

段瑞军, 吴朝波, 王 蕾, 等. 镉胁迫对海雀稗脯氨酸、可溶性糖和叶绿素含量及氮、磷、钾吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 357-361.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.02.019

## 镉胁迫对海雀稗脯氨酸、可溶性糖和叶绿素含量及氮、磷、钾吸收的影响

段瑞军<sup>1</sup>, 吴朝波<sup>1,2</sup>, 王 蕾<sup>1,3</sup>, 郭建春<sup>1</sup>, 符少萍<sup>1</sup>, 刘 姣<sup>1</sup>, 李瑞梅<sup>1</sup>

(1. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南 海口 571101; 2. 海南大学农学院, 海南 海口 571101; 3. 海南大学园林园艺学院, 海南 海口 571101)

**摘要:** 为了探究海雀稗的耐镉生理基础, 通过盆栽试验, 研究了不同镉浓度(0 mg/kg、1 mg/kg、10 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg、200 mg/kg)胁迫下, 海雀稗叶绿素、可溶性糖、脯氨酸及氮、磷、钾含量的变化。在镉浓度为 100 mg/kg 时海雀稗叶片叶绿素含量显著减少, 可溶性糖含量明显增加, 脯氨酸含量增加不明显, 氮、磷积累量减少明显, 而钾含量无明显减少。说明, 可溶性糖、叶绿素含量的变化可作为评价海雀稗受镉胁迫的重要生理指标; 可溶性糖含量和钾积累量保持较高水平有利于增强海雀稗的耐镉性; 在利用海雀稗进行镉污染土壤修复治理时应该适当增加氮肥、磷肥的施用。

**关键词:** 海雀稗; 镉; 可溶性糖; 叶绿素含量; 氮磷钾

**中图分类号:** Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)02-0357-05

## Contents of proline, soluble sugar, and chlorophyll and accumulations of nitrogen, phosphorus and potassium in *Paspalum vaginatum* Sw. in response to Cd stress

DUAN Rui-jun<sup>1</sup>, WU Chao-bo<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,3</sup>, GUO Jian-chun<sup>1</sup>, FU Shao-ping<sup>1</sup>, LIU Jiao<sup>1</sup>, LI Rui-mei<sup>1</sup>

(1. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, China Academy of Tropical Agricultural Science, Haikou 571101, China; 2. College of Agriculture, Hainan University, Haikou 571101, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Hainan University, Haikou 571101, China)

**Abstract:** To study the physiological responses and nutrient accumulations in *Paspalum vaginatum* Sw. to Cd stress, the changes in the contents of proline, soluble sugar, chlorophyll and the accumulations of nitrogen, phosphorus and potassium under the stress of Cd (0 mg/kg, 1 mg/kg, 10 mg/kg, 50 mg/kg, 100 mg/kg, 200 mg/kg) were analyzed. In response to Cd stress at 100 mg/kg, chlorophyll content decreased significantly, soluble sugar content increased obviously, and proline content remained a high level, suggesting that soluble sugar content and chlorophyll content could be used as physiological indicators of Cd injury. In response to Cd stress at 100 mg/kg, accumulations of nitrogen and phosphorus reduced, indicating that nitrogen and phosphorus fertilization should be increased during remediation of Cd-polluted soil. The high levels of soluble sugar content and potassium accumulation were favorable for improving Cd tolerance of *P. vaginatum*.

