

# Se 胁迫条件下 EDDS 对彩叶草生长和生理指标及 Se 含量的影响

袁菊红<sup>①</sup>

(江西财经大学艺术学院园林系, 江西 南昌 330032)

**摘要:** 采用室内水培法,研究了在  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Se 胁迫条件下添加  $0.0$  (CK)、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.5$  和  $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  乙二胺二琥珀酸(EDDS)对彩叶草(*Coleus blumei* Benth.)鲜质量及部分生理指标的影响,并对相同条件下彩叶草各器官的 Se 含量以及 Se 富集系数和转运系数进行了分析。分析结果表明:在  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Se 胁迫条件下,添加  $0.5 \sim 1.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS,彩叶草根、茎和叶的鲜质量均明显高于对照;而添加  $2.5$  和  $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS,各器官的鲜质量均低于对照;总体上,随 EDDS 浓度的提高,彩叶草根、茎、叶的鲜质量逐渐下降。随着 EDDS 浓度的提高,彩叶草根中的 MDA 含量逐渐增加但均显著低于对照;而随 EDDS 浓度的提高,叶中的 SOD、CAT 和 APX 活性均呈低浓度时降低、高浓度时升高的趋势,而 GSH 含量、POD 和 GSH-Px 活性则呈低浓度时升高、高浓度时降低的趋势。添加  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS,彩叶草叶片中的 SOD、CAT 和 APX 活性均降至最低且显著低于对照,而 GSH 含量、POD 和 GSH-Px 活性则达到最高值且显著高于对照。随 EDDS 浓度的提高,彩叶草根、茎和叶中的 Se 含量以及 Se 富集系数和转运系数均呈低浓度时升高、高浓度时降低的趋势;各处理组彩叶草根中的 Se 含量明显高于茎和叶,茎中的 Se 含量则略高于叶;添加  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS,根、茎和叶中的 Se 含量以及富集系数和转运系数均达到最高值且显著高于对照。实验结果表明:添加适宜浓度的 EDDS 可增加彩叶草对 Se 的吸收及富集能力,有利于 Se 污染土壤的修复,且对彩叶草的生长及代谢无明显影响。

**关键词:** EDDS; Se 胁迫; 彩叶草; 生理指标; 富集系数; 转运系数

**中图分类号:** Q945.78; X174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7895(2012)04-0087-07

**Effects of EDDS on growth, physiological indexes and Se content of *Coleus blumei* under Se stress**  
YUAN Ju-hong<sup>①</sup> (Department of Landscape Architecture, College of Arts, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2012, **21**(4): 87-93

**Abstract:** Effects of adding  $0.0$  (CK),  $0.5$ ,  $1.0$ ,  $1.5$ ,  $2.5$  and  $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  [S, S]-ethylenediamine disuccinic acid (EDDS) on fresh weight and some physiological indexes of *Coleus blumei* Benth. under  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Se stress were studied by indoor solution culture method, and Se contents in different organs and Se enrichment or translocation coefficients of *C. blumei* were analyzed under the same experimental conditions. The results show that when adding  $0.5-1.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS under  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Se stress, fresh weights of root, stem and leaf of *C. blumei* are obviously higher than those of the control, while, when adding  $2.5$  and  $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS, fresh weights of organs are all lower than those of the control. Generally, fresh weights of root, stem and leaf of *C. blumei* decrease gradually with rising of EDDS concentration. With rising of EDDS concentration, MDA contents in root of *C. blumei* increase gradually but all are significantly lower than those of the control. With rising of EDDS concentration, activities of SOD, CAT and APX in leaf of *C. blumei* appear the trend of decreasing at low concentration and increasing at high concentration, while GSH content and activities of POD and GSH-Px appear the trend of increasing at low concentration and decreasing at high concentration. Under condition of adding  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS, activities of SOD, CAT and APX in leaf of *C. blumei* all reach the

收稿日期: 2012-08-09

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(2009GQH0027); 江西省教育厅科技资助项目(GJJ10115)

作者简介: 袁菊红(1975—),女,湖南绥宁人,博士,讲师,主要从事观赏植物分类及其开发利用研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: yuanjuhong@sina.com.cn

lowest and are significantly lower than those of the control, while GSH content and activities of POD and GSH-Px reach the highest and are significantly higher than those of the control. With rising of EDDS concentration, Se contents in root, stem and leaf of *C. blumei* and Se enrichment and translocation coefficients all appear the trend of increasing at low concentration and decreasing at high concentration. And Se content in root is obviously higher than that in stem and leaf, but that in stem is slightly higher than that in leaf. Under condition of adding  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS, Se contents in root, stem and leaf and Se enrichment and translocation coefficients reach the highest and all are significantly higher than those of the control. It is suggested that adding EDDS with suitable concentration may enhance the ability of *C. blumei* to uptake and enrichment Se and is beneficial to repair soil contaminated by Se, and has no obvious influence on growth and metabolism of *C. blumei*.

