

文章编号:1001-1498(2016)04-0560-05

# 锌胁迫对长药景天生理特性的影响

王莹<sup>1,2</sup>, 刘晶<sup>2</sup>, 杨国亭<sup>3</sup>, 关畅<sup>2\*</sup>

(1. 东北林业大学林学院生态研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150000; 2. 哈尔滨师范大学黑龙江省普通高等学校植物生物学重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025; 3. 黑龙江省林业厅, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要:** [目的] 利用低浓度和高浓度的  $\text{ZnSO}_4$  溶液对长药景天的长期胁迫, 研究长药景天锌胁迫下的抗性能力。 [方法] 采用盆栽试验, 锌以  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的形式供给, 浓度分别为 0、160 和 1 600  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$   $\text{ZnSO}_4$ , 分别于 0、7、14、21、28、35 d 采集长势健康, 且个体相近的植株, 在相同部位选取功能叶片, 测定长药景天叶片生理指标的变化。 [结果] 表明: 低浓度 (160  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$   $\text{ZnSO}_4$ ) 锌胁迫下, 长药景天叶片电导率和 MDA 含量增加不显著; SOD、POD 和 CAT 等保护酶活性增加, 脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量增加, 高浓度 (1 600  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$   $\text{ZnSO}_4$ ) 下电导率和 MDA 含量增加, 保护酶活性增加, 脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量变化较小。 [结论] 长药景天对锌胁迫表现出较强的抗性, 低浓度锌胁迫下调节能力较强, 高浓度下主要依赖于保护酶系统的调节作用抵抗锌胁迫。在持续锌胁迫过程中, 长药景天生理上能迅速作出相应的适应性调节, 对锌胁迫表现出一定的忍耐能力和较强的恢复能力。

**关键词:** 长药景天; 锌胁迫; 保护酶活性; 渗透调节物质

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

## Effects of Zn Stress on Physiological Characteristics of *Hylotelephium spectabile*

WANG Ying<sup>1,2</sup>, LIU Jing<sup>2</sup>, YANG Guo-ting<sup>3</sup>, GUAN Yang<sup>2</sup>

(1. Ecological Research Centre, College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150000, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Plant Biology, Harbin Normal University, Harbin 150025, Heilongjiang, China;

3. Forestry Bureau of Heilongjiang Province, Harbin 150000, Heilongjiang, China)

**Abstract:** [Objective] To study the tolerance of *Hylotelephium spectabile* to long-term  $\text{ZnSO}_4$  stress. [Method] Pot experiment was conducted to study the changes of leaves' physiological indexes of *H. spectabile*. The plants were treated with different concentrations  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0, 160 and 1 600  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and the healthy leaves with the same size were collected as control material at the same position on the 0, 7th, 14th, 21th, 28th, and 35th days respectively. [Result] Under the stress of low concentration Zn, the electrical conductivity and the concentration of MDA of the leaf of *H. spectabile* didn't increased distinctively; the activity of protective enzyme such as SOD, POD and CAT increased; the concentration of proline, soluble sugar and soluble protein increased. Under the stress of high concentration Zn, the electrical conductivity and the concentration of MDA increased; the protective enzyme activity increased; the concentration of proline, soluble sugar and soluble protein changed slightly. [Conclusion] *H. spectabile* had a strong tolerance to Zn stress. Under low concentration Zn stress, *H. spectabile* showed a stronger ability to adjust, and under high concentration Zn stress, *H. spectabile* depended mainly on regulating protective enzyme system. In the process of continuous Zn stress, *H. spectabile* quickly made the corresponding physiological ad-

收稿日期: 2016-02-26

作者简介: 王莹, 在读博士, 讲师。主要研究方向: 植物生理生态。电话: 0451-82191596, E-mail: 67240473@qq.com, 地址: 哈尔滨市香坊区和兴路 26 号, 150000

\* 通讯作者: 关畅, 博士, 副教授。主要研究方向: 植物生理生态。电话: 0451-88060784, Email: guany0611@126.com

aptation to Zn stress, and showed tolerance and a strong recovery ability.

