

# EDDS处理对硒胁迫下彩叶草根系FTIR-ATR、SEM-EDXS特征及生理特性的影响

袁菊红<sup>1</sup>, 胡绵好<sup>2\*</sup>

(1. 江西财经大学, 环境与植物科学研究所, 南昌 330032; 2. 江西财经大学鄱阳湖生态经济研究院, 南昌 330032)

**摘要:** 为了解乙二胺二琥珀酸(EDDS)诱导植物耐受硒(Se)胁迫的生理机制, 以彩叶草(*Coleus blumei*)为材料, 采用营养液培养的方法、借助傅里叶变换-衰减全反射红外光谱(FHIR-ATR)和扫描电子显微镜-X射线能量色散谱(SEM-EDXS)分析方法及生理指标的变化, 研究 1.0 mg/L Se 胁迫条件下添加 0、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 mmol/L EDDS 对彩叶草根系化学成分变化的影响。利用 FTIR-ATR 图谱分析发现, 随着 EDDS 处理浓度的提高, 彩叶草根系透射峰所对应峰形基本不变, 而参与 Se 吸附的基团如羟基、酰胺基和指纹区等的透射峰发生了不同程度的位移。FTIR-ATR 的特征峰与彩叶草根系响应 Se 胁迫的各生理指标变化趋势基本一致, 且 FTIR-ATR 比传统的生理指标测定更敏感、便捷。SEM-EDXS 扫描还发现随着 EDDS 处理浓度的升高, 根系中 K、Mg、Fe、Si 等元素的含量升高, 而营养元素 Ca 含量降低。该研究结果可为深入了解 EDDS 处理下彩叶草对 Se 胁迫的响应机理提供科学依据。

**关键词:** 硒胁迫; 彩叶草; 生理指标; 扫描电子显微镜-X射线能量色散谱; 傅里叶变换-衰减全反射红外光谱; 乙二胺二琥珀酸

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2014)06-0620-10

## Effect of EDDS Treatments on FTIR-ATR, SEM-EDXS Features and Physiological Characteristics of *Coleus blumei* Roots under Se Stress

YUAN Ju-Hong<sup>1</sup>, HU Mian-Hao<sup>2\*</sup>

(1. Institute of Environment and Plant Science, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China;

2. Institute of Poyang Lake Eco-economics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China)

**Abstract:** To understand the physiological mechanism of [S,S']-ethylenediamine disuccinic acid (EDDS) inducing plant resistance to selenium (Se), a hydroponic experiment with different concentrations of EDDS (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, and 5.0 mmol/L) was conducted to investigate the chemical component changes in *Coleus blumei* roots under Se stress (1.0 mg/L) using scanning electron microscopy-X-ray energy dispersive spectroscopy (SEM-EDXS) and Fourier transform infrared spectroscopy-attenuated total reflectance (FTIR-ATR) with physiological trait changes. Results showed that the peak shape of the *C. blumei* root component remained invariable, as observed by FTIR-ATR spectra. A significant transmission peak shift of some function groups, such as hydroxyl groups, acid amide groups and fingerprint region, was obtained when they participated in the process of absorbing Se. There was good correspondence between the changes in the physiological characteristics and

收稿日期: 2014-03-03, 退修日期: 2014-04-03。

基金项目: 国家自然科学基金项目(21407069, 21367013, 41161064); 江西省自然科学基金项目(20142BAB203024); 江西财经大学优秀学术人才支持计划项目(K00292025)。

作者简介: 袁菊红(1975-), 女, 湖南绥宁人, 讲师, 博士, 从事园林植物资源分类及在环境中应用等研究(E-mail: yuanjuhong@sina.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: yankeu@gmail.com)。

changes in samples based on the indices of wave number absorbance of FTIR-ATR spectra, and FTIR-ATR was more sensitive and convenient. SEM-EDXS analysis showed that the element contents of K, Mg, Fe and Si in the roots increased and the content of Ca decreased with increasing EDDS concentration.