**Key words:** EDDS; Se stress; *Coleus blumei* Benth.; physiological index; enrichment coefficient; translocation coefficient

近年来,随着工农业和社会经济的迅速发展,大量重金属通过大气沉降、地表径流、垃圾转移等途径进入土壤、河流、湖泊和海洋等生态系统,对生态环境产生危害。重金属是一种难以控制的污染物,具有来源广、毒性大、潜伏期长等特点,且能沿食物链富集和放大,因此,较低浓度的重金属污染便可能损害自然生态系统和人体健康<sup>[1]</sup>。有效减少和修复重金属污染,缓解其对人体、生物和生态环境的危害,是当今生态环境研究领域面临的难题之一<sup>[2]</sup>。

硒(Se)是人、动物和微生物的必需营养元素,也是植物生长发育的有益元素,一些地方性流行病(如克山病、大骨节病、动物白肌病和水肿病等)的发生均与人体中 Se 摄入量低有关<sup>[3]</sup>,Se 还能预防和抑制镉、砷、汞、银等有毒元素对机体的伤害<sup>[4-5]</sup>;但如果 Se 吸收过量,会导致人中毒,引起胃肠功能紊乱。此外,Se 对大气、水体和土壤也会造成一定的污染。如美国西南地区的 Se 污染较严重,土壤和水中 Se 含量很高,导致鱼类和水禽畸变和死亡<sup>[6]</sup>;加拿大安大略湖、墨西哥奇瓦瓦地区和波兰托伦市也都因 Se 污染引起土壤、地表水和水生生物中的 Se 含量严重超标<sup>[7]</sup>。中国土壤总体缺 Se,但湖北恩施<sup>[8]</sup>和陕西紫阳<sup>[9]</sup>为典型的富 Se 地区,因 Se 污染中毒的案例时有发生,例如恩施鱼塘坝人群 Se 中毒的爆发性流行<sup>[10-11]</sup>。目前,Se 污染已对人类健康和环境安全产生严重威胁,国外学者在 Se 富集植物的调查、生态毒理以及 Se 污染的植物修复方面做了大量的研究工作<sup>[12-13]</sup>,但国内研究者在此领域的研究尚处于起步阶段,相关报道较少<sup>[14]</sup>。

目前,螯合诱导技术已成为重金属污染环境修复的热点,有关螯合剂乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)<sup>[15]</sup>、二乙烯三胺五乙酸

(diethylene triamine pentacetate acid, DTPA)<sup>[16]</sup>和氮三乙酸(nitritotriacetic acid, NTA)<sup>[17]</sup>等诱导植物吸收重金属的研究已有大量报道,但这些螯合剂在环境中非常稳定且不易降解,具有较长的残留效应,同时还对地下水及周边环境造成二次污染。因此,选择适宜的螯合剂是诱导植物修复技术成功的关键。近年来,EDTA 的一种可生物降解的结构异构体乙二胺二琥珀酸([S,S]-ethylenediamine disuccinic acid, EDDS)已成为螯合诱导技术研究的热点并被广泛应用于重金属污染修复<sup>[18-20]</sup>。

彩叶草(*Coleus blumei* Benth.)也称五彩苏、五色草、锦紫苏,为唇形科(Lamiaceae)鞘蕊花属(*Coleus* Lour.)多年生草本植物,原产爪哇岛,广泛分布于非洲和亚洲,其耐热、耐寒,并对光照有较强的适应性,是一种喜湿的旱生植物。彩叶草不仅能去除富营养化水体中的氮和磷等营养盐<sup>[21]</sup>、抑制水体中藻类的繁殖<sup>[22]</sup>,还对重金属镉、铝污染等具有良好的耐受性、吸收性和累积性<sup>[23-24]</sup>。但彩叶草对 Se 的吸收能力尚不明确。