**Keywords:** *Hylotelephium spectabile*; Zn stress; protective enzyme activity; osmoregulatory substance

锌不仅是植物正常生长所必须的微量元素,同时也是一种常见的有毒重金属元素<sup>[1]</sup>。过量的锌抑制种子萌发、植物的生长和根系的发育<sup>[2-4]</sup>,伤害植物质膜透性等各种生理生化过程和营养状况,最后使植物的生长发育受到不同程度的抑制甚至死亡<sup>[5-6]</sup>,而且过量的锌进入食物链还会威胁人类的身体健康<sup>[7]</sup>。目前,重金属锌污染治理已成为国际科学界研究的热点问题<sup>[8-9]</sup>。

长药景天(*Hylotelephium spectabile* (Boreau) H. Ohba)隶属于景天科景天属宿根肉质草本植物<sup>[10]</sup>,分布于我国东北部及河北、河南、安徽、山东、黑龙江省<sup>[11]</sup>等。长药景天在园林绿化中可作多年生观赏花卉大面积栽培,同时也是我国传统的药用植物<sup>[12]</sup>。已经有人研究过长药景天对重金属镉的耐性<sup>[13]</sup>以及其对 Cr、Pb 复合污染的生理响应<sup>[14]</sup>,但未见有关长药景天对 Zn 耐性的报道。

本研究以长药景天为材料,利用不同浓度及不同胁迫时间下对锌胁迫的生理响应,从而揭示重金属锌污染对其伤害机理及其在重金属锌胁迫下的应对方式,从而为开展多年生花卉植物在重金属污染环境中的应用提供参考资料,具有一定的理论价值和现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

长药景天采自牡丹江镜泊湖,移栽到哈尔滨师范大学生命科学与技术学院试验田内培养,然后选择长势健康、一致的植株移栽到温室,移植到直径 20 cm 的花盆中,进行 7 d 适应性培养,锌以  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的形式供给,浓度分别为 0、160 和 1 600  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$   $\text{ZnSO}_4$ ,每个处理设 3 个重复。分别于 0, 7, 14, 21, 28, 35 d 采集长势健康,且个体相近的植株,在相同部位选取功能叶片,用去离子水冲洗,滤纸吸干水分,用于各生理指标的测定,每个指标重复 3 次。

### 1.2 测定方法

过氧化氢酶(CAT)活性的测定参考《植物生理实验》<sup>[15]</sup>采用紫外吸收法测定,质膜相对透性、MDA 含量、POD 活性、SOD 活性、脯氨酸含量、可溶性糖含量和蛋白质等各项生理指标参考《现代植物生理

学实验指南》<sup>[16]</sup>进行。

### 1.3 数据处理

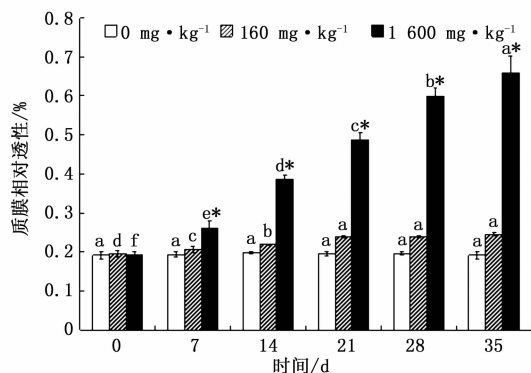
实验数据用 SPSS17.0 和 Excel 软件分析并作图。在相同污染强度下,处理时间对各参数的影响用一元方差(Duncan 检验)进行分析;在相同处理时间下,每个胁迫强度下各参数与对照的差异用 *t*-检验进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 锌胁迫对长药景天膜系统的影响

#### 2.1.1 锌胁迫对长药景天质膜相对透性的影响

如图 1,不同浓度锌胁迫下,长药景天质膜相对透性均随时间增加而增加。35 d 达到最大值,浓度 160  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  比对照组增加 21.85%;1 600  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  比对照组增加 70.92%。胁迫浓度 1 600  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  比 160  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  质膜相对透性变化更显著。



(注:不同小写字母表示相同胁迫强度下不同处理天数在 0.05 水平上差异显著; \* 表示相同处理时间下各处理强度在 0.05 水平上与对照差异显著。下同。)

图 1 锌胁迫对长药景天质膜相对透性的影响

#### 2.1.2 锌胁迫过程中长药景天 MDA 含量

如图 2,MDA 含量随时间增加而增加,7 d 后增加显著,35 d 达到最大值,且分别比对照组增加了 62.76% 和 72.15%,胁迫浓度 1 600  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  比 160  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  MDA 活性变化更显著。

### 2.2 锌胁迫过程中长药景天保护酶系统的变化

如图 3,POD 活性 0~14 d 内少量增加,21 d 后显著增加,35 d 达到最高峰,且分别比对照组增加 71.45% 和 79.9%,胁迫浓度 1 600  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  比 160  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  POD 活性变化更显著。

