

镉对龙葵种子萌发及子叶抗氧化酶活性的影响

刘金光¹, 张玉秀^{1*}, 史沛丽¹, 柴团耀²

(1.中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083; 2.中国科学院研究生院生命科学院,北京 100049)

摘要:龙葵(*Solanum nigrum* L.)是Cd超累积植物,可用于植物冶金和Cd污染土壤的植物修复。超累积植物的生理基础研究有助于提高其对Cd的富集效率。龙葵种子在含有不同浓度CdCl₂(0、30、50、100、150、200 μmol·L⁻¹和300 μmol·L⁻¹)的琼脂培养基上萌发7 d。结果表明,龙葵在200 μmol·L⁻¹和300 μmol·L⁻¹ Cd时发芽率显著降低,而低浓度Cd(30~150 μmol·L⁻¹)胁迫下无显著差异;在Cd≥30 μmol·L⁻¹时,活力指数、发芽势均显著降低,幼苗的生长受到显著抑制。幼苗生长分析表明:在30~150 μmol·L⁻¹ Cd处理下根长下降约17%~35%,显著低于200~300 μmol·L⁻¹ Cd处理(下降79%~90%);株高随Cd浓度的升高逐渐下降。子叶抗氧化酶活性分析表明:100~150 μmol·L⁻¹ Cd胁迫下,CAT和APX活性显著上升;在Cd胁迫下,SOD活性降低但维持在较高的活性水平。表明龙葵幼苗能忍耐小于150 μmol·L⁻¹ Cd,抗氧化酶活性在抵抗Cd毒害方面发挥重要作用。

关键词:镉;龙葵;萌发;抗氧化酶

中图分类号:X503.233 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)05-0880-05

Effect of Cadmium on Seed Germination and Antioxidative Enzymes Activities in Cotyledon of *Solanum nigrum* L.

LIU Jin-guang¹, ZHANG Yu-xiu^{1*}, SHI Pei-li¹, CHAI Tuan-yao²

(1.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2.College of Life Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hyperaccumulator species of the *Solanum nigrum* L. can accumulate Cd from soils where the concentrations are relatively low, and are therefore used for phytomining and phytoextraction of Cd contaminated soils. Basic studies on the physiology are needed to increase efficiency and uptake capacity of Cd by hyperaccumulators. The seeds of *S. nigrum* were germinated on the agar containing CdCl₂(0, 30, 50, 100, 150, 200 μmol·L⁻¹ and 300 μmol·L⁻¹) for 7 days. The results showed that germination rate was dramatically reduced at 200~300 μmol·L⁻¹ Cd as compared to control, while no significant differences were found at 30~150 μmol·L⁻¹ Cd. Additionally, vigor index, germination energy and the growth of seedling were reduced markedly in Cd concentrations exceeding 30 μmol·L⁻¹. Root elongation was declined by 17%~35% at 30~150 μmol·L⁻¹ Cd and by 79%~91% at 200~300 μmol·L⁻¹ Cd, respectively; shoot height showed gradual decrease with the increasing Cd levels. Furthermore, the activities of catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) in *S. nigrum* cotyledon were strongly enhanced at 100~150 μmol·L⁻¹ Cd, whereas superoxide dismutase(SOD) activity decreased, yet maintained a relatively high level. Taken together, these data indicated that *S. nigrum* might tolerate less than 150 μmol·L⁻¹ of Cd and antioxidant enzymes play an important role in counteracting the deleterious effects of Cd.

Keywords: cadmium; *Solanum nigrum* L.; germination; antioxidative enzyme

随着矿山开采、冶金行业的发展,污水灌溉以及污水污泥作为肥料施于田间,土壤重金属污染日益严

重^[1]。据不完全统计,我国目前遭受重金属污染的耕地已达到20 Mhm²,约占耕地总面积的1/6,每年造成作物减产达1 000万t^[2]。Cd是植物非必需元素,被认为是环境中最具有污染潜力的重金属元素之一。Cd在土壤中具有极强的移动性,极易被植物根部吸收并转运到地上部累积,可通过食物链进入人体,严重威胁着人们的身体健康^[3]。