鉴于此,作者采用室内水培法研究不同浓度生物可降解螯合剂 EDDS 对  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Se 胁迫条件下彩叶草生长和生理指标以及 Se 含量、Se 富集系数和转运系数的影响,以期对 Se 污染植物修复过程中彩叶草及 EDDS 的应用提供实验依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试彩叶草扦插苗购自江西南昌花鸟市场。将彩叶草幼苗从土壤中拔出,用自来水洗净根系上的土壤(尽量不损伤根系)后,用自来水预培养 15 d 左右,

换用1/2Hoagland营养液培养2周后进行实验。

## 1.2 方法

1.2.1 处理方法 实验于2011年10月20日至11月15日在江西财经大学生态环境实验中心进行。按赵兰枝等<sup>[25]</sup>的配方配制基础完全营养液,组成成分包括 $3.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $4.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{KNO}_3$ 、 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MgSO}_4$ 、 $3.6\times 10^{-3}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MnCl}_2$ 、 $4.5\times 10^{-2}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{H}_2\text{BO}_3$ 、 $8\times 10^{-4}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CuCl}_2$ 、 $1.5\times 10^{-3}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ZnCl}_2$ 、 $1.4\times 10^{-5}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 和 $9.0\times 10^{-2}\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe-EDTANa}_2$ 。选取茎粗和株高基本一致、生长健壮、无病虫害且叶片颜色基本一致的彩叶草幼苗,定植于7孔PVC板(孔径32 mm)上,每孔定植4株[总质量约 $(25\pm 2)\text{ g}$ ] ,然后置于盛有5 L基础完全营养液的塑料桶中培养。培养10 d(即10月30日)后更换基础完全营养液,并进行EDDS和Se胁迫处理。EDDS共设置6个处理水平:0.0(对照,CK)、0.5、1.0、1.5、2.5和 $5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,将EDDS直接加入基础完全营养液中;Se质量浓度为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,以 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 形式直接加入上述6种处理液中。每处理28株,各重复4次,即每处理总株数为112株,随机排列,在自然温度和光照条件下培养,并监测实验期间的温度变化。每隔5 d更换1次处理液,共更换3次处理液,培养期间进行连续曝气。处理15 d(即11月15日)后采样进行各项指标测定。

1.2.2 生理指标测定方法 分别采集各处理组所有彩叶草植株的根和不同部位叶片,洗净后混合,直接用于各项生理指标的测定。采用硫代巴比妥酸法<sup>[26]</sup>测定根系中丙二醛(MDA)含量;采用考马斯亮蓝G-250染色法<sup>[27]</sup>测定叶片中可溶性蛋白质(Pro)含量;采用氯化硝基氮蓝四唑光化还原法<sup>[28]</sup>测定叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚比色法<sup>[28]</sup>测定叶片中过氧化物酶(POD)活性;采用紫外分光光度法<sup>[29]</sup>测定叶片中过氧化氢酶(CAT)活性;采用Nakano等<sup>[30]</sup>的方法测定叶片中抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性;采用邱睿等<sup>[31]</sup>的方法测定叶片中还原型谷胱甘肽(GSH)含量及谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性。

1.2.3 不同器官鲜质量及Se含量的测定方法 用不锈钢剪刀将彩叶草的根、茎、叶分离,用自来水冲洗干净后,用去离子水冲洗多次并用滤纸吸干表面水分,用BS224S型千分之一电子天平(德国赛多利斯公

司)称量鲜质量。将各器官样品于 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量,研磨成粉后用于Se含量测定。Se含量测定参照陈思杨等<sup>[32]</sup>的方法,样品粉末用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 进行消化,采用电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)测定Se含量,待测样品送至浙江大学污染环境修复与生态环境教育部重点实验室进行分析。

## 1.3 数据统计及分析

参照段曼莉等<sup>[33]</sup>的方法、根据不同器官的Se含量计算彩叶草中Se的富集系数和转运系数。地上部富集系数 $BCF=C_{\text{地上部分}}/C_{\text{处理液}}=(C_{\text{茎}}+C_{\text{叶}})/C_{\text{处理液}}$ ;转运系数 $TF=C_{\text{地上部分}}/C_{\text{地下部分}}=(C_{\text{茎}}+C_{\text{叶}})/C_{\text{根}}$ 。式中,C表示不同部位或器官中的Se含量;因处理液中添加 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Se}$ , $C_{\text{处理液}}$ 即为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