如图 4,CAT 活性 0~14 d 内增加不明显,21 d

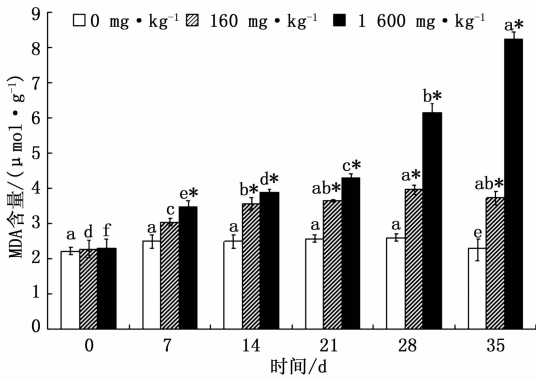


图2 锌胁迫对长药景天MDA含量的影响

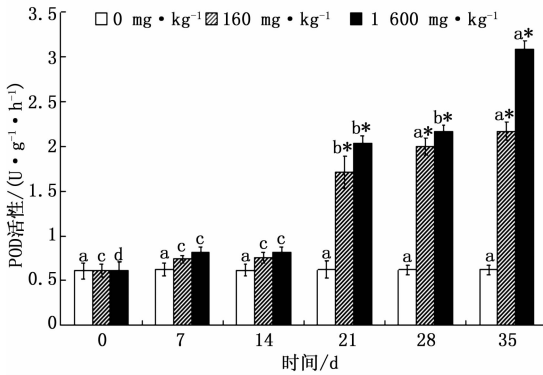


图3 锌胁迫对长药景天POD活性的影响

时  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  均显著增加, 28 d  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  含量下降,  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  变化不显著, 35 d  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  均显著增加达到最大值, 且分别比对照组增加 39.02% 和 30.96%, 胁迫浓度  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  比  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  CAT 活性变化更显著。

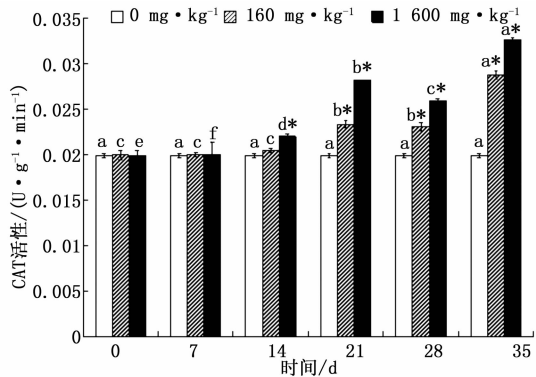


图4 锌胁迫对长药景天CAT活性的影响

如图5, SOD 活性在  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  浓度时, 都在 14 d 和 21 d 时增加, 28 d 时降低, 35 d 时再增加。  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  浓度均在胁迫 35 d 达到最高, 且比对照组增加

36.89% 和 38.33%, 胁迫浓度  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  比  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  SOD 活性变化更显著。

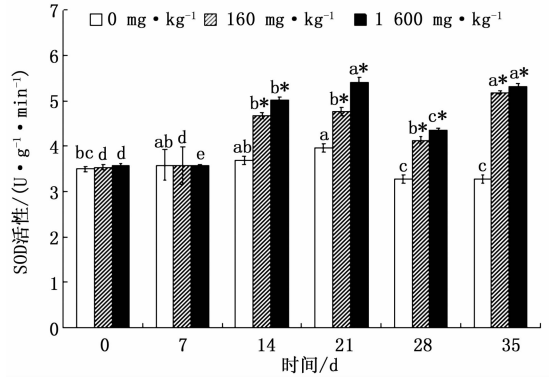


图5 锌胁迫对长药景天SOD活性的影响

### 2.3 锌胁迫过程中长药景天叶片渗透调节物质的变化

如图6, 脯氨酸含量在  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  胁迫浓度时先上升, 21 d 时达到最高值, 比对照组增加 48.05%, 21 d 后又缓慢下降。  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  浓度呈下降趋势, 35 d 时达到最低, 比对照降低 49.82%。