**Key words:** *Paspalum vaginatum* Sw.; Cd; soluble sugar; chlorophyll content; nitrogen; phosphorus and potassium

收稿日期: 2015-08-15

基金项目: 中央公益性科研院所基本科研业务专项基金(IT-BB2015ZD03、1630052015038); 中国农科科技社团联合体青年人才托举工程项目

作者简介: 段瑞军(1978-), 男, 云南大理人, 博士, 副研究员, 主要从事植物抗逆分子育种。(E-mail) lshj26@163.com

中国土壤耕地无机污染物中以重金属最为严重,镉(Cd)是土壤重金属污染物中污染面积最大、污染程度最为严重的污染物之一<sup>[1-6]</sup>。镉具有毒性强、毒性持久、易扩散等特点,较低浓度的镉往往能使大多数植物受到毒害,镉极易通过植物进入食物链,被人和动物吸收,危害健康。目前,通过在镉污染的土壤中种植能吸附镉的植物,进而将土壤中的镉转移到植物中,使土壤中的镉降低到安全限度以内,同时对植物中的镉进行回收利用等无害化处理,使之不造成二次污染,已成为研究的热点。镉毒害会影响植物对营养物质的吸收,但植物也能通过一系列的生理响应来减轻镉的毒害。叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,重金属胁迫会破坏植物叶片中的叶绿体结构,致使叶绿素含量降低,严重者叶片整体褪绿<sup>[7-8]</sup>。脯氨酸、可溶性糖作为植物最重要的渗透调节物质,对于维持细胞内的渗透压及膜结构的完整性具有重要作用,逆境下植物脯氨酸和可溶性糖大量积累对植物适应逆境有重要意义<sup>[9]</sup>。氮、磷、钾是植物必须的三大营养元素,镉胁迫能影响植物对其的吸收<sup>[10]</sup>。

海雀稗(*Paspalum vaginatum* SW.)属于禾本科多年生草本植物,主要生长于滨海潮湿沙地、江河入海口、湿地,常独立成片生长为优势种群。海雀稗具有极强的耐荫、耐旱、耐盐碱、耐湿能力,是饲料、草坪和盐碱地改良的理想植物<sup>[11]</sup>,对重金属铅、锌也具有一定的耐受性<sup>[12-14]</sup>。

本实验室通过设置不同浓度的镉对海雀稗进行处理,研究镉胁迫对海雀稗脯氨酸、可溶性糖和叶绿素含量及氮磷钾吸收的影响,有助于了解海雀稗的耐镉生理基础,并为利用海雀稗进行修复镉污染的土壤提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

海雀稗于2015年3月初采自海南省文昌市铺前镇潭揽村。主要试剂: CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O、甲苯、磷酸、脯氨酸、磺基水杨酸、酸性茚三酮、葡萄糖、醋酸铅、草酸钠、丙酮、乙醇、硫酸、过氧化氢等。

### 1.2 试验方法

本试验于2015年3月在中国热带农业科学院热带生物技术研究 所内进行,设置6个镉浓度:0 mg/kg、1 mg/kg、10 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg、

200 mg/kg,3次重复,静置一周。将海雀稗截取2个茎段,3个芽点,扦插于已处理好的土壤中,每箱12株,70 d后,于5月取样测定海雀稗叶片中叶绿素含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量。同时取植株于105℃下杀青30 min后,于85℃下烘干至恒质量,用于N、P、K的测定。

### 1.3 测定方法

叶绿素含量的测定采用乙醇丙酮提取法<sup>[15]</sup>;脯氨酸含量测定采用茚三酮法<sup>[16]</sup>;可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法<sup>[16]</sup>;N、P、K含量的测定参照鲁如坤编著的《土壤农业化学分析方法》<sup>[17]</sup>。

### 1.4 数据处理

用Excel 2003整理试验数据、绘制图表;用SPSS 13.0进行方差分析和多重比较,于P<0.05水平进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 镉胁迫下海雀稗叶片叶绿素含量的变化

从图1可见,镉胁迫下,海雀稗叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总量都呈先增加后减少的变化趋势,镉浓度为1 mg/kg时,海雀稗叶绿素a比对照增加了26.08%;镉浓度大于10 mg/kg时,随镉浓度的增加,海雀稗叶绿素a逐渐减少;镉浓度为100 mg/kg时,海雀稗叶绿素a含量显著减少,比对照减少了79.67%。在镉浓度为0~50 mg/kg,海雀稗叶绿素b含量随镉浓度增加而增加,镉浓度为50 mg/kg时,海雀稗叶绿素b含量达到最大,比对照增加48.52%;镉浓度为100~200 mg/kg时,叶绿素b含量较对照有所减少。海雀稗叶绿素总量在镉浓度为0~50 mg/kg时均比对照有所增加,且在镉浓度为1 mg/kg时,由于叶绿素a和叶绿素b含量的增加,叶绿素总量较对照显著增加,比对照增加了29.88%;镉浓度大于100 mg/kg时,海雀稗叶绿素总量显著减少,当镉浓度为200 mg/kg时,其含量仅为对照的22.48%。说明,海雀稗在镉浓度为0~50 mg/kg时,叶绿素a、叶绿素b受镉毒害作用较小,而在镉浓度大于100 mg/kg时,镉毒害严重破坏了海雀稗叶绿体结构,使叶绿素合成受阻。