应用Excel 2003和SPSS 17.0统计分析软件对实验数据进行统计和方差分析并作图。

## 2 结果和分析

### 2.1 EDDS对Se胁迫条件下彩叶草鲜质量的影响

实验期间,室内温度基本保持在 $11\text{ }^\circ\text{C}\sim 21\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,完全适宜彩叶草的正常生长。从彩叶草的整体生长情况来看:实验前期室内光照充足,植株叶色鲜艳;但实验后期高浓度EDDS处理组彩叶草的叶色明显变黄甚至枯萎。

从培养15 d后各处理组彩叶草不同器官的鲜质量(表1)可见:在 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Se}$ 胁迫条件下,添加 $0.5\sim 1.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{EDDS}$ 可促进彩叶草的生长,而添加 $2.5$ 和 $5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{EDDS}$ 则抑制彩叶草生长。

表1 不同浓度EDDS对 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Se}$ 胁迫条件下彩叶草不同器官鲜质量的影响( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Effect of EDDS with different concentrations on fresh weight of different organs of *Coleus blumei* Benth. under  $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Se}$  stress ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

EDDS 浓度/ mmol·L <sup>-1</sup> EDDS concentration	不同器官鲜质量/g Fresh weight of different organs		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
0.0 (CK)	10.204±1.065bc	69.518±1.907cd	64.366±1.514c
0.5	15.091±0.514a	78.924±1.651a	74.969±1.814a
1.0	13.606±0.651a	74.945±1.965ab	71.154±1.414ab
1.5	11.046±0.907b	74.336±1.514bc	70.857±1.651b
2.5	9.983±0.607bc	65.823±1.614d	61.329±1.651cd
5.0	9.504±0.514c	64.016±1.514d	59.128±1.514d

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

添加 0.5 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS,彩叶草根、茎、叶的鲜质量均显著高于对照 ( $P < 0.05$ ),分别比对照高 47.9%、13.5% 和 16.5%。随着处理液中 EDDS 浓度的提高,彩叶草根、茎和叶的鲜质量均持续下降;在添加 2.5 和 5.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 的条件下,彩叶草各器官的鲜质量均小于对照但差异较小。

## 2.2 EDDS 对 Se 胁迫条件下彩叶草一些生理指标的影响

在 1.0 mg · L<sup>-1</sup> Se 胁迫条件下添加不同浓度 EDDS 对彩叶草根 MDA 含量及叶片中一些生理指标的影响分别见表 2 和表 3。

表 2 不同浓度 EDDS 对 1.0 mg · L<sup>-1</sup> Se 胁迫条件下彩叶草根 MDA 含量的影响 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>  
Table 2 Effect of EDDS with different concentrations on MDA content in root of *Coleus blumei* Benth. under 1.0 mg · L<sup>-1</sup> Se stress ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

EDDS 浓度/mmol · L <sup>-1</sup> EDDS concentration	MDA 含量/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content
0.0 (CK)	0.029 9±0.001 4a
0.5	0.010 0±0.000 9c
1.0	0.010 1±0.000 7c
1.5	0.010 2±0.000 6c
2.5	0.011 6±0.000 8b
5.0	0.012 6±0.000 7b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ).

由表 2 可见:在 Se 胁迫条件下,添加不同浓度 EDDS 可显著降低彩叶草根系中的 MDA 含量,从而缓解或降低 Se 胁迫对彩叶草的毒害。随 EDDS 浓度的提高,MDA 含量逐渐增加但均显著低于对照;在添加 0.5、1.0 和 1.5 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 的条件下,MDA 含量增加幅度很小且 3 个处理组间差异不显著,而在添加

2.5 和 5.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 的条件下,MDA 含量显著高于低浓度处理组。

由表 3 可见:在 Se 胁迫条件下,添加 0.0 ~ 5.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS,彩叶草叶片中 SOD、CAT 和 APX 活性均随着 EDDS 浓度的提高呈现先降低后升高的变化趋势。在添加 1.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 的条件下,这 3 种酶的活性降到最低值,分别比对照降低了 32.5%、35.5% 和 66.2%,差异显著 ( $P < 0.05$ );在添加 5.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 的条件下,SOD 和 CAT 活性高于对照,而 APX 活性则低于对照。

在 Se 胁迫条件下,添加 0.0 ~ 5.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS,彩叶草叶片的 GSH 含量以及 POD 和 GSH-Px 活性变化均呈现先上升后下降的趋势。在添加 1.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 条件下,彩叶草叶片中 GSH 含量最高且显著高于对照,增幅达 42.1%;在添加 1.5 ~ 5.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 的条件下,随 EDDS 浓度的提高,叶片中 GSH 含量明显降低,但均高于对照。在添加 1.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 的条件下,彩叶草叶片中 POD 和 GSH-Px 活性均达到最高值,不仅显著高于对照也显著高于其他 EDDS 处理组 ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 EDDS 对 Se 胁迫条件下彩叶草体内 Se 含量及 Se 富集和转运系数的影响