种子萌发和幼苗生长时期对环境高度敏感,是植物生存最重要的阶段之一^[4]。种子萌发和苗期生长性

收稿日期:2011-12-22

基金项目:转基因生物新品种培育重大专项(2009ZX08009-130B);
863项目(2009AA06Z320);中央高校基本科研业务费专项
基金(2010YH05)

作者简介:刘金光(1987—),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事植物对重金属的耐性机制研究。E-mail:ljg.1987@163.com

* 通讯作者:张玉秀 E-mail:zhangyuxiu@cumt.edu.cn,
yxzhang9@sina.com

状可作为植物的重金属耐性指标。研究表明重金属(Hg、Cd、Co、Cu、Pb 和 Zn)对种子萌发的影响因重金属种类和浓度以及物种而异^[5]。低浓度重金属 Cd 对种子的萌发具有一定的刺激作用,高浓度 Cd 则显著抑制^[6]。种皮是种子抵抗外界不良环境因素的唯一屏障,可减少重金属向种子内部的渗透;胚萌动突破种皮,大量 Cd 进入种子,降低相关水解酶活性,减少营养物质向幼苗的供给,使得幼苗早期生长供能不足,抑制其生长发育^[4,6-7]。此外,Cd 胁迫会引起植物代谢紊乱和活性氧(Reactive oxygen species, ROS)水平升高,降低对 Fe、Mn 和 Ca 的吸收,同时降低叶绿素含量,抑制植物的生长,并对细胞超微结构如细胞核、叶绿体和线粒体造成伤害,改变多种代谢途径关键酶的活性^[8-9]。为避免 ROS 造成氧化伤害,植物体内的抗氧化酶活性升高,如过氧化物酶 POD、超氧化物歧化酶 SOD、过氧化氢酶 CAT 和抗坏血酸过氧化物酶 APX 等,可有效地清除过量产生的 ROS^[10]。

龙葵(*Solanum nigrum* L.)是茄科一年至多年生草本 Cd 累积植物,盆栽试验中 Cd 投加浓度为 25 mg·kg⁻¹ 的条件下,其茎和叶中 Cd 累积量分别达到 103.8 mg·kg⁻¹ 和 124.6 mg·kg⁻¹^[11],是一种具有商业运作潜力的土壤 Cd 污染植物修复材料^[12],然而,龙葵幼苗的重金属 Cd 耐性不清楚,对 Cd 胁迫下累积植物种子萌发的研究鲜有报道。琼脂作为支持物可使种子萌发的根全部暴露于重金属环境中^[13]。鉴于此,本实验采用含有不同浓度 Cd(0、30、50、100、150、200 μmol·L⁻¹ 和 300 μmol·L⁻¹ CdCl₂)的琼脂培养基模拟 Cd 污染土壤,研究 Cd 胁迫对龙葵种子萌发、幼苗生长和子叶抗氧化酶活性的影响,探讨龙葵种子萌发和幼苗生长的 Cd 耐性浓度及其耐性机制,为其修复土壤 Cd 污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

龙葵种子由中国科学院沈阳应用生态研究所宋玉芳研究员馈赠。

1.2 试验方法

选取饱满的龙葵种子,先用 70%乙醇消毒 30 s,再用次氯酸钠消毒 10 min 后,用无菌水冲洗至少 5 遍,置于 4℃冰箱 3 d。将种子分别铺于含有重金属 Cd(0、30、50、100、150、200 μmol·L⁻¹ 和 300 μmol·L⁻¹ CdCl₂)的 1/2 Hoagland 琼脂(0.6%, W/V)平板上,在(22±3)℃组培室进行萌发,每个处理 3 个重复。每隔

24 h 记录每个处理的萌发数(以胚根长度大于种子长度一半为标准),最后一次记录幼苗根长及株高,并采集子叶进行生理指标的测定。

1.3 测定项目及方法

处理后龙葵的实际发芽率、发芽指数、活力指数按照如下公式计算:

$$\text{发芽率 } G = (\text{发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽势 } GE = (\text{日发芽种子数达到最高峰时发芽的种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{活力指数 } VI = S \times \sum (G_i / D_i)$$