### 2.2 镉胁迫下海雀稗叶片中脯氨酸含量的变化

从图2可见,对照海雀稗叶片中脯氨酸含量为23.33 mg/kg,在镉浓度为1~10 mg/kg时,脯氨酸含量较对照有所减少;当镉浓度为50~100 mg/kg时,

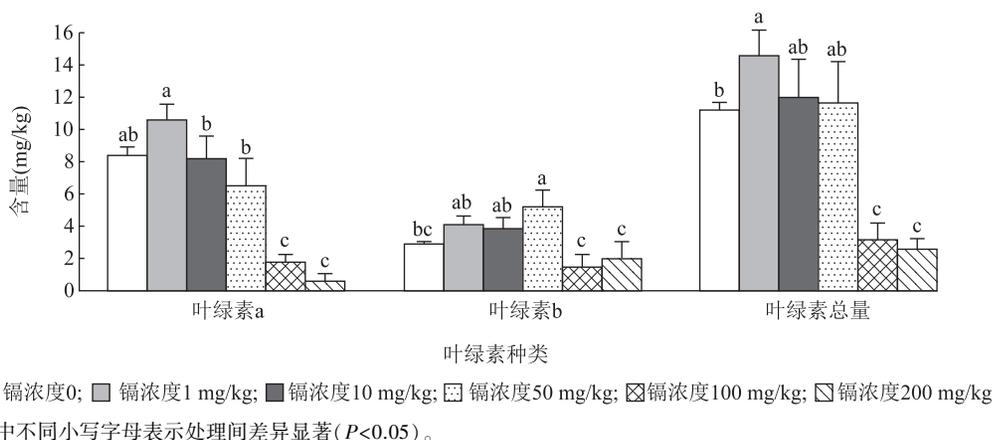
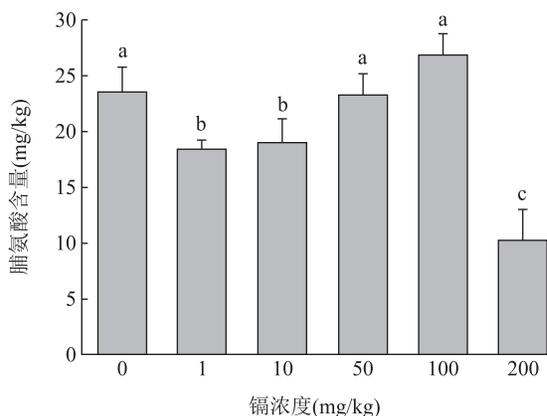


图1 镉胁迫对海雀稗色素含量的影响

Fig.1 Effect of Cd on the photosynthetic pigments in the leaves of *Paspalum vaginatum*

叶片脯氨酸含量与对照相比无明显变化,在镉浓度为 100 mg/kg 时,叶片脯氨酸含量较对照增加了 12.68%,达到最大值;当镉浓度为 200 mg/kg 时,叶片脯氨酸较对照显著减少了 56.54%。说明一定浓度范围内(1~100 mg/kg)的镉浓度有利于脯氨酸的积累,较高镉浓度(200 mg/kg)胁迫抑制脯氨酸的积累。



图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

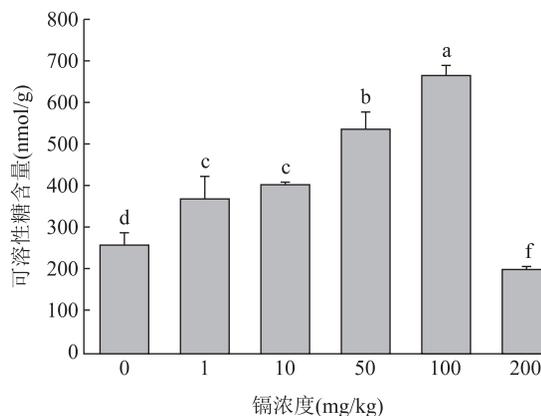
图2 镉胁迫对海雀稗脯氨酸含量的影响

Fig.2 The effect of Cd on proline contents of *P. vaginatum*

### 2.3 镉胁迫下海雀稗叶片中可溶性糖含量的变化

从图3可见,海雀稗在未使用镉试剂处理下,叶片可溶性糖含量为 257.62 nmol/g。镉胁迫处理下,当镉浓度为 1~100 mg/kg 时,叶片可溶性糖含量随镉浓度的增加显著增加。当镉浓度为 100 mg/kg,海雀稗叶片中可溶性糖含量达到最大,为对照的 2.6 倍。当镉浓度为 200 mg/kg 时,叶片可溶性糖