在 1.0 mg · L<sup>-1</sup> Se 胁迫条件下添加不同浓度 EDDS,彩叶草不同器官的 Se 含量及其富集和转运系数见表 4。

由表 4 可以看出:在 Se 胁迫条件下,添加 0.5 ~ 5.0 mmol · L<sup>-1</sup>EDDS 后,彩叶草根、茎、叶各器官中的 Se 含量以及地上部 Se 富集系数和转运系数的变化趋势基本一致,均随 EDDS 浓度提高呈先升后降的趋势。在低浓度(0.0 ~ 1.0 mmol · L<sup>-1</sup>)EDDS 条件下,

表 3 不同浓度 EDDS 对 1.0 mg · L<sup>-1</sup> Se 胁迫条件下彩叶草叶片中一些生理指标的影响 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>  
Table 3 Effect of EDDS with different concentrations on some physiological indexes in leaf of *Coleus blumei* Benth. under 1.0 mg · L<sup>-1</sup> Se stress ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

EDDS 浓度/mmol · L <sup>-1</sup> EDDS concentration	SOD 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ SOD activity	POD 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ POD activity	CAT 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ CAT activity	APX 活性/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ APX activity	GSH 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ GSH content	GSH-Px 活性/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ GSH-Px activity
0.0 (CK)	146.371±2.113ab	31.256±0.957e	84.223±1.243b	0.284±0.006a	207.681±3.216c	0.020 9±0.000 6d
0.5	109.802±3.562b	42.664±1.958c	73.395±2.261c	0.115±0.009de	239.493±3.761b	0.024 5±0.000 4b
1.0	98.769±4.531b	63.761±1.610a	54.316±2.193e	0.096±0.005e	295.092±9.379a	0.026 5±0.000 6a
1.5	100.597±4.716b	51.763±1.566b	57.472±1.781de	0.127±0.007d	283.184±6.251a	0.023 7±0.001 1bc
2.5	121.782±3.143b	43.415±1.299c	59.467±2.335d	0.153±0.005c	279.683±5.476ab	0.022 9±0.000 4c
5.0	158.673±2.942a	36.632±1.193d	91.332±2.021a	0.184±0.008b	231.241±2.956bc	0.021 7±0.000 6c

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ).



各器官中的Se含量明显增加,其中 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS处理组根、茎、叶中的Se含量最高,分别为对照的1.6、3.4和3.5倍;在 $1.5\sim 5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS条件下,随EDDS浓度提高,各器官中的Se含量逐渐减少,但均较对照高,其中在添加 $5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS条件下各器官Se含量仅略高于对照且无显著差异。从不同器官的比较看,彩叶草根中的Se含量均极明显高于叶和茎,茎中的Se含量则略高于叶但二者差异不大。

在Se胁迫条件下,添加 $0.5$ 和 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS,彩叶草地上部Se富集系数急剧增大且均显著高于对照,其中 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS处理组Se富集

系数最大,达 $38.0$ ,说明在 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Se胁迫下添加 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS可明显诱导彩叶草对Se的吸收和富集作用;而在添加 $1.5\sim 5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS条件下,Se富集系数逐渐减小但仍高于对照,而其中 $5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS处理组的Se富集系数在各处理组中最小但略高于对照。

在添加不同浓度EDDS的条件下,彩叶草体内的Se转运系数变化也较大,其变化趋势与彩叶草对Se的富集系数的变化趋势一致,但各处理组的转运系数均显著高于对照,其中 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS处理组的转运系数最大, $5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS处理组的转运系数最小。

表4 不同浓度EDDS对 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Se胁迫条件下彩叶草不同器官Se含量和富集系数及转运系数的影响( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>  
Table 4 Effect of EDDS with different concentrations on Se content in different organs and enrichment coefficient and translocation coefficient of *Coleus blumei* Benth. under  $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Se stress ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