**Key words:** Se stress; *Coleus blumei*; Physiological characteristics; Scanning electron microscopy-X-ray energy dispersive spectroscopy (SEM-EDXS); Fourier transform infrared spectroscopy-attenuated total reflectance (FTIR-ATR); [S, S']-ethylenediamine disuccinic acid

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<sup>[1]</sup>,但环境中的硒过量不仅可导致机体产生疾病、动物胚胎畸形发育甚至死亡<sup>[2]</sup>,还会影响植物的生长发育,导致作物减产和品质降低<sup>[3]</sup>。硒污染严重威胁人类健康和环境安全,已成为全球性的环境问题<sup>[4]</sup>。目前,在控制和清除环境硒污染的众多措施中,以植物忍耐和超富集硒污染物为理论基础的植物修复技术因其投资和维持成本低、操作简便、不会造成二次污染等优点,已受到世界各国学术界和企业界的高度重视和青睐。如芥菜(*Brassica junce*)<sup>[5]</sup>、宽叶香蒲(*Typhalati folia*)、芦苇(*Phragmites australis*)<sup>[6]</sup>和比吉洛氏海蓬子(*Salicornia bigelovii*)、盐草(*Distichlis spicata*)<sup>[7]</sup>等在印度已被广泛应用于土壤中硒污染修复和含硒污水处理等。尽管国内外学者对硒污染的植物修复及其硒耐受性机理的研究已取得一定进展<sup>[8]</sup>,但我国在此领域的研究尚处于起步阶段,相关研究较少。

螯合诱导技术已成为重金属污染环境修复的热点课题。有关螯合剂乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)<sup>[9]</sup>、二乙烯三胺五乙酸(diethylene triamine pentacetate acid, DTPA)<sup>[10]</sup>和氨三乙酸(nitrioltriacetic acid, NTA)<sup>[11]</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不易降解,且有较长的残留效应,同时还会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败的关键。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在重金属污染修复中被广泛应用<sup>[12-14]</sup>。彩叶草(*Coleus blumei*)也称五彩苏、五

色草、锦紫苏,是唇形科(Lamiaceae)鞘蕊花属(*Coleus*)多年生草本植物,原产爪哇岛,广泛分布于非洲和亚洲,它耐热、耐寒且对光照适应性较强,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氮、磷等营养盐<sup>[15]</sup>和抑制水体中藻类的繁殖<sup>[16]</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>[17, 18]</sup>。我们在前期研究的基础上以彩叶草为材料,采用营养液培养的方法,应用傅里叶变换-衰减全反射红外光谱(FTIR-ATR)、扫描电子显微镜-X射线能量色散谱(SEM-EDXS)方法进一步研究 EDDS 处理下硒胁迫彩叶草根系 FTIR-ATR 波峰和主要矿物质元素相对含量、分布特性等变化,同时结合彩叶草根系的生理指标变化,深入了解 EDDS 处理的彩叶草对 Se 耐受性的生理机制,为进一步剖析彩叶草对 Se 胁迫的响应机理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

彩叶草(*Coleus blumei*)幼苗购于江西省南昌市花鸟市场。将购回的彩叶草幼苗从土壤中取出,用自来水将根系冲洗干净(尽量少伤根系),然后用自来水预培养 15 d 左右,再用 1/2 Hoagland 营养液培养 2 周,使其长出更多新根,更好地适应水环境生长。

### 1.2 实验设计

实验于 2011 年 10 月 20 日-11 月 15 日在江西财经大学生态环境实验中心进行。选取茎粗和株高基本一致、生长健壮、无病虫害、叶色一致的彩叶草幼苗,定植于 7 孔(孔径 32 mm) PVC 板上(每块 PVC 只定植 6 个孔),每孔定植 4 株(约 25 ± 2 g),然后将其置于盛有 5 L 营养液的塑