式中, G_i 为 t 天的发芽数(发芽势为第 4 d 测定结果); D_i 为发芽日数; S 为幼苗根长(cm)。

1.4 抗氧化酶活性测定

取 0.5 g 新鲜植物叶片加 5 mL 冰预冷 50 mmol·L⁻¹ 磷酸钠缓冲液(pH 7.0)于冰浴中研磨,4℃12 000 g 离心 20 min,上清液即为粗酶液。SOD、CAT 参照文献[14]中方法测定,APX 参照 Nakano 和 Asada 的方法^[15]测定,蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法。

1.5 数据分析

用 Excel 软件进行数据处理和作图,并利用 SPSS 16.0 进行数据显著性分析。Duncan 检验不同处理间的差异性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 Cd 对龙葵种子萌发的影响

在无 Cd 条件下(对照),龙葵种子第 3 d 时开始萌发(图 1),第 3~7 d 的发芽率分别为 8%、64%、89%、94%和 97%,呈“S”型曲线变化;在 30、50、100、150、200 μmol·L⁻¹ 和 300 μmol·L⁻¹ Cd 处理下,发芽率的变

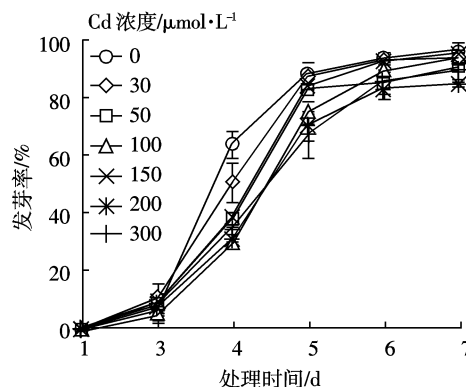


图 1 不同浓度 Cd 处理对龙葵发芽率的影响
Figure 1 Effects of Cd stress on germination of *Solanum nigrum* L. seeds

化趋势与对照一致。第 4 d 时,发芽率随 Cd 浓度升高 ($0\sim 50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 而显著降低,而 $50\sim 300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 处理之间发芽率无显著差异。第 7 d 时, $30\sim 150\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下龙葵发芽率达到 $96\%\sim 91\%$,与对照无显著差异,而 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 处理的发芽率 (88% 和 90%) 显著低于对照 ($P<0.05$)。

活力指数可反映胚根突破种皮后外界因素对种子萌发的影响,发芽势反映种子的活力。在 $0\sim 300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,活力指数随着 Cd 浓度的升高显著下降(图 2)。与对照相比,活力指数在 $50\sim 150\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 时降低了 $40\%\sim 48\%$,在 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 时降低了 $83\%\sim 92\%$ 。Cd 胁迫也同样显著降低了龙葵种子的发芽势,但变化趋势与活力指数不尽相同,发芽势在 $30\sim 50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下显著降低,约为对照的 $71\%\sim 43\%$,然后随着 Cd ($100\sim 300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 浓度的逐渐升高发芽势稳定在对照的 50% 左右。

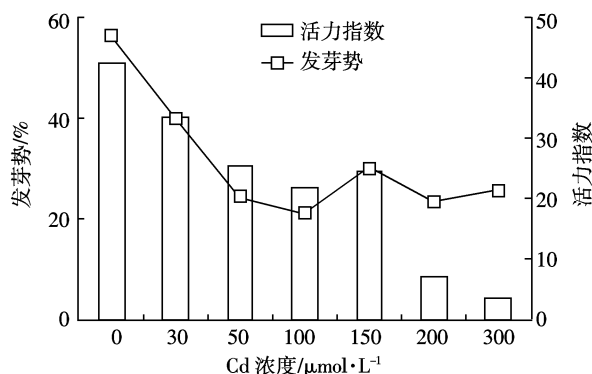


图 2 不同浓度 Cd 处理对龙葵种子发芽势和活力指数的影响
Figure 2 Effects of Cd stress on germination energy and vigor index of *Solanum nigrum* L. seeds