EDDS 浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDDS concentration	不同器官 Se 含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ Se content in different organs			富集系数 Enrichment coefficient	转运系数 Translocation coefficient
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf		
0.0 (CK)	0.314±0.012c	0.007±0.002d	0.004±0.001c	11.0±0.29d	0.035±0.003d
0.5	0.453±0.015b	0.014±0.002bc	0.009±0.002b	23.0±0.31c	0.051±0.007c
1.0	0.502±0.025a	0.024±0.001a	0.014±0.003a	38.0±0.23a	0.076±0.001a
1.5	0.425±0.025b	0.017±0.001b	0.011±0.002ab	28.0±0.14b	0.066±0.003b
2.5	0.397±0.022b	0.012±0.001c	0.008±0.002b	20.0±0.34c	0.050±0.004c
5.0	0.317±0.011c	0.009±0.002c	0.005±0.001c	14.0±0.21d	0.044±0.001c

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

## 3 讨 论

### 3.1 EDDS对Se胁迫条件下彩叶草生长及Se富集能力的影响效应

通过与土壤溶液中的重金属离子结合,螯合剂可以改变重金属元素在土壤中的存在形态,使重金属元素从土壤颗粒表面解吸出来,由不溶态转化为可溶态,从而使土壤中的重金属活化,为土壤中重金属的淋洗或植物吸收创造有利条件。目前,使用螯合剂诱导植物修复重金属污染土壤已成为植物修复的研究热点之一。然而,使用螯合剂可能影响作物的生长,包括叶面部分坏死、叶片萎蔫和断裂、茎部干裂、蒸腾作用减弱和生物量降低等<sup>[34-35]</sup>。本研究结果表明:Se胁迫条件下,外源EDDS浓度低于 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,彩叶草根中MDA含量较对照显著降低,但根、茎和叶的鲜质量却较对照显著增加,说明在此浓度范围内EDDS可以减轻Se对彩叶草细胞膜脂的过氧化伤害,

有利于促进彩叶草的生长。该结果与Esringü等<sup>[36]</sup>对球芽甘蓝(*Brassica oleracea* var. *gemmifera* Zenk.)的研究结果一致,但熊国焕等<sup>[37]</sup>的研究结果表明:螯合剂EDDS对大叶井口边草[*Pteris cretica* var. *nervosa* (Thunb.) Ching et S. H. Wu]生物量没有明显影响。这些研究结果的差异可能与供试植物种类、重金属元素种类、处理时间、实验方式及条件以及螯合剂浓度等存在差异有关,而且这种差异究竟是EDDS有关还是与重金属富集有关尚待进一步研究。

适宜的螯合剂可以增加土壤中重金属的溶解性,从而促进植物地上部对重金属的吸收和积累。富集系数(BCF)和转运系数(TF)可用于表征不同植物富集和转运污染物的能力。BCF值越高表明植物对某种污染物的富集能力越强;TF值越高则代表植物将根系吸收的污染物转运到地上部分的能力越强,越有利于污染环境的植物修复<sup>[38]</sup>。作者的研究结果表明:在 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Se胁迫条件下,添加低浓度EDDS可明显增加彩叶草根、茎和叶中的Se含量,其中,添

加  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS, 彩叶草各器官中 Se 含量均为对照的 1.6 倍以上, 且 *BCF* 和 *TF* 均达到最大。说明在 Se 胁迫条件下添加适宜浓度的 EDDS 有利于彩叶草对 Se 的吸收和富集。

### 3.2 EDDS 对 Se 胁迫条件下彩叶草抗氧化系统的影响

正常情况下, 植物体内的活性氧代谢处于平衡状态, 使细胞免受伤害; 而在胁迫条件下, 植物体内产生活性氧自由基的速率超过植物清除活性氧的能力, 引起过氧化伤害。SOD、CAT 和 POD 是植物适应多种逆境胁迫的重要酶, 也是植物抗氧化系统的重要组成部分。APX 是植物膜脂过氧化酶促防御体系中重要的保护酶之一, 还是 ASA-GSH 氧化还原途径的重要组成部分之一, 它可通过 ASA-GSH-NADPH 循环催化 ASA 氧化以清除  $\text{H}_2\text{O}_2$  等, 对细胞起到保护作用。在胁迫条件下, 活性氧数量增加、诱导酶活性增强, 启动以上酶系统对积累的活性氧进行清除。本实验结果表明: 在 Se 胁迫条件下, 添加低浓度 ( $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) EDDS, 彩叶草叶片的 SOD、CAT 和 APX 活性明显低于对照; 添加  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDDS, 3 种酶活性均降至最低, 分别比对照降低 32.5%、35.5% 和 66.2%, 而 POD 活性却急剧升高; 但随着 EDDS 浓度的提高, POD 活性不断降低, SOD、CAT 和 APX 酶活性却明显升高。说明在 Se 胁迫条件下, 低浓度的外源 EDDS 通过增强彩叶草的 POD 活性消除过量的  $\text{H}_2\text{O}_2$  自由基, 减缓胁迫的毒害; 但 POD 的防御能力有限, 随外源 EDDS 浓度的提高, EDDS 和 Se 共同作用使 POD 活性受到抑制, 导致彩叶草 POD 活性下降,  $\text{H}_2\text{O}_2$  自由基消除过程受阻, 在此条件下 SOD、CAT 和 APX 再次被启动, 并对胁迫过程中积累的活性氧进行清除。

