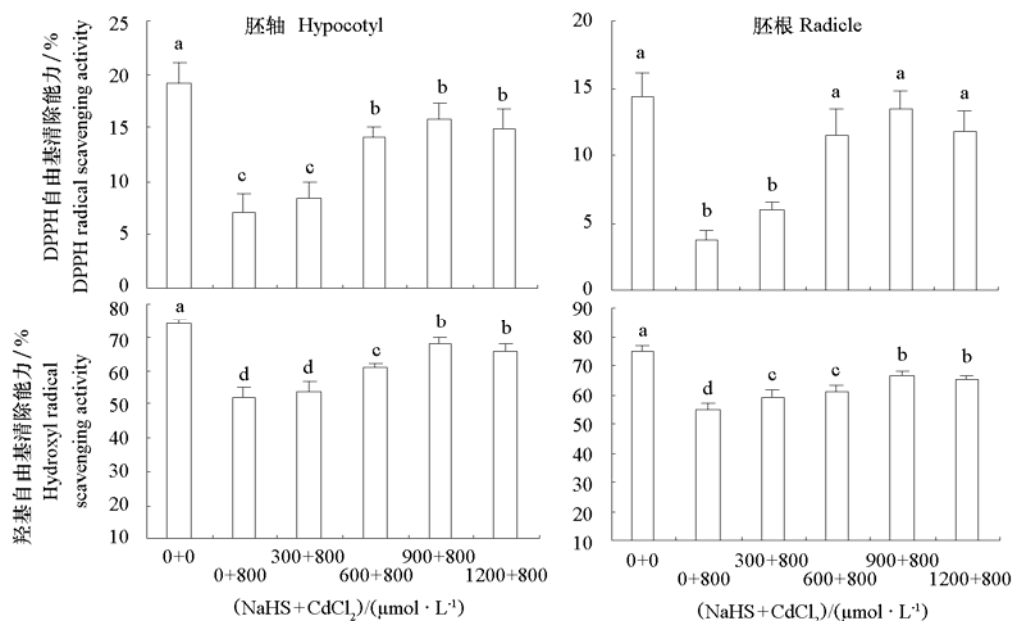


图 4 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根 DPPH 自由基 (DPPH•) 清除能力和羟基自由基 (OH•) 清除能力的影响

Fig. 4 Effects of NaHS on the activities of DPPH radical (DPPH•) scavenging and hypocotyl radical (OH•) scavenging in cucumber hypocotyls and radicles under cadmium stress

## 2.5 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根抗氧化酶活性的影响

镉处理显著抑制了黄瓜胚轴和胚根中抗氧化酶 SOD、POD、CAT 和 APX 的活性, 外施 NaHS 能够显著降低镉胁迫对黄瓜胚轴与胚根中 4 种保护酶活性的抑制, 并且其效果与其他指标类似, 均以 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  缓解效果最好 (图 5, 图 6)。