料桶中培养(每桶放 1 块 PVC 板)。基础营养液参照赵兰枝等的配方<sup>[19]</sup>, 其组分为: 3.0 mmol/L  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 4.0 mmol/L  $\text{KNO}_3$ ; 1.0 mmol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ; 1.0 mmol/L  $\text{MgSO}_4$ ;  $3.6 \times 10^{-3}$  mmol/L  $\text{MnCl}_2$ ;  $4.5 \times 10^{-2}$  mmol/L  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ;  $8 \times 10^{-4}$  mmol/L  $\text{CuCl}_2$ ;  $1.5 \times 10^{-3}$  mmol/L  $\text{ZnCl}_2$ ;  $1.4 \times 10^{-5}$  mmol/L  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ ;  $9.0 \times 10^{-2}$  mmol/L  $\text{Fe-EDTANa}_2$ 。培养 10 d 后(10 月 30 日)重新更换基础营养液, 并用生物可降解螯合剂 EDDS 进行处理: 1.0 mg/L Se (不加 EDDS, 记为 1.0Se + 0E)、1.0 mg/L Se 加入 0.5 mmol/L EDDS (1.0Se + 0.5E)、1.0 mg/L Se 加入 1.0 mmol/L EDDS (1.0Se + 1.0E)、1.0 mg/L Se 加入 1.5 mmol/L EDDS (1.0Se + 1.5E)、1.0 mg/L Se 加入 2.5 mmol/L EDDS (1.0Se + 2.5E)、1.0 mg/L Se 加入 5.0 mmol/L EDDS (1.0Se + 5.0E), Se 以  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  形式直接加入营养液中。每个处理重复 4 次, 随机排列, 在自然温度、光照条件下进行实验。每隔 5 d 换 1 次营养液, 同时更换不同浓度 EDDS(共换 3 次营养液), 处理期间进行连续曝气。以基础营养液培养作为对照(CK)。

### 1.3 根系测定指标及方法

#### 1.3.1 根系生理指标及其 Se 含量测定

采集彩叶草根系, 分别测定对照及各处理(Se + E)的生理指标。可溶性糖(SS)含量的测定采用蒽酮比色法; 丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法<sup>[20]</sup>; 可溶性蛋白(Pr)含量的测定采用考马斯亮蓝法<sup>[21]</sup>。

剪取彩叶草根系用自来水冲洗干净, 再用去离子水冲洗多次, 用滤纸吸干表面水分, 置于电子天平(BS224S 型千分之一)上称取鲜重; 然后放入恒温箱中 105℃杀青 30 min、75℃烘干至恒重, 称取干重。部分样品研磨成粉末后用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  进行消化(体积比 3 : 1), 采用紫外分光光度计测定根系 Se 含量<sup>[22]</sup>。

#### 1.3.2 傅里叶变换-衰减全反射红外光谱 (FTIR-ATR) 扫描

分别取烘干后的彩叶草根系(对照和各处理)于玛瑙研钵中研成粉末, 过 100 目筛, 再采用 Nicolet 5700 型傅里叶变换红外扫描光谱仪进行扫描。光谱

范围 4000~400  $\text{cm}^{-1}$ , 分辨率为 0.1  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描累加次数 32 次, 采样器(OMNI)直接测定红外光谱, 采用 OMNIC E. S. P. 5.1 同步智能软件对 ATR 进行校正, 每个样品测定前均对背景进行扫描, 得到的红外光谱进行基线校正, 确定峰值和吸光度, 再对各处理和对照的根系样品进行扫描, 观察官能团的变化。

#### 1.3.3 扫描电子显微镜-X-射线能量色散谱 (SEM-EDXS) 分析

分别取烘干后的彩叶草根系(各处理和对照)于玛瑙研钵中研成粉末, 过 100 目筛, 再经压片和喷金后, 利用 SU1510 型扫描电子显微镜(日本日立/Hitachi 公司)和 250 X-Max 50 型能谱仪(英国牛津 INCA 公司)观察其表面微观结构, 分析其表面元素的变化情况。能谱仪技术指标为: 电压 20 kV、电子束 6.0、工作距离 10.0 mm。

#### 1.3.4 彩叶草根系 FTIR 特征峰与生理指标的相关性分析

为了更好地比较各生理指标含量与 FTIR-ATR 特征峰变化之间的联系, 按照下列公式<sup>[23]</sup>进行相关性分析:

可溶性糖含量的变化趋势 = [(不同浓度硒处理下可溶性糖的含量 - 对照可溶性糖的含量) / 对照可溶性糖的含量] × 100% (1)

特征峰峰值的变化趋势 = [(不同浓度硒处理下特征峰的峰值 - 对照中特征峰的峰值) / 对照中特征峰的峰值] × 100% (2)

可溶性蛋白和丙二醛的变化趋势计算参照可溶性糖的计算公式进行。

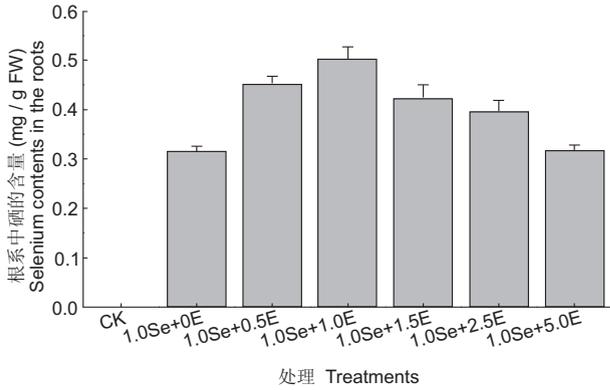
#### 1.3.5 数据分析

实验数据采用 Origin 8.5 软件进行分析处理。

## 2 结果和分析

### 2.1 彩叶草根系中硒的含量

在 Se 胁迫条件下, 添加不同浓度(0.5 ~ 5.0 mmol/L)EDDS 后, 彩叶草根系中的 Se 含量随 EDDS 浓度升高呈先升后降的趋势(图 1)。在低浓度(0.0 ~ 1.0 mmol/L)EDDS 条件下, 根系中的 Se 含量明显增加, 其中 1.0 mmol/L EDDS 处理组根系中的 Se 含量最高, 为 1.0Se + 0E 处理



1.0Se + 0E、1.0Se + 0.5E、1.0Se + 1.0E、1.0Se + 1.5E、1.0Se + 2.5E、1.0Se + 5.0E 分别表示在 1.0 mg/L Se 中添加 0~5.0 mmol/L EDDS, CK 为对照。下同。  
1.0Se + 0E, 1.0Se + 0.5E, 1.0Se + 1.0E, 1.0Se + 1.5E, 1.0Se + 2.5E, and 1.0Se + 5.0E showed that adding 0~5.0 mmol/L EDDS in the 1.0 mg/L Se, respectively, and CK for control. Same below.

图 1 不同浓度 EDDS 处理对 Se 胁迫下彩叶草根系中 Se 含量的影响

Fig. 1 Effect of different concentrations of EDDS on Se content in *Coleus blumei* roots under Se stress

的 1.6 倍; 在 1.5~5.0 mmol/L EDDS 条件下, 随 EDDS 浓度提高, 根系中的 Se 含量逐渐减少, 但较 1.0Se + 0E 处理的要高。这说明在 Se 胁迫条件下添加适宜浓度的 EDDS 有利于彩叶草根系对 Se 的吸收和富集。

## 2.2 彩叶草根系的 FTIR-ATR 图谱分析

采用傅里叶变换红外扫描光谱仪对彩叶草根系各 EDDS 处理组及对照进行扫描, 结果见图 2 和图 3。从图 2 中可见, 对照组在扫描区域出现了较多峰, 3416  $\text{cm}^{-1}$  附近主要是一些碳水化合物、细胞壁物质及蛋白质中的 -OH 和 -NH 伸缩振动峰; 2922  $\text{cm}^{-1}$  附近为脂质中的 C-H 反对称伸缩引起的吸收峰<sup>[24]</sup>; 1645  $\text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰为酰胺化合物的吸收 I 带<sup>[25]</sup>; 1417  $\text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰是由 C-H 伸展和 C-O 弯曲震动产生<sup>[26]</sup>; 1384  $\text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰是由蛋白质和 COOH 基团的对称伸