显著减少,其含量仅为对照的 78.48%。



图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

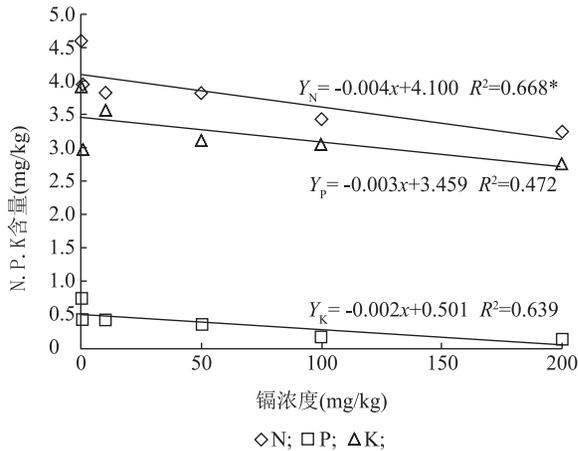
图3 镉胁迫对海雀稗可溶性糖含量的影响

Fig.3 The effect of Cd on the contents of soluble sugar of *P. vaginatum*

### 2.4 镉胁迫下海雀稗植株 N、P、K 含量的变化

海雀稗对 N、P、K 的积累与镉胁迫浓度的增加呈负相关(图4)。从图4可见,海雀稗在各镉浓度处理下,N、P、K 的积累量表现为  $N>K>P$ ;N 的积累量呈显著减少趋势( $P<0.05$ ),在未使用镉试剂处理时,海雀稗植株 N 积累量为 4.59 mg/kg,当镉浓度为 200 mg/kg 时,N 积累量减少到 3.24 mg/kg,较对照减少了 29.41%。未用镉试剂处理时海雀稗植株中 K 的积累量为 3.43 mg/kg,镉对海雀稗 K 积累抑制不显著,当镉浓度为 200 mg/kg 时,植株中 K 积累量为 2.76 mg/kg,仅较对照减少 19.53%。对照海雀稗植株对 P 的积累为 0.74 mg/kg,当镉浓度为 200 mg/kg 时,植株中 P 积累量较对照减少了

73.78%。说明,镉处理对海雀稗营养元素(N、P、K)的吸收有抑制效应,随镉处理浓度的增加,抑制越明显,且对N、P的吸收抑制较K大。



图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图4 镉对海雀稗N、P、K吸收的影响

Fig.4 Effects of Cd on N, P and K accumulations of *P. vaginatum*

### 3 讨论

#### 3.1 海雀稗叶绿素含量和海雀稗对镉的耐受性

叶绿素是光合作用的主要色素,能直接影响海雀稗的光合作用<sup>[18-19]</sup>。在小于50 mg/kg的镉浓度胁迫下海雀稗叶绿素含量无明显减少,其中叶绿素a呈先增加再减少的趋势,叶绿素b呈增加的趋势,因而海雀稗叶绿素总量减少是由于叶绿素a的合成受到抑制。叶绿素b增加、叶绿素a减少表明海雀稗叶片光接收能力未受到影响,而光能的转化能力有所减少,进而影响了海雀稗光能利用能力,但这种影响较小。当镉浓度大于100 mg/kg时,叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量显著减少,表明高浓度镉胁迫严重破坏了叶绿体的结构<sup>[20]</sup>,这与镉胁迫下水稻杂草稻叶绿素的变化相一致<sup>[21]</sup>。镉对海雀稗叶绿素影响明显,因此叶绿素可作为评价海雀稗受镉胁迫的重要指标。

#### 3.2 海雀稗可溶性糖含量、脯氨酸含量与海雀稗对镉的耐受性

可溶性糖和脯氨酸作为植物重要的渗透调节物质,逆境下其含量的变化有利于增强植物对逆境的适应能力。本试验中,随镉胁迫浓度的增大,可溶性糖含量增加,说明海雀稗细胞液的浓度增大,可提高