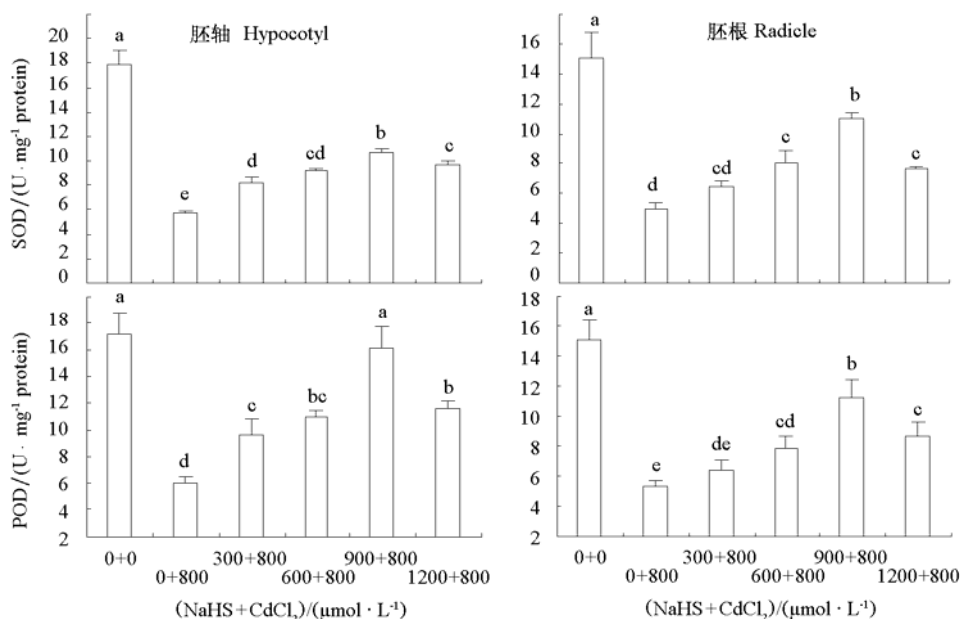


图 5 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根 SOD 和 POD 活性的影响

Fig. 5 Effects of NaHS on the activities of SOD and POD in cucumber hypocotyls and radicles under cadmium stress

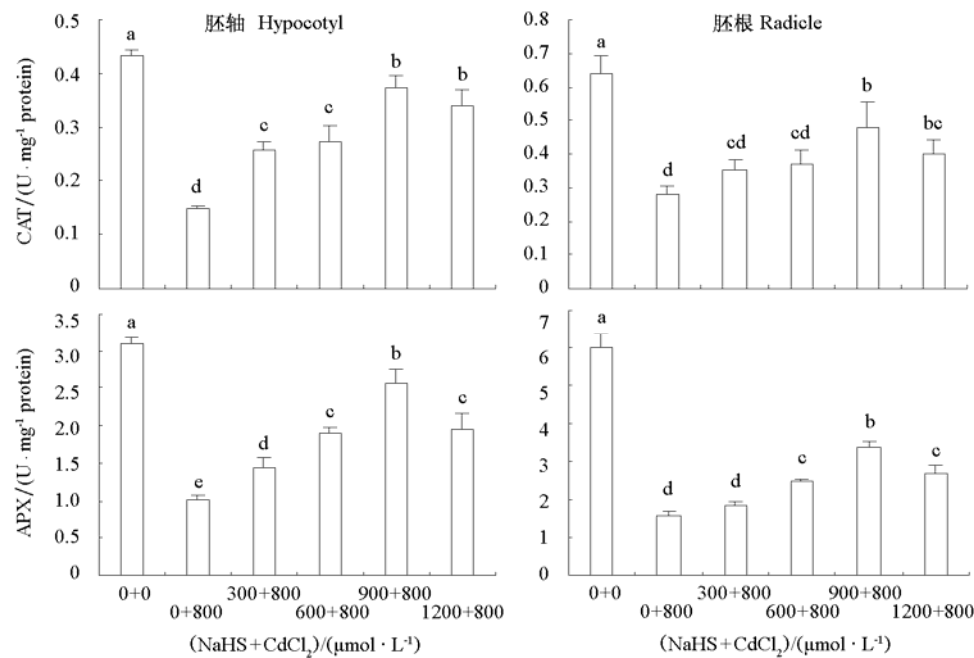


图 6 NaHS 处理对镉胁迫下黄瓜胚轴与胚根 CAT 和 APX 活性的影响  
Fig. 6 Effects of NaHS on the activities of CAT and APX in cucumber hypocotyls and radicles under cadmium stress

2.6 其它钠盐对镉胁迫下黄瓜种子发芽的影响

图 7 表明，各种钠盐均未缓解镉胁迫对黄瓜胚轴和胚根生长的抑制，说明本试验中 NaHS 对镉胁迫的缓解效应应归因于其释放的 H<sub>2</sub>S。

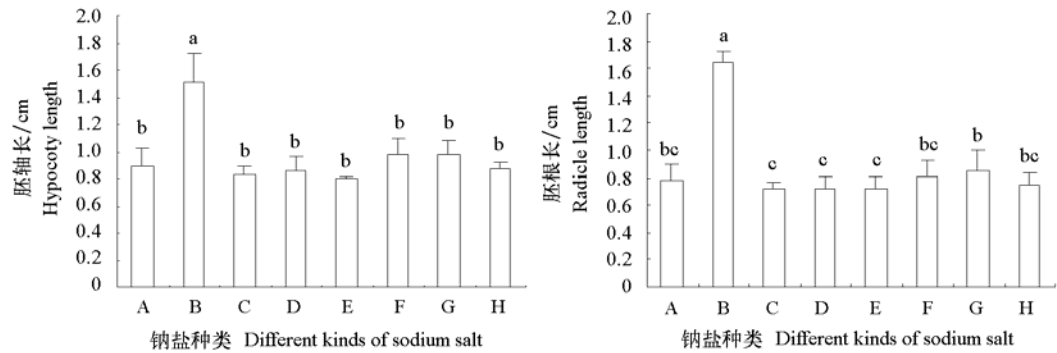


图 7 不同钠盐对镉胁迫下黄瓜胚轴和胚根长度的的影响  
Fig. 7 Effects of different kinds of sodium salt on the length of cucumber hypocotyls and radicles under cadmium stress.