2.2 Cd 对龙葵幼苗生长的影响

种皮的保护减缓了重金属对胚的毒害作用。胚根萌动突破种皮后,与重金属直接接触,胚的发育和幼

苗生长受到显著抑制。龙葵根长和株高测定结果表明(图 3 和图 4):随着 Cd 浓度 ($0\sim 300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的升高,与对照相比,根长和株高显著下降。根长在 $30\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 时下降 17% ;在 $50\sim 150\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 时,根长下降幅度仅为 $28\%\sim 35\%$,不同 Cd 处理之间没有显著差异;在 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 时,根伸长被严重抑制,下降幅度分别为 79% 、 90% 。另一方面,龙葵幼苗株高在 $0\sim 300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下呈现直线下降趋势,不同浓度处理均有显著差异;其中, $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 下抑制最为严重(分别为对照的 23% 、 6%)。

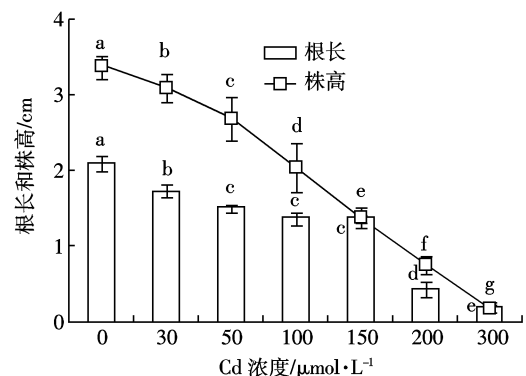


图 4 不同浓度 Cd 对龙葵根长与株高的影响

Figure 4 Effects of different levels of Cd stress on root length and shoot height in *Solanum nigrum* L.

2.3 Cd 对龙葵幼苗抗氧化酶活性的影响

抗氧化酶在维持植物体内 ROS 动态平衡过程中发挥着重要作用^[16],是植物抗氧化系统重要组成部分,其活性的变化能够反映出植物本身抵抗氧化胁迫的信息。 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 对龙葵幼苗生长严重抑制(图 3),无法采集足够子叶进行生理指标测定,实验中仅测定了 $0\sim 150\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 处理的 SOD、CAT 和 APX 活性。SOD 活性在 $30\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 浓度处理时下降 23% ; $50\sim 150\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 浓度时,

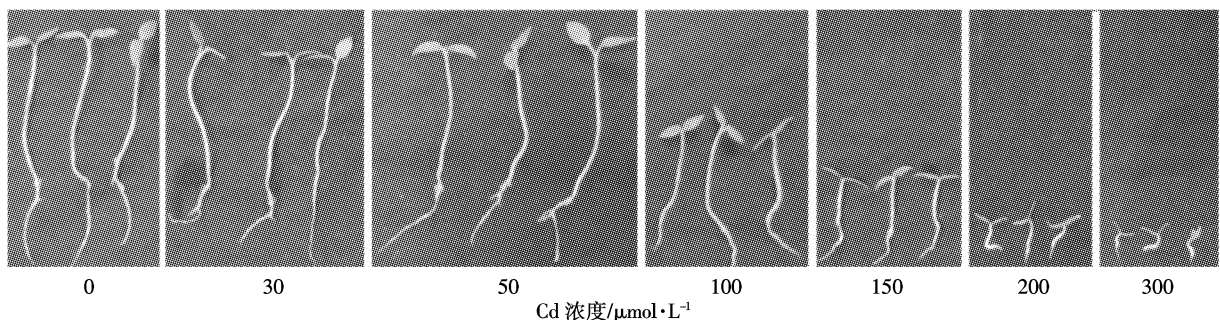


图 3 不同浓度 Cd 对龙葵生长的影响

Figure 3 Effects of different levels of Cd stress in *Solanum nigrum* L.

分别下降 38%、35% 和 40%，不同 Cd 浓度无显著差异 ($P < 0.05$) (图 5)。CAT 活性在 Cd 低浓度 ($30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 时下降 (13% 和 27%)，在高浓度时显著升高 ($P < 0.05$)， $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 浓度下活性为对照的 2 倍，达到最大。APX 对 Cd 胁迫响应与 SOD 和 CAT 不同，随着 Cd 浓度升高，APX 活性分别为对照的 105%、212%、233% 和 195%，表现出先升高后降低的变化趋势。