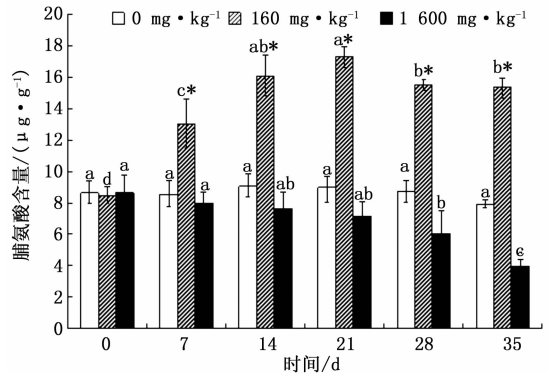


图6 锌胁迫对长药景天脯氨酸含量的影响

如图7, 可溶性糖含量在  $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  胁迫浓度时呈上升趋势, 35 d 达到最高, 比对照高 35.56%。  $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  浓度时呈缓慢下降趋势, 35 d 下降到最低, 比对照降低 17.96%。

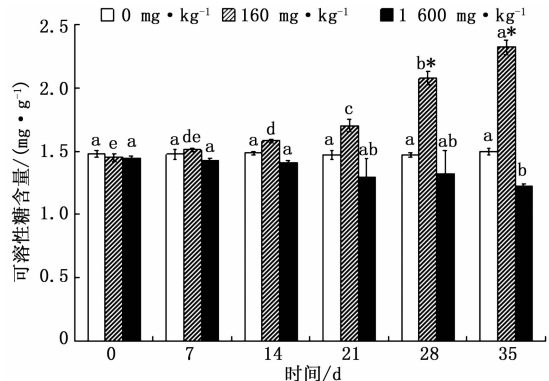


图7 锌胁迫对长药景天可溶性糖含量的影响

如图8,可溶性蛋白含量在 $160\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 胁迫浓度时先上升,21 d时达到最高值,比对照组增加25.72%,21 d后缓慢下降。 $1600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度可溶性蛋白变化不明显,呈先上升后下降趋势,14 d达到最大值。

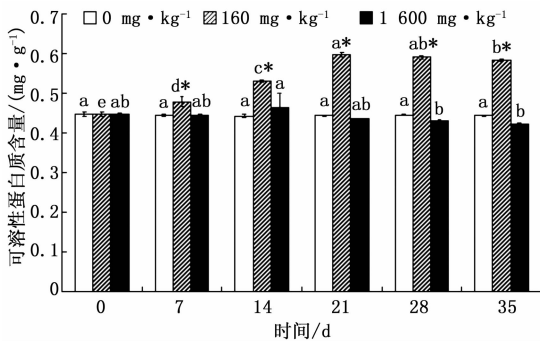


图8 锌胁迫对长药景天可溶性蛋白含量的影响

### 3 讨论

植物细胞外渗液的相对电导率的高低与逆境胁迫程度呈正相关<sup>[17]</sup>,电导率的增大,说明细胞膜脂过氧化水平升高,引起细胞膜结构损伤,细胞膜透性增大,使细胞内一些可溶性物质外渗,破坏细胞内酶及代谢作用原有的区域,严重伤害植物<sup>[18-19]</sup>。

膜脂过氧化会产生丙二醛(MDA),细胞内MDA水平间接表明了植物体内的活性氧水平和细胞受损的程度,是反映质膜受伤害程度的主要指标<sup>[20]</sup>。从实验结果可以看出,低浓度锌胁迫下长药景天叶片相对电导率上升不显著,高浓度锌胁迫时,胁迫天数越长相对电导率增加越显著;MDA含量总体变化趋势与相对电导率基本一致,表明低浓度锌胁迫并未使质膜受到严重伤害;随着锌胁迫浓度增加,胁迫时间越长对叶片的细胞膜造成的损伤越严重。这与张义贤<sup>[21]</sup>研究结果一致。

SOD、CAT和POD等酶类是细胞抵御活性氧伤害的重要保护酶系统,它们在清除超氧自由基、过氧化氢和过氧化物以及阻止或减少羟基自由基形成等方面起着重要作用<sup>[22]</sup>。本实验中长药景天叶片SOD、POD、CAT活性都是随胁迫时间的增加而增加。其中,SOD活性14 d开始先增加后有所降低再增加的趋势,POD、CAT活性0~14 d变化不大,但之后胁迫时间越长其活性越高,表明随胁迫时间增加,植物体内产生的活性氧增多,SOD、POD、CAT酶活性均有提高,3种酶有较好的协同效应,能共同抵御锌胁迫造成的膜伤害。