A: CdCl<sub>2</sub>; B: NaHS + CdCl<sub>2</sub>; C: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + CdCl<sub>2</sub>; D: NaHSO<sub>4</sub> + CdCl<sub>2</sub>;  
E: Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> + CdCl<sub>2</sub>; F: NaHSO<sub>3</sub> + CdCl<sub>2</sub>; G: NaAC + CdCl<sub>2</sub>

3 讨论

已有研究表明，镉毒害可显著抑制植物胚轴和胚根的伸长(He et al., 2010; Sfaxi-Boushbih et al., 2010)，镉是植物体生长的非必需元素，而且是毒性较大的诱变剂(张义贤, 1997)。植物组织细

胞内的  $\text{Cd}^{2+}$  能与酶活性中心或蛋白质中的巯基结合, 取代金属蛋白中的必需元素, 导致生物大分子的构象改变, 酶活性丧失以及必需元素缺乏, 从而使植物代谢发生紊乱, 生长代谢不能正常进行 (周文美, 1998; 孔祥生 等, 1999; 汪洪 等, 2001; 赵永学 等, 2005)。Sfaxi-Boushbih 等 (2010) 研究表明, 镉阻碍了矿质元素和碳水化合物从子叶到胚轴和胚根的移动是其抑制大豆发芽的主要因素, 在本研究中, 镉毒害显著降低了黄瓜子叶中总淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶的活性, 黄瓜子叶中淀粉到糖的转化受到抑制, 影响了胚轴和胚根所需营养物质的供给, 抑制了其正常的生长, 类似的结果在豌豆 (Chugh & Sawhney, 1996) 和水稻 (He et al., 2008) 中均有报道。

$\text{H}_2\text{S}$  作为一种信号分子在动物的血管系统、神经系统以及消化系统和呼吸系统的生理代谢调控中发挥重要作用 (Hosokir et al., 1997; Elsey et al., 2010; Gadalla & Snyder, 2010)。植物体中也可以产生  $\text{H}_2\text{S}$ , 但关于其在植物代谢调控中功能的研究近几年开始有零星报道。用 NaHS 作为  $\text{H}_2\text{S}$  供体可以促进小麦种子萌发过程中淀粉酶的活性 (刘锐锋 等, 2010), 减轻渗透胁迫对叶片造成的氧化损伤 (Zhang et al., 2009), 延缓鲜切花的衰老进程 (Zhang et al., 2011), 另外 Lisjak 等 (2010) 利用一种  $\text{H}_2\text{S}$  新型供体 GYY4137 证明  $\text{H}_2\text{S}$  能促进气孔在光下的开放和阻止其在黑暗中的关闭。鉴于以往 NaHS 对几种植物逆境胁迫的调控作用, 本试验中研究了外源  $\text{H}_2\text{S}$  供体 NaHS 对镉胁迫下黄瓜种子发芽的影响, 在  $300 \sim 1\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  之间 NaHS 均能明显促进淀粉酶活性, 缓解镉胁迫对黄瓜种子萌发的抑制, 这与 Zhang 等 (2008) 在 NaHS 缓解铜毒害对小麦发芽抑制试验中得到的结果类似。有人推测淀粉酶活性的升高可能是由于  $\text{H}_2\text{S}$  的存在可提供一个稳定的内部 pH 环境 (刘锐锋 等, 2010)。