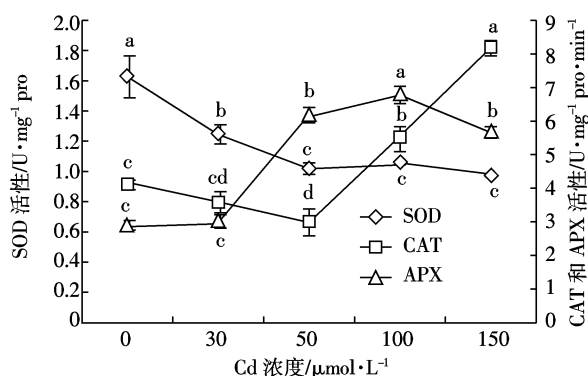


图 5 Cd 对龙葵幼苗抗氧化酶 SOD、CAT 和 APX 活性的影响

Figure 5 Effect of Cd stress on SOD, CAT and APX activities in cotyledons of *Solanum nigrum* L.

3 讨论

种子萌发早期有种皮的保护，低浓度 Cd 对种子发芽率的影响有限，胚根突破种皮后，Cd 的毒害作用才凸显出来。这意味着 Cd 胁迫对龙葵种子萌发的影响表现为对幼苗生长的抑制。发芽率是评价种子质量的指标，因此，发芽势和活力指数更能反映 Cd 胁迫对种子萌发的影响。本研究中，龙葵发芽率只在高浓度 Cd 胁迫下才显著降低，而发芽势和活力指数在最低 Cd 胁迫下均受到显著抑制。这与水稻^[17]、甘蓝型油菜 (*Brassica napus* L.)^[18] 和芨芨草 (*Achnatherum inebrians*)^[19] 等种子萌发结果类似。

Cd 胁迫显著抑制高粱^[4]、小麦^[5] 和芨芨草^[19] 等胚根和株高的生长。向日葵 (*Helianthus annuus* L.) 幼苗地上部累积的 Cd 浓度随 Cd 浓度的升高而升高，根中 Cd 浓度是地上部的 1.5~3.3 倍^[20]，表明根系吸收的重金属能向地上部转运。地上部 Cd 能够抑制光合系统相关酶活性，降低叶绿素含量^[21]，导致光合作用降低，生长抑制。龙葵幼苗向地上部转运 Cd 的能力较强，但过高 ($200 \sim 300 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Cd 浓度超过龙葵耐受浓度，根伸长受到极显著抑制，株高的生长也受到显著抑制。因此，龙葵 Cd 最高耐受浓度为 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

$\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Cd 不能像 Cu 可以直接产生 ROS，但可通过与 -SH、-COO⁻ 等结合改变靶蛋白的活性，引起细胞代谢变化，从而引起植物体内 ROS 的过量累积^[10]，造成氧化伤害。SOD 可将超氧自由基歧化为 H_2O_2 和 O_2 ，CAT 和 APX 进而将 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 ，防止 H_2O_2 的过量累积。CAT 和 APX 都是 H_2O_2 清除酶，由于对底物的亲和力不同，前者主要负责清除生物体内过量的 H_2O_2 ，而后者负责 H_2O_2 水平的精细调节^[10]。在 Cd 胁迫条件下，重金属累积植物 (印度芥菜和龙葵) 的 SOD 和 CAT 活性升高，非累积植物 (菜豆和绿豆) 中 CAT 活性却降低^[22]；芨芨草幼苗叶片中 APX 活性随 Cd 浓度升高而显著升高^[19]。本实验中，在 Cd 胁迫条件下，龙葵幼苗子叶 SOD 活性维持在对照的 60%~77%，CAT 和 APX 活性在高浓度 Cd 胁迫下显著升高。说明龙葵在高浓度 Cd 胁迫导致 ROS 的过量累积，而 CAT 和 APX 活性急剧升高，可清除植物体内过量累积的 H_2O_2 ，减轻 Cd 胁迫诱导的氧化伤害。所以，高水平的抗氧化酶活性可能是植物耐重金属的重要机制之一^[22]。