其渗透吸水能力,增加海雀稗对镉胁迫的适应能力,这与刘慧芹等对黑麦草的研究结果相一致<sup>[22]</sup>,但也有研究结果表明镉胁迫对某些作物可溶性糖含量的影响不大,如小麦<sup>[23]</sup>、凤眼莲<sup>[24]</sup>等。脯氨酸含量随镉浓度增加呈先减少后增加的变化趋势,这与烟草对镉胁迫的响应相一致<sup>[25]</sup>。海雀稗在1~10 mg/kg镉浓度处理下,脯氨酸含量显著减少,可能是此浓度镉未激活脯氨酸合成的相关酶类,镉致使合成的脯氨酸降解,随镉浓度增加,脯氨酸相关合成酶类被激活,脯氨酸合成增加<sup>[26]</sup>;当镉浓度为100 mg/kg时脯氨酸含量达到最大,但与对照相比增加不明显,这与郭晓音对秋茄的研究结果相似<sup>[27]</sup>。但已有研究结果表明,镉胁迫能导致番茄、亚麻籽体内脯氨酸大量积累,可达到对照脯氨酸含量的3~4倍<sup>[28-29]</sup>。当镉浓度为200 mg/kg时,海雀稗受镉毒害严重,可溶性糖含量和脯氨酸含量都显著减少,失去渗透调节能力。可以看出镉胁迫下,脯氨酸和可溶性糖的变化是复杂的,因植物种类的不同呈现不同的变化趋势。海雀稗在镉胁迫下可溶性糖含量增加明显,而脯氨酸含量并无明显变化,因此可溶性糖含量的变化可作为评价海雀稗受镉胁迫的重要指标。

#### 3.3 海雀稗对N、P、K的积累与海雀稗对镉的耐受性

营养元素N、P、K为植物必须的三大元素,对植物的生长发育具有重要作用,镉通过与养分竞争植物根系的吸收部位,干扰植物对养分的吸收和利用<sup>[30-31]</sup>。本研究中镉对N、P的积累影响较大,这与镉胁迫下黑麦草对N、P吸收相一致,可能由于:1、基质中高浓度的镉降低了N、P的有效态含量,导致植物对N、P的吸收含量减少。2、镉与N、P竞争根部的吸收部位,抑制了根系对N、P的吸收<sup>[32]</sup>。K是调节植物膨压和渗透压最丰富的离子<sup>[33]</sup>,本研究发现海雀稗对K的积累量并未随镉浓度增加呈现明显变化,表明海雀稗对K的吸收受镉的干扰较少,可能是K与镉之间的交互作用较小。这与镉胁迫对旱柳K的吸收结果相似<sup>[34]</sup>,但圭亚那柱花草对K的积累随镉胁迫增加而减少<sup>[35]</sup>。因而在利用海雀稗进行镉污染土壤修复治理时应该适当增加N素、P素的施用。

海雀稗在各浓度镉胁迫下,其叶绿素含量在镉浓度达100 mg/kg时显著减少,当镉浓度小于100 mg/kg时,可溶性糖增加明显,脯氨酸无明显增加,

表明镉能迁移到海雀稗叶片中,对海雀稗生理活动产生影响。且可溶性糖含量、叶绿素含量可作为评价海雀稗受镉胁迫的重要指标。镉胁迫条件下海雀稗 K 含量未明显减少,说明 K 对增强海雀稗对镉的耐受性具有重要作用;海雀稗 N、P 的积累随镉胁迫增加减少明显,因而在利用海雀稗进行镉污染修复时应适当增加 N 素、P 素,以满足海雀稗对 N 素、P 素的需求。