在重金属胁迫下, 活性氧平衡易被打破, 容易导致膜脂过氧化物的发生。本试验中镉处理显著增加了黄瓜胚轴与胚根中膜脂过氧化产物 MDA 和  $\text{H}_2\text{O}_2$  的含量, 表明植株受到了较为严重的氧化胁迫, 而 NaHS 处理显著降低了镉诱发的氧化胁迫, 进一步研究表明, 其缓解作用与其提高了抗氧化酶的活性和自由基清除能力密切相关。Zhang 等 (2009) 发现外源  $\text{H}_2\text{S}$  可以降低渗透胁迫下甘薯的氧化伤害而降低叶绿素的降解, 但 Wang 等 (2010) 研究表明, 以 NaHS 作为  $\text{H}_2\text{S}$  供体可以诱导果胶甲基酯酶的基因表达和活性的提高, 从而降低了黄瓜的镉毒害症状。

综上所述,  $\text{H}_2\text{S}$  可以缓解镉胁迫对黄瓜淀粉酶活性和发芽的抑制, 降低镉诱导的活性氧伤害, 但由于其研究刚刚起步, 关于其调控的其他生理代谢过程需要进一步的探索。

## References

- Benavides M, Gallego M S, Tomaro M L. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17 (1): 21 - 34.
- Brennan T, Frenkel C. 1977. Involvement of hydrogen peroxide in the regulation of senescence in pear. *Plant Physiology*, 59: 411 - 416.
- Chen Huai-man, Chen Neng-chang, Chen Ying-xu. 1996. Heavy metals pollution in soil - plant system. Beijing: Science Press: 71 - 87. (in Chinese)
- 陈怀满, 陈能场, 陈英旭. 1996. 土壤—植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社: 71 - 87.
- Cho U H, Seo N H. 2005. Oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. *Plant Science*, 168: 113 - 120.
- Chugh L K, Sawhney S K. 1996. Effect of cadmium on germination, amylases and rate of respiration of germination pea seeds. *Environmental Pollution*, 92: 1 - 5.
- Elsey D J, Fowkes R C, Baxter G F. 2010. Regulation of cardiovascular cell function by hydrogen sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ). *Cell Biochemistry and Function*, 28: 95 - 106.
- Gadalla M M, Snyder S H. 2010. Hydrogen sulfide as a gasotransmitter. *Journal of Neurochemistry*, 113: 14 - 26.
- Gisnopolitis C N, Ries S K. 1977. Superoxide dismutases I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59: 309 - 314.
- Guo Du-fa. 1994. Environmental sources of Pb and Cd and their toxicity to man and animal. *Advances in Environmental Science*, 2 (3): 71 - 76. (in Chinese)