GSH 是生物细胞中含量最丰富的非蛋白质硫醇化合物, 在生物体内不同的胁迫响应途径中, 细胞可利用 GSH 的亲核活性消除活性氧和重金属等对细胞的伤害<sup>[39]</sup>。本研究中, 在 Se 胁迫条件下, 外源 EDDS 浓度低于  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 彩叶草叶片中的 GSH 含量显著高于对照, 随着 EDDS 浓度的提高, 叶片中 GSH 含量逐渐降低但仍高于对照。这可能是由于在低浓度 EDDS 条件下, 一方面 GSH 通过提高保护酶活性清除活性氧; 另一方面 GSH 可以螯合重金属, 从而降低游离重金属离子的含量。GSH 是金属螯合肽合成的重要前体, 金属螯合肽的合成量增加, 将解除重金属与酶蛋白的结合, 提高酶活性, 从而减轻细胞受到的

毒害。GSH-Px 也是生物体内广泛存在的一类重要的催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解的酶, 其活性可以作为衡量机体抗氧化系统改变的重要指标之一。本研究中, 在 Se 胁迫条件下, 添加不同浓度 EDDS 后彩叶草叶片中 GSH-Px 活性的变化趋势与 GSH 含量相一致, 虽然活性较低, 但均显著高于对照。

由于 EDDS 对污染环境修复的效应受其浓度和溶液 pH 值、重金属元素种类、土壤基本性质以及植物种类等因子的影响, 加之目前对其诱导机制尤其是从根部向茎叶的传输机制还缺乏深入研究, 从而影响其广泛应用。因此, 如何有效地将 EDDS 应用到实践中是未来污染环境修复的一个重要研究课题。

### 参考文献:

- [1] HU J W, LIU F, HUANG X F, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Hongfeng Lake, China [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 113/114: 1591-1596.
- [2] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展 [J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [3] 中国科学院地理研究所环境与地方病研究组. 我国低硒带与克山病、大骨节病病因关系的研究 [J]. *环境科学*, 1986, 7(4): 89-93.
- [4] IP C. Lessons from basic research in selenium and cancer prevention [J]. *The Journal of Nutrition*, 1998, 128(11): 1845-1854.
- [5] WHANGER P D. Selenium in the treatment of heavy metal poisoning and chemical carcinogenesis [J]. *Journal of Trace Elements Electrolytes in Health and Disease*, 1992, 6(4): 209-221.
- [6] SKORUPA J P. Selenium poisoning of fish and wild life in nature: lessons learned from twelve real-world experiences [M] // FRANKENBERGER W T, ENGBERG R A Jr. *Environmental Chemistry of Selenium*. New York: Marcel Dekker Inc., 1998: 315-354.
- [7] LEMLY A D. Aquatic selenium pollution is a global environmental safety issue [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 59(1): 44-56.
- [8] 宋成祖. 鄂西南渔塘坝矿区硒污染成因探讨 [J]. *地质论评*, 1995, 41(2): 121-126.
- [9] FANG W X, WU P W. Elevated selenium and other mineral element concentrations in soil and plant tissue in bone sites in Haoping area, Ziyang County, China [J]. *Plant and Soil*, 2004, 261: 135-146.
- [10] 杨光圻, 王淑真, 周瑞华, 等. 湖北恩施地区原因不明脱发脱甲症病因的研究 [J]. *中国医学科学院学报*, 1981, 3(S2): 1-6.
- [11] ZHENG B S, HONG Y T, ZHAO W, et al. The Se-rich carbonaceous siliceous rock and endemic selenosis in southwest Hubei, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37(20): 1725-1729.
- [12] WU L. Review of 15 years of research on ecotoxicology and remed-