### 参考文献:

- [1] 刘玮宁,张炜哲. 罗锡文院士谈因污染而导致的食品安全问题,3 亿亩地遭重金属污染 广东仅一成耕地幸免 [N]. 羊城晚报, 2011-10-12(A3).
- [2] 史景允,于伟红,梁秋生. 蓖麻对镉污染土壤的修复潜力[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(11): 386-388.
- [3] 卢红玲,肖光辉,刘青山,等. 土壤镉污染现状及其治理措施研究进展[J]. 南方农业学报, 2014, 45(11): 1986-1993.
- [4] 孙正国. 龙葵对镉污染土壤的响应及其修复效应研究[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 397-401.
- [5] 佟 讯. 全国土壤污染状况调查公报发布 [N]. 中国国土资源报, 2014-04-18(1).
- [6] 陈桂芬,雷 静,黄雁飞,等. 广西稻田镉污染状况及硅对稻米镉的消减作用[J]. 南方农业学报, 2015, 46(5): 772-776.
- [7] 姜永雷,唐 探,陈嘉裔,等. 镉胁迫对水蕨幼苗叶绿素荧光参数和生理指标的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 357-360.
- [8] 丁晓辉,任丽萍,张春荣,等. Cd<sup>2+</sup>胁迫对紫花苜蓿叶绿素和可溶性糖含量的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(S1): 64-66.
- [9] 李合生. 现代植物生理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [10] 刘柿良,石新生,潘远智. 镉胁迫对长春花生长,生物量及养分积累与分配的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 154-160.
- [11] 罗小波,向佐湘,胡立群. 09-1 海滨雀稗草坪坪用性状评价[J]. 作物研究, 2013(S1): 57-61.
- [12] 王 恺,刘一明,王兆龙. 假俭草和海滨雀稗对土壤铅污染胁迫的生理反应[J]. 草业科学, 2010, 27(2): 32-38.
- [13] 王 恺. 假俭草和海滨雀稗对土壤 Pb、Cd、Zn 污染胁迫的响应及耐受阈值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [14] 朱燕华. 草坪植物对铅的耐性及富集特性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007.
- [15] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [16] 李合生,孙 群,赵世杰,等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 张 杰,梁永超,娄运生,等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 774-780.
- [19] 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.
- [20] 彭 鸣,王焕校,吴玉树. 镉、铅诱导的玉米(*Zea mays* L.) 幼苗细胞超微结构的变化[J]. 中国环境科学, 1991, 11(6): 426-431.
- [21] 王 欣,周守标,程龙玲,等. 水稻和杂草稻对镉胁迫反应的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 661-666.
- [22] 刘慧芹,韩巨才,刘慧平,等. 铅梯度胁迫对多年生黑麦草幼苗生理生化特性影响[J]. 草业学报, 2012, 21(6): 57-63.
- [23] 杨居荣,贺建群,蒋婉茹. Cd 污染对植物生理生化的影响[J]. 农业环境保护, 1995, 14(5): 193-197.
- [24] 王焕校. 污染生态学基础[M]. 云南: 云南大学出版社, 1990: 71-148.
- [25] 张 浩,陆 宁,钱晓刚,等. 不同类型土壤重金属胁迫对烟叶脯氨酸含量的影响[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(1): 127-131.
- [26] 李 翠. 重金属离子诱导植物脯氨酸积累机制及生理意义[J]. 德宏师范高等专科学校学报, 2009, 18(3): 103-106.
- [27] 郭晓音,严重玲,叶彬彬. 镉锌复合胁迫对秋茄幼苗渗透调节物质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(3): 308-312.
- [28] LIU K B, LI S X. Effects of NaCl on elements balance, peroxidase isozyme and protein banding patterns of *Lycopersicon* leaf cultures and regenerated shoots[J]. *Scientia Horticulturae*, 1991, 46: 97-107.
- [29] CHAKRAVARTY B, SRIVASTAVA S. Effects of genotype and explant during in vitro response to cadmium stress and variation in protein and proline contents in Linseed[J]. *Annals of Botany*, 1997, 79: 487-491.
- [30] CHAFFEI C, PAGEAU K, SUZUKI A, et al. Cadmium toxicity induced changes in nitrogen management in *Lycopersicon esculentum* leading to a metabolic safeguard through an amino acid storage strategy [J]. *Plant Cell Physiol*, 2004, 45(11): 1681-1693.
- [31] RAMOS I, ESTEBAN E, LUCENA J J, et al. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca* sp. Cd-Mn interaction[J]. *Plant Science*, 2002, 162(5): 761-767.
- [32] 安志装,王校常,施卫明,等. 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 392-396.
- [33] ALAOUI-SOSSÉ B, GENET P, VINIT-DUNAND F, et al. Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents[J]. *Scripta Metallurgica Et Materialia*, 2004, 166(5): 1213-1218.
- [34] 杨卫东,陈益泰,王树凤. 镉胁迫对旱柳矿质营养吸收的影响[J]. 林业科学研究, 2009, 22(3): 618-622.
- [35] 黄秋磊,黄冬芬,刘国道. 镉胁迫对 3 个品种圭亚那柱花草积累和矿质养分吸收的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(4): 598-602.

(责任编辑:陈海霞)