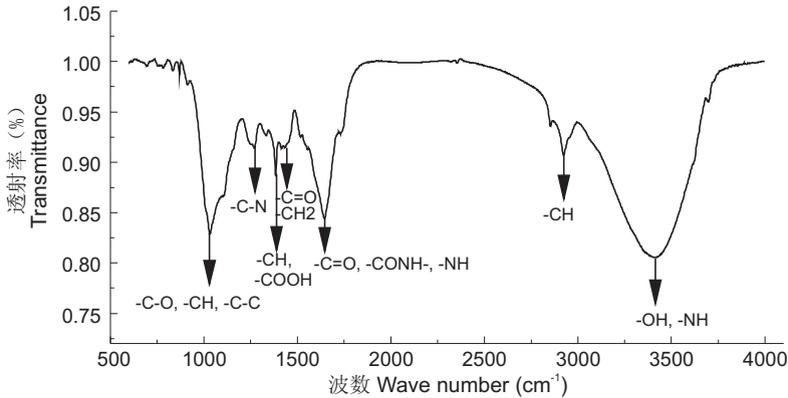


图 2 彩叶草根系(对照组) FTIR-ATR 扫描图谱

Fig. 2 FTIR-ATR spectra of *C. blumei* roots (CK)

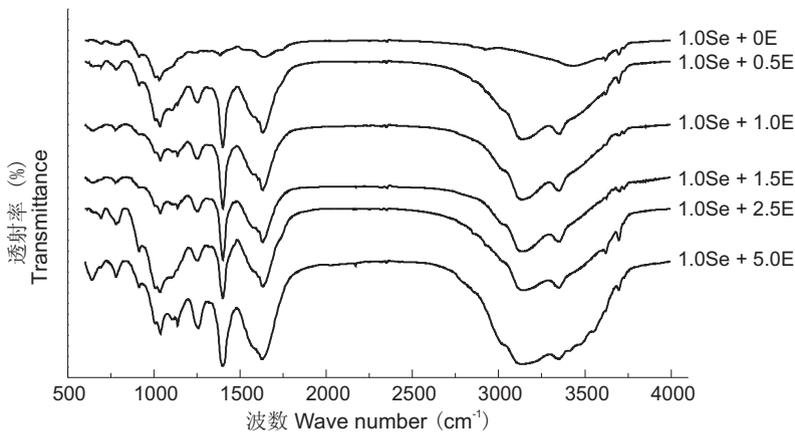


图 3 Se 胁迫下不同浓度 EDDS 处理的彩叶草根系 FTIR-ATR 扫描图谱

Fig. 3 FTIR-ATR spectra of *C. blumei* roots under Se stress with different concentrations of EDDS

缩形成<sup>[23]</sup>。1033  $\text{cm}^{-1}$ 附近是碳水化合物中的 $-\text{CH}$ 弯曲或 $-\text{C}-\text{O}$ 、 $-\text{C}-\text{C}$ 伸缩振动峰<sup>[25]</sup>。900~600  $\text{cm}^{-1}$ 间的吸收峰主要为指纹图谱区<sup>[27]</sup>。彩叶草根系在硒胁迫下经不同浓度EDDS处理后,从其FTIR-ATR扫描图谱可以看出(图3),经过EDDS处理的彩叶草根系透射峰所对应的峰形基本不变,但各透射峰的强度、位移和数量发生了变化,说明EDDS处理并不会改变彩叶草根系中的基本化学成分组成,但对各化学成分的含量有所影响(表1)。

### 2.3 彩叶草根系 FTIR-ATR 特征峰与生理指标的相关性分析

彩叶草根系(对照组)FTIR-ATR图谱中(图2)1033  $\text{cm}^{-1}$ 处透射峰是由碳水化合物中的 $-\text{CH}$ 弯曲或 $-\text{C}-\text{O}$ 、 $-\text{C}-\text{C}$ 伸缩振动引起的。经EDDS处理后,彩叶草根系(1.0Se + E各处理)在1033  $\text{cm}^{-1}$ 处的透射峰呈现“升高-下降-升高-下降-升高”的变化趋势,这与碳水化合物可溶性糖含量的变化趋势较一致(图4:A)。相关性分析显示,根系中可溶性糖含量的变化与1033  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰变化的相关系数 $r$ 为0.9136,表明可溶性糖含量与1033  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰之间具有一定的相关性。