很多研究表明,在重金属胁迫下,植物叶片的

POD活性增强<sup>[23-24]</sup>,POD活性变化与植物体内重金属含量呈直线相关,可作为检测植物受重金属胁迫的生理指标<sup>[25-27]</sup>,本研究结果也表明随胁迫时间和浓度的增加,POD活性增加幅度较大,也说明植物在逆境条件下能否正常生长,POD是酶促防御系统的关键酶之一,它与SOD和CAT协调配合,清除体内过剩的自由基,提高了植物的抗逆能力。

渗透调节是植物适应干旱、盐渍、低温、重金属等胁迫的重要机制之一<sup>[28]</sup>。植物通过积累可溶性糖、可溶性蛋白质、脯氨酸、有机酸等小分子有机化合物,保持体内细胞与组织的水分平衡,稳定生物大分子结构,抵抗环境胁迫<sup>[29-30]</sup>。

本研究随胁迫时间的增加,低浓度锌胁迫,脯氨酸先升高后降低,而高浓度锌胁迫,脯氨酸持续降低,说明锌破坏了细胞内环境,抑制了脯氨酸的合成<sup>[31]</sup>。低浓度锌胁迫下,可溶性糖含量随胁迫天数增加而升高,高浓度可溶性糖也持续降低。低浓度锌胁迫下脯氨酸与可溶性糖含量的积累增加了长药景天细胞原生质浓度,提高了细胞渗透调节能力,对保护细胞免受伤害,维持原有的生理过程,抵御水分胁迫具有重要作用。但在高浓度胁迫时,脯氨酸与可溶性糖含量下降,这种调节受到限制,抵抗锌胁迫的能力随之下降。大量的研究已经表明植物在重金属胁迫下普遍出现游离脯氨酸、可溶性糖大量积累的现象<sup>[32-36]</sup>。

可溶性蛋白既参与渗透调节也在一定程度上反映植物内部代谢的活跃程度<sup>[37]</sup>。本实验随胁迫天数增加,低浓度锌胁迫下可溶性蛋白含量而升高,高浓度变化不显著。不少研究指出,重金属胁迫诱导可溶性蛋白质含量增加,在体内合成一类能与重金属特异结合的蛋白质或多肽,减轻重金属毒害,这是植物适应重金属污染的主要途径之一<sup>[38-40]</sup>。

### 4 结论

总之,低浓度持续锌胁迫下,长药景天调节能力较强,脯氨酸,可溶性蛋白,可溶性糖的含量增加,保护酶活性增强,促进植物的正常生长。高浓度锌胁迫下,随胁迫时间增加,生理过程受到抑制,虽然保护酶系统活性增加,但渗透调节能力下降。高浓度下,主要依赖于保护酶系统的调节作用。综上所述,在持续锌胁迫过程中,长药景天生理上能迅速作出相应的适应性调节,对锌胁迫表现出一定的忍耐能力和较强的恢复能力,在园林绿化上有重要的应用价值。