4 结论

(1) Cd 显著抑制龙葵幼苗根的伸长，其对 Cd 的耐受浓度小于 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(2) 高活性的抗氧化酶可能在龙葵抵抗 Cd 诱导的氧化伤害中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] Li Ping, Wang Xingxiang, Zhang Taolin, et al. Distribution and accumulation of copper and cadmium in soil-rice system as affected by soil amendments[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2009, 196(1-4): 29-40.
- [2] Chen Jie. Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security[J]. *Catena*, 2007, 69(1): 1-15.
- [3] Shamsi I H, Wei K, Zhang G P, et al. Interactive effects of cadmium and aluminum on growth and antioxidative enzymes in soybean[J]. *Biologia Plantarum*, 2008, 52(1): 165-169.
- [4] Kuriakose Saritha V, Prasad M N V. Cadmium stress affects seed germination and seedling growth in *Sorghum bicolor* (L.) Moench by changing the activities of hydrolyzing enzymes[J]. *Plant Growth Regulation*, 2008, 54(2): 143-156.
- [5] Munzuroglu O, Geckil H. Effects of metals on seed germination, root elongation, and coleoptile and hypocotyl growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus* [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, 43(2): 203-213.
- [6] Liu T T, Wu P, Wang L H, et al. Response of soybean seed germination

- to cadmium and acid rain[J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, 144(1-3):1186-1196.
- [7] Sfaxi-Bousbih A, Chaoui A, El Ferjani E. Cadmium impairs mineral and carbohydrate mobilization during the germination of bean seeds[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(6):1123-1129.
- [8] Song A, Li Z, Zhang J, et al. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1):74-83.
- [9] Deng X, Xia Y, Hu W, et al. Cadmium-induced oxidative damage and protective effects of N-acetyl-L-cysteine against cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L.[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 180(1-3):722-729.
- [10] Sharma S S, Dietz K J. The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance[J]. *Trends in Plant Science*, 2009, 14(1):43-50.
- [11] 魏树和, 周启星, 王 新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.)[J]. 科学通报, 2004, 49(24):2568-2573.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. A newly discovered cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24):2568-2573.
- [12] Ji P, Sun T, Song Y, et al. Strategies for enhancing the phytoremediation of cadmium-contaminated agricultural soils by *Solanum nigrum* L. [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(3):762-768.
- [13] Salvatore M Di, Carafa A M, Carratù G. Assessment of heavy metals phytotoxicity using seed germination and root elongation tests: A comparison of two growth substrates[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(9):1461-1464.
- [14] Wang Z, Zhang Y X, Huang Z B, et al. Antioxidative response of metal-accumulator and non-accumulator plants under cadmium stress[J]. *Plant and Soil*, 2008, 310(1-2):137-149.
- [15] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplast[J]. *Plant Cell Physiol*, 1981, 22(5):867-880.
- [16] Zhang Fenqin, Zhang Hongxiao, Wang Guiping, et al. Cadmium-induced accumulation of hydrogen peroxide in the leaf apoplast of *Phaseolus aureus* and *Vicia sativa* and the roles of different antioxidant enzymes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(1):76-84.
- [17] He Junyu, Ren Yanfang, Zhu Cheng, et al. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and seed amylase activities in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Rice Science*, 2008, 15(4):319-325.
- [18] Meng Huabing, Hua Shujin, Shamsi Imran Haider, et al. Cadmium-induced stress on the seed germination and seedling growth of *Brassica napus* L., and its alleviation through exogenous plant growth regulators [J]. *Plant Growth Regulation*, 2009, 58(1):47-59.
- [19] Zhang X, Li C, Nan Z. Effects of cadmium stress on growth and anti-oxidative systems in *Achnatherum inebrians* symbiotic with *Neotyphodium gansuense* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175(1-3):703-709.
- [20] Aycicek Mehmet, Kaplan Olcay, Yaman Mehmet. Effect of cadmium on germination, seedling growth and metal contents of sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2008, 20(4):2663-2672.
- [21] Feng Jianpeng, Shi Qinghua, Wang Xiufeng, et al. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium(Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 123(4):521-530.
- [22] 张玉秀, 张红梅, 黄智博, 等. 商陆耐重金属 Cd 关键酶抗氧化酶的研究[J]. 环境科学, 2011, 32(3):896-900.
ZHANG Yu-xiu, ZHANG Hong-mei, HUANG Zhi-bo, et al. Antioxidative enzymes play key roles in cadmium tolerance of *Phytolacca americana* [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3):896-900.