- 郭笃发. 1994. 环境中铅和镉的来源及其对人和动物的危害. 环境科学进展, 2 (3): 71 - 76.
- He J Y, Ren Y F, Pan X B, Yan Y P, Zhu C, Jiang D A. 2010. Salicylic acid alleviates the toxicity effect of cadmium on germination, seedling growth, and amylase activity of rice. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 173: 300 - 305.
- He J Y, Ren Y F, Zhu C, Jiang D A. 2008. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and seed amylase activities in rice (*Oryza sativa*). Rice Science, 15 (4): 319 - 325.
- Herth R L, Packer L. 1986. Photoperoxidation in isolated chloroplasts I kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives Biochemistry and Biophysics, 125: 189 - 198.
- Hosoki R, Matsuki N, Kimura H. 1997. The possible role of hydrogen sulfide as an endogenous smooth muscle relaxant in synergy with nitric oxide. Biochemical and Biophysical Research Communications, 237 (3): 527 - 531.
- Kong Xiang-sheng, Guo Xiu-pu, Zhang Miao-xia. 1999. Effect of cadmium stress on seedling growth and physiology-chemistry of maize. Journal of Huazhong Agricultural University, 18 (2): 111 - 113. (in Chinese)
- 孔祥生, 郭秀璞, 张妙霞. 1999. 镉胁迫对玉米幼苗生长及生理特性的影响. 华中农业大学学报, 18 (2): 111 - 113.
- Kraus T E, Fletcher R A. 1994. Paclobutrazol protects wheat seedlings from heat and paraquat injury. Is detoxification of active oxygen involved? Plant and Cell Physiology, 35 (1): 45 - 52.
- Li De-ming, He Li-hong, Zhu Zhu-jun. 2005. Effects of heavy metal ions on germination and physiological activity of *Brassica campestris* ssp. *chinensis* L. seeds. Seed, 24 (6): 27 - 29. (in Chinese)
- 李德明, 贺立红, 朱祝军. 2005. 几种重金属离子对小白菜种子萌发及生理活性的影响. 种子, 24 (6): 27 - 29.
- Lisjak M, Srivastava N, Teklic T, Civale L, Lewandowski K, Wilson I, Wood M E, Whiteman M, Hancock J T. 2010. A novel hydrogen sulfide donor causes stomatal opening and reduces nitric oxide accumulation. Plant Physiology and Biochemistry, 48 (12): 931 - 935.
- Liu Rui-feng, Guo Xi-kai, Zhang Hua. 2010. Effects of hydrogen sulfide on amylase activity in wheat seeds during the early stage of germination. Journal of Anhui Agricultural Science, 38 (14): 7218 - 7219, 7226. (in Chinese)
- 刘锐锋, 郭希凯, 张 华. 2010. 硫化氢对小麦种子萌发早期淀粉酶活性的影响. 安徽农业科学, 38 (14): 7218 - 7219, 7226.
- Manda K D, Adams C, Ercal N. 2010. Biologically important thiols in aqueous extracts of spices and evaluation of their *in vitro* antioxidant properties. Food Chemistry, 118: 589 - 593.
- Moerschbacher B M, Noll U M, Flott B E, Reisner H J. 1988. Lignin biosynthetic enzymes in stem rust infected, resistant and susceptible near-isogenic wheat lines. Physiological and Molecular Plant Pathology, 33 (1): 33 - 46.
- Nakano Y, Asada K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology, 22: 867 - 880.
- Radotic K, Ducic T, Mutavdzic D. 2000. Changes in peroxidase activity and isoenzymes in spruce needles after exposure to different concentrations of cadmium. Environmental and Experimental Botany, 44: 105 - 113.
- Sfaxi-Boushbih A, Chaoui A, Ferjani E E. 2010. Cadmium impairs mineral and carbohydrate mobilization during the germination of bean seeds. Ecotoxicology and Environmental Safety, 73: 1123 - 1129.
- Smeets K, Ruytinx J, Semane B, Belleghem F V, Remans T, Sanden S V, Vangronsveld J, Cuypers A. 2008. Cadmium-induced transcriptional and enzymatic alterations related to oxidative stress. Environmental and Experimental Botany, 63: 1 - 8.
- Su Nian-hua, Zhang Jin-biao, Wang Yu-zong. 1994. Pollution of soil heavy metal and its evaluation in Fujian province. Journal of Fujian Agricultural University: Natural Sciences Edition, 23 (4): 434 - 439. (in Chinese)
- 苏年华, 张金彪, 王玉纵. 1994. 福建省土壤重金属污染及评价. 福建农业大学学报: 自然科学版, 23 (4): 434 - 439.
- Sun Guang-wen, Zhu Zhu-jun, Fang Xue-zhi. 2004. Effects of different cadmium levels on the growth and antioxidant enzymes in *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.). Acta Horticulturae Sinica, 31 (3): 378 - 380. (in Chinese)
- 孙光闻, 朱祝军, 方学智. 2004. 不同镉水平对白菜生长及抗氧化酶活性的影响. 园艺学报, 31 (3): 378 - 380.
- Wang B L, Shi L, Li Y X, Zhang W H. 2010. Boron toxicity is alleviated by hydrogen sulfide in cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings. Planta, 231: 1301 - 1309.
- Wang Hong, Zhou Wei, Lin Bao. 2001. Effects of Ca on growth and some physiological characteristics of maize under Cd stress. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1: 25 - 28. (in Chinese)