彩叶草根系(对照组)FTIR-ATR图谱1645  $\text{cm}^{-1}$ 处透射峰为酰胺化合物的吸收I带(图2)。经EDDS处理后,彩叶草根系(1.0Se + E各处理)在1645  $\text{cm}^{-1}$ 处透射峰的变化趋势与可溶性蛋白含量的变化趋势基本一致(图4:B),都在0.5 mmol/L EDDS处理下明显下降,且随着EDDS浓度升高呈现先升高后降低的变化趋势。相关性分析显示,根系中可溶性蛋白含量的变化与1645  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰变化的相关系数 $r$ 为0.9487,表明可溶性蛋白含量与1645  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰之间也具有一定的相关性。

同理,彩叶草根系(对照组)FTIR-ATR图谱2922  $\text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰是饱和 $-\text{CH}$ 键的伸缩振动吸收峰(图2),该峰的变化可能与植物细胞膜的膜脂过氧化程度相关<sup>[28]</sup>。经EDDS处理后,彩叶草根系在2922  $\text{cm}^{-1}$ 处透射峰的变化与丙二醛含量变化(升高-降低-升高-降低)趋势一致(图4:C),并且2922  $\text{cm}^{-1}$ 透射峰的变化幅度更大。相关分析结

果显示,根系中丙二醛含量变化与2922  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰变化的相关系数 $r$ 为0.8360,表明丙二醛含量变化与2922  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰之间也具有一定的相关性。

### 2.4 彩叶草根系的 SEM-EDXS 分析

通过对EDDS处理的硒胁迫下彩叶草根系不同区域进行SEM-EDXS分析,发现C、O、K、Ca、Si、Al、Fe等元素在样品表面呈有规律的变化(图5),即与对照相比,根系表面主要元素所占的比例随着EDDS处理浓度的变化而变化(表2)。其中O/C比例随着EDDS处理浓度的升高而明显增加;硒胁迫下不同EDDS处理浓度的彩叶草根系中Fe、K、Mg、Si的峰逐渐增强且元素含量有所增加,但Ca元素的峰减弱且其含量有所降低(图5、表2)。

## 3 讨论

适宜的整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<sup>[29,30]</sup>。本研究发现,在低浓度(0.0~1.0 mmol/L)EDDS处理条件下,彩叶草根系中Se含量明显增加,其中1.0 mmol/L EDDS处理组根系中Se含量最高,为1.0Se + 0E处理的1.6倍;在1.5~5.0 mmol/L EDDS处理条件下,随EDDS浓度升高,根系中Se含量逐渐减少。这说明在Se胁迫下添加适宜浓度的EDDS有利于彩叶草根系对Se的吸收和富集。Tandy等<sup>[29]</sup>研究也发现,高浓度的EDDS处理可明显降低向日葵根系中Cu、Zn等元素的积累。

通过添加外源有机整合剂可以缓解植物的重金属中毒症状<sup>[31]</sup>,FTIR-ATR法是监测植物应用于环境重金属污染的一种快速、有效的方法。本实验利用FTIR-ATR法对EDDS处理下硒胁迫的彩叶草进行了分析,发现其根系FTIR-ATR透射峰的峰形基本不变,但各透射峰的强度、位移和数量发生了变化,说明EDDS处理并没改变彩叶草根系中基本的化学成分组成,但对各化学成分的含量有一定的影响,这可能是因为EDDS处理促进了硒胁迫下根系中蛋白质作为运输金属离子的载体和与金属螯合的大分子物质的作用<sup>[32]</sup>,该结果与乔琳等<sup>[33]</sup>在