## 参考文献:

- [1] Prabhunbaraj Michael, Muthuchelian Krishnaswamy. The effect of zinc stress combined with high irradiance stress on membrane damage and antioxidative response in bean seedlings[J]. Environ Exp Bot, 2011, 74:171-177.
- [2] Mrozek J E, Funicelli N A. Effect of zinc and lead on germination of *Spartina alterniflora* Loisel seeds at various salinities[J]. Environ Exp Bot, 1982, 22: 23-32.
- [3] Lingua G, Franchin C, Todeschini V, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi differentially affect the response to high zinc concentrations of two registered poplar clones[J]. Environ Pollut, 2008, 153: 137-147.
- [4] Ebbs S D, Kochian L V. Toxicity of zinc and copper to *Brassica species*: implications for phytoremediation[J]. J Environ Qual, 1997, 26:776-781.
- [5] 龚红梅, 李卫国. 锌对植物的毒害及机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(29):14009-14015.
- [6] Stoyanova Z, Doncheva S. The effect of zinc supply and succinate treatment on plant growth and mineral uptake in pea plant[J]. Braz J Plant Physiol, 2002, 14:111-116.
- [7] 王学东, 周菊红, 华璐. 植物对重金属的抗性机理及其植物修复研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(2):43-46.
- [8] 李挺强, 杨肖娥, 龙新宪. 东南景天提取污染土壤中锌的潜力研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6):79-83.
- [9] Whiting S N, Leake J R, McGrath S P, et al. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi Caerulescens* can ameliorate Zn toxicity in the rhizosphere of co-cropped *Thlaspi Arvense*[J]. Environmental, 2001, 35: 3237-3241.
- [10] 科学出版社. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物图鉴(第二册)[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [12] 李丹, 罗方军, 雷国莲. 三七与景天三七化学成分的对比较实验研究[J]. 陕西中医学院学报, 2007, 30(1): 49-51.
- [13] 焦轶男, 朱宏. 长药景天对重金属镉胁迫的生理及形态响应[J]. 西北植物学报, 2014, 34(6):1173-1178.
- [14] 王艳, 代保清, 辛士刚, 等. 长药景天对 Cr、Pb、Cd、Hg、Co 复合污染的生理响应及吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1051-1056.
- [15] 郝再彬, 苍晶. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004:113-115, 67-68.
- [16] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南. 第二版[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 302-303, 305-306, 314-315, 316, 127-128, 303, 95-96.
- [17] Raman Bassi, Shanti S. Sharma. Proline accumulation in Wheat seedlings Exposed to Zinc and Copper[J]. Phytochemistry, 1993, 33(6): 1339-1342.
- [18] 王广林, 张金池, 王丽, 等. 铜、锌胁迫对丁香蓼生理指标的影响[J]. 南京林业大学学报, 2009, 33(4):43-47.
- [19] 原海燕, 黄苏珍, 郭智, 等. 锌对镉胁迫下马蔺生长、镉积累及生理抗性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9):2111-2116.
- [20] 何冰, 叶海波, 杨肖娥. 铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3):274-278.
- [21] 张义贤, 张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):857-860.
- [22] 时丽冉, 陈红艳, 崔兴国. 干旱胁迫对地被菊膜脂过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2010(9):96-98.
- [23] 吴灵琼. Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 对美人蕉的氧化胁迫及抗性机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1365-369.
- [24] 胡宗达, 杨远祥, 朱雪梅, 等. Pb, Zn 对超富集植物(小鳞苔草)抗氧化酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6):86-91.
- [25] Woxny A, Krzeslowka M. Plant cell response to Pb[J]. Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 1993, 62:101-105.
- [26] Weckx J E, Clifsters H M M. Zn phytotoxicity induces oxidative stress in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1997, 35(5):405-410.
- [27] Mazhoudi S, Chaoui A, Ghorbal M H, et al. Response of antioxidant enzymes to excess copper in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) [J]. Plant Science, 1997, 127:129-137.
- [28] Spickett C M, Smirnov N, Ratcliffe R G. Metabolic responses of maize roots to hyperosmotic shock[J]. Plant Physiol, 1992, 99: 856-863.
- [29] 彭立新, 李德全, 束怀瑞. 植物在渗透胁迫下的渗透调节作用[J]. 天津农业科学, 2002, 8(1):40-43.
- [30] 王娟, 李健全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢[J]. 植物学通报, 2001, 18(4):459-465.
- [31] 韩豫, 曹莹, 王绍斌, 等. 铅胁迫对花生生理生化特性的影响[J]. 花生学报, 2007, 36(1):24-27.
- [32] 丁海东, 朱为民, 杨少军, 等. 镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及脯氨酸和谷胱甘肽含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2005, 21(3):191-196.
- [33] Costa G, Spitz E. Influence of cadmium on soluble carbohydrates, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus* [J]. Plant Sci, 1997, 128: 131-140.
- [34] Prasad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants [J]. Environ & Exp Bot, 1995, 35(4): 525-545.
- [35] Tang Z C. The accumulation of free proline and its roles in water-stressed sorghum seedlings[J]. Acta Phytology Sin, 1989, 15(1): 105-110.
- [36] Schat H, Sharma S S, Vooijs R. Heavy metal-induced accumulation of free proline in a metal-tolerant and a nontolerant ecotype of *Silene vulgaris*[J]. Physiol Planta, 1997, 101: 477-482.
- [37] 冀宪领, 盖英萍, 刘训理, 等. 干旱胁迫对桑树生理生化特性的影响[J]. 蚕业科学, 2004, 30(2):117-122.
- [38] 吴桂容, 严重玲. 镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(5):1003-1008.
- [39] 李兆君, 马国瑞, 徐建民, 等. 植物适应重金属 Cd 胁迫的生理及分子生物学机理[J]. 土壤通报, 2004, 35(2):234-238.
- [40] 孙赛初, 王焕校, 李启任. 水生维管束植物受镉污染后的生理变化及受害机制初探[J]. 植物生理学报, 1985, 11(2):113-121.

(责任编辑:彭南轩)