- 汪 洪, 周 卫, 林 葆. 2001. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响. 植物营养与肥科学报, 1: 25 - 28.
- Zeng Xiang, Zhang Yu-zhu, Wang Kai-rong, Li Xiao-xiang, Duan Yong-hong, Xie Jian-hong, Zhang Yue-ping, Tu Nai-mei. 2007. Effects of cadmium on rice seed germination. Chinese Journal of Applied Ecology, 18 (7): 1665 - 1668. (in Chinese)
- 曾 翔, 张玉烛, 王凯荣, 李小湘, 段永红, 谢建红, 张岳平, 屠乃美. 2007. 镉对水稻种子萌发的影响. 应用生态学报, 18 (7): 1665 - 1668.
- Zhang Guo-ping, Fukami M, Sekimoto H. 2002. Difference between two wheatecultivars in Cd and mineral nutrient uptake under different Cd levels. Chinese Journal of Applied Ecology, 13 (4): 454 - 458. (in Chinese)
- 张国屏, 深见元弘, 关本根. 2002. 不同镉水平下小麦对镉及矿质养分吸收和积累的品种间差异. 应用生态学报, 13 (4): 454 - 458.
- Zhang H, Hu L, Hu, He Y, Wang S, Luo J. 2008. Hydrogen sulfide promotes wheat seed germination and alleviates oxidative damage against copper stress. Journal of Integrative Plant Biology, 50 (12): 1518 - 1529.
- Zhang H, Ye Y, Wang S, Luo J, Tang J, Ma D. 2009. Hydrogen sulfide counteracts chlorophyll loss in sweetpotato seedling leaves and alleviates oxidative damage against osmotic stress. Plant Growth Regulation, 58: 243 - 250.
- Zhang H, Tan Z, Hu L, Wang S, Luo J, Russell L J. 2010. Hydrogen sulfide alleviates aluminum toxicity in germinating wheat seedlings. Journal of Integrative Plant Biology, 52 (6): 556 - 567.
- Zhang H, Hua S, Zhang Z, Hu L, Jiang C, Wei Z, Liu J, Wang H, Jiang S. 2011. Hydrogen sulfide acts as a regulator of flower senescence in plants. Postharvest Biology and Technology, 60: 251 - 257.
- Zhang Yi-xian. 1997. Toxicity of heavy metals to *Hordeum vulgare*. ACTA Scientiae Circumstantiae, 17 (2): 199 - 205. (in Chinese)
- 张义贤. 1997. 重金属对大麦毒性的研究. 环境科学学报, 17 (2): 199 - 205.
- Zhao Shi-jie, Shi Guo-an, Dong Xin-chun. 2002. Techniques of plant physiological experiment. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press: 119 - 121. (in Chinese)
- 赵世杰, 史国安, 董新纯. 2002. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社: 119 - 121.
- Zhao W M, Zhang J, Lu Y J, Wang R. 2001. The vasorelaxant effect of  $H_2S$  as anovel endogenous gaseous  $K_{ATP}$  channel opener, The EMBO Journal, 20 (21): 6008 - 6016.
- Zhao Yong-xue, Qi Guo-min, Ma Jia-qi, Pei Sheng-mei, Zhang Fen-qin, Li Cai-xia. 2005. The Effects of  $Cu^{2+}$  and  $Zn^{2+}$  on the growth and physiology of wheat seedling. Biology Department of Hexi University, 2: 35 - 37. (in Chinese)
- 赵永学, 齐国民, 马嘉琦, 裴生美, 张芬琴, 李彩霞. 2005.  $Cu^{2+}$ 和 $Zn^{2+}$ 对小麦幼苗生长生理的影响. 河西学院学报, 2: 35 - 37.
- Zheng Xi-shen, Lu An-huai, Gao Xiang, Zhao Jin, Zheng De-sheng. 2002. Contamination of heavy metals in soil present situation and method. Soil and Environmental Science, 11 (1): 79 - 84. (in Chinese)
- 郑喜坤, 鲁安怀, 高 翔, 赵 谨, 郑德圣. 2002. 土壤中重金属污染现状与防治方法. 土壤与环境, 11 (1): 79 - 84.
- Zhou Wen-mei. 1998. Influence of applying selenium on some biochemistry properties and selenium level in rice. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 6: 16 - 18. (in Chinese)
- 周文美. 1998. 硒对水稻生化活性的影响. 山地农业生物学报, 6: 16 - 18.

## 征 订

## 《新编拉汉英植物名称》

本书收集具有经济价值和学术价值或通俗常见的种子植物、蕨类植物、苔藓植物、藻类植物、真菌、地衣名称 55 800 条。每种植物名称有拉、汉、英三种文字对照, 按拉丁文字母顺序排列。书后附有英文俗名和汉名索引。本书可供农、林、医药、环境保护等学科的管理机构、科研单位、大学中的科技人员以及生物工程、植物检疫、花卉园艺、新闻出版、旅游、外贸等专业的技术人员使用, 也是各类图书馆典藏的重要工具书。定价: 185 元 (含邮费)。

购书者请通过邮局汇款至北京中关村南大街 12 号中国农科院蔬菜花卉所《园艺学报》编辑部, 邮编 100081。