- iation of land contaminated by agricultural drainage sediment rich in selenium[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 57(3): 257-269.
- [13] GRIEVE C M, POSS J A, SUAREZ D L, et al. Lesquerella growth and selenium uptake affected by saline irrigation water composition[J]. *Industrial Crops and Products*, 2001, 13(1): 57-65.
- [14] 江用彬, 季宏兵, 李甜甜, 等. 环境硒污染的植物修复研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(1): 98-104.
- [15] VASSIL A D, KAPULNIK Y, RASKIN I, et al. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard[J]. *Plant Physiology*, 1998, 117(2): 447-453.
- [16] BLAYLOCK M J, SALT D E, DUSHENKOV S, et al. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents[J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(3): 860-865.
- [17] KAYSER A, WENGER K, KELLER A, et al. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd and Cu from calcareous soil: the use of NTA and sulfur amendments [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(9): 1778-1783.
- [18] TANDY S, AMMANN A, SCHULIN R, et al. Biodegradation and speciation of residual S,S-ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in soil solution left after soil washing[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(2): 191-199.
- [19] LUO C L, SHEN Z G, LOU L Q, et al. EDDS and EDTA-enhanced phytoextraction of metals from artificially contaminated soil and residual effects of chelant compounds[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 862-871.
- [20] MEERS E, TACK F M G, VERLOO M G. Degradability of ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in metal contaminated soils: implications for its use soil remediation[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(3): 358-363.
- [21] 刘士哲, 林东教, 唐淑军, 等. 利用漂浮植物修复系统栽培风车草、彩叶草和茉莉净化富营养化污水的研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1261-1265.
- [22] 赵欣胜, 崔丽娟, 摆亚军, 等. 水培彩叶草抑制藻类繁殖的试验研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(8): 1-3, 17.
- [23] 陈文慧. 模拟人工湿地处理含镉无机废水的研究[D]. 南宁: 广西大学农学院, 2008.
- [24] PANIZZA D A, CARRILLO G R, BERNAL G M, et al. Exploration of the ability of *Coleus blumei* to accumulate aluminum[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, 13(5): 421-433.
- [25] 赵兰枝, 毛 达, 林紫玉, 等. 不同营养液对彩叶草色素含量及光合作用的影响[J]. *广东农业科学*, 2007(6): 30-32.
- [26] 孙 权, 何振立, 杨肖娥, 等. 铜对小白菜的毒性效应及其生态健康指标[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 324-330.
- [27] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [28] 庄明浩, 李迎春, 郭子武, 等. 美丽箬竹对模拟大气O<sub>3</sub>浓度倍增胁迫的生理响应[J]. *植物资源与环境学报*, 2012, 21(2): 68-72, 88.
- [29] 孙 群, 胡景江. 植物生理学研究技术[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006: 5-8.
- [30] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [31] 邱 睿, 王 兆, 王保莉, 等. 干旱胁迫下硫对小麦叶片GSH含量及GSH-Px活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 148-152.
- [32] 陈思杨, 江荣风, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐/亚硒酸盐的吸收及转运机制[J]. *环境科学*, 2011, 32(1): 284-289.
- [33] 段曼莉, 胡 斌, 梁东丽, 等. 4种蔬菜对硒酸盐的吸收、富集与转运特征的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 422-428.
- [34] 宋 静, 钟继承, 吴龙华, 等. EDTA与EDDS螯合诱导印度芥菜吸取修复重金属复合污染土壤研究[J]. *土壤*, 2006, 38(5): 619-625.
- [35] EVANGELOU M W H, EBEL M, SCHAEFFER A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil: effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents [J]. *Chemosphere*, 2007, 68(6): 989-1003.
- [36] ESRINGÜ A, TURAN M. The roles of diethylenetriamine pentaacetate (DTPA) and ethylenediamine disuccinate (EDDS) in remediation of selenium from contaminated soil by brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*) [J]. *Water, Air, Soil Pollution*, 2012, 223(1): 351-362.
- [37] 熊国焕, 潘义宏, 何艳明, 等. 螯合剂对大叶井口边草Pb、Cd、As吸收性影响研究[J]. *土壤*, 2012, 44(2): 282-289.
- [38] MONNI S, SALEMAA M, WHITE C, et al. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in southwest Finland[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(2): 211-219.
- [39] KOCSY G, SZALAI G, GALIBA G. Induction of glutathione synthesis and glutathione reductase activity by abiotic stresses in maize and wheat [J]. *The Scientific World Journal*, 2002, 21(2): 1699-1705.

(责任编辑: 佟金凤)