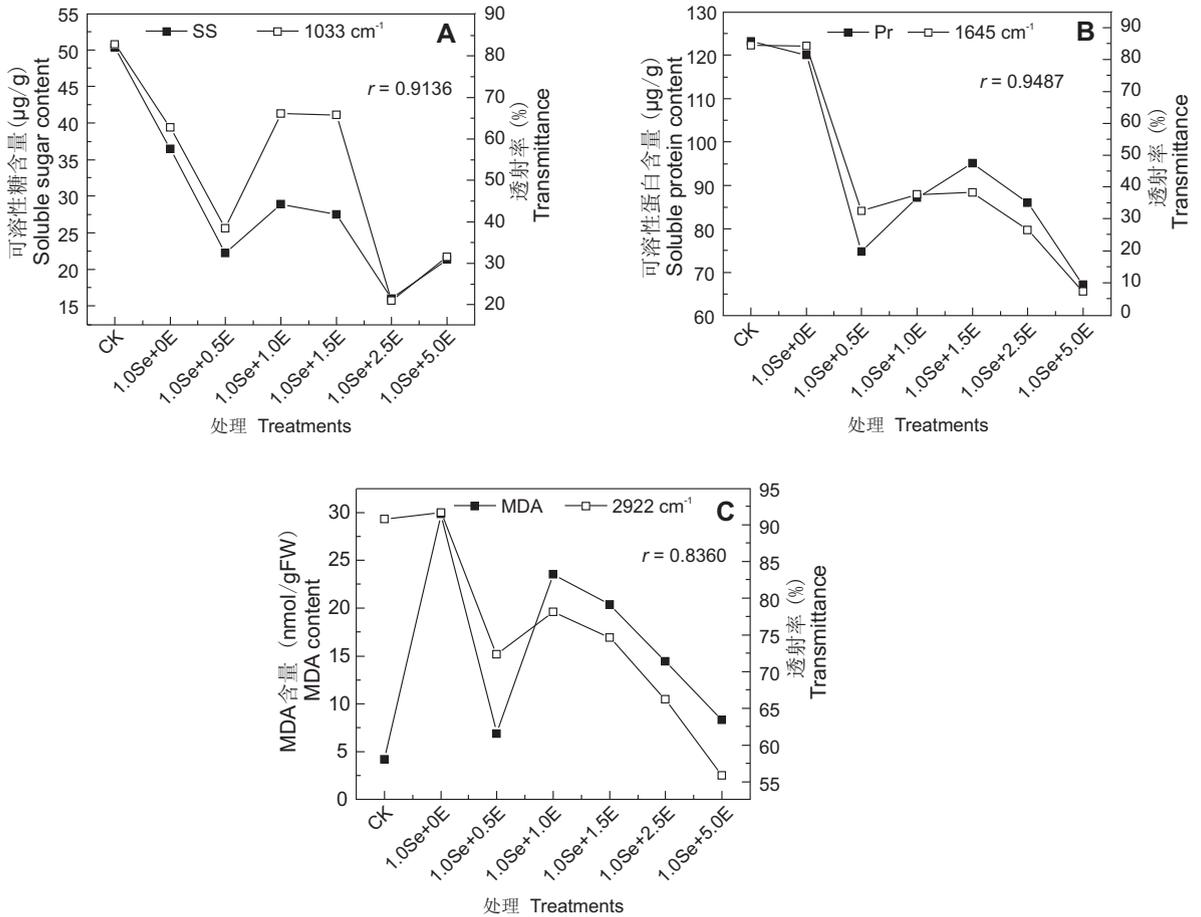
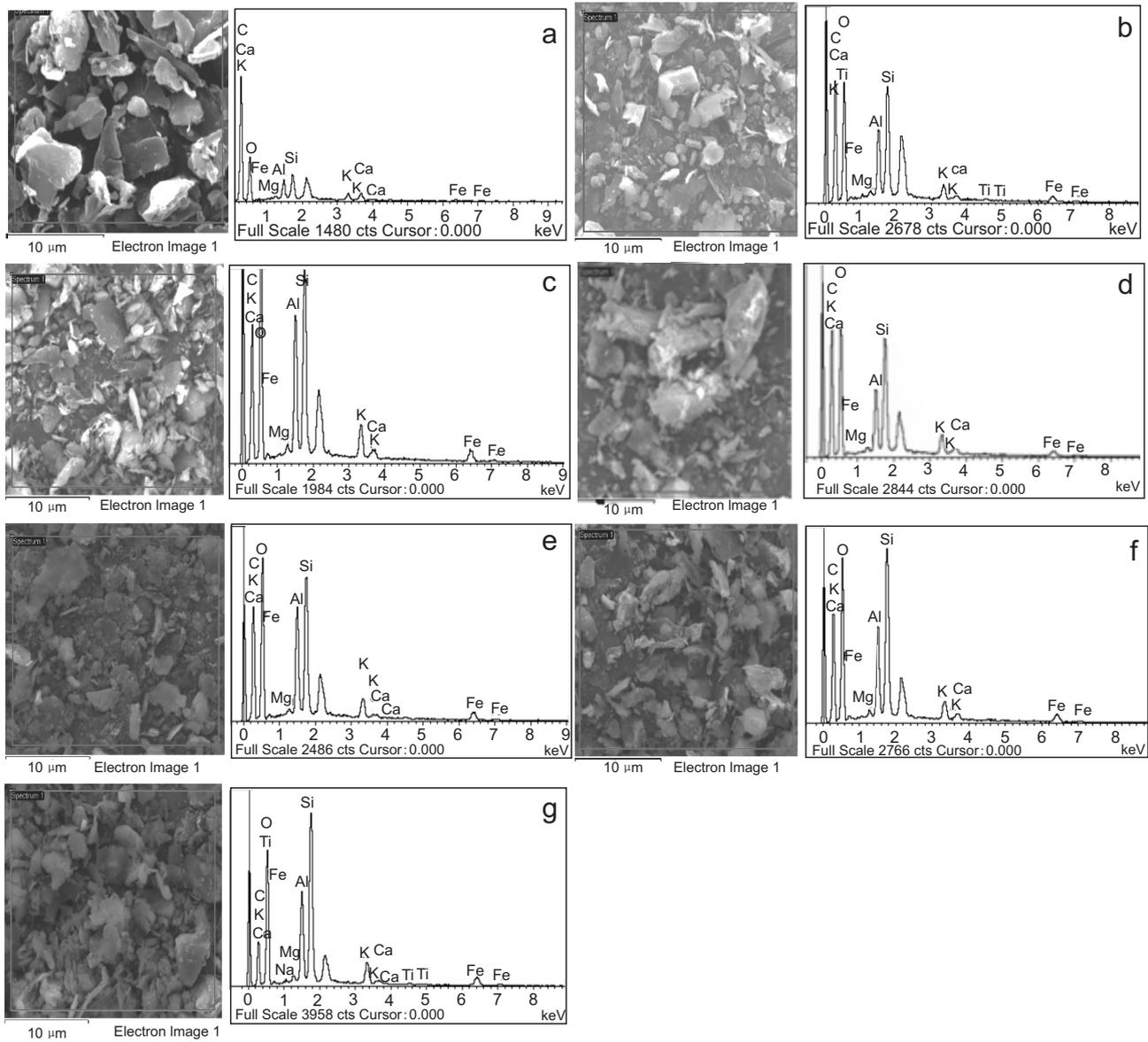


图 4 Se 胁迫下 EDDS 处理的彩叶草根系可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛含量与 FTIR-ATR 特征峰的关系  
Fig. 4 Relationships of soluble sugar, soluble protein and MDA content to FTIR-ATR characteristic peaks in *C. blumei* roots under Se stress with EDDS treatments

铅胁迫下对玉米的研究结果相似。植物在重金属胁迫下细胞内的物质代谢水平和途径会发生一系列适应性变化，可溶性糖、可溶性蛋白及丙二醛含量的增加，是植物体对不良环境在一定适应性基础上的抵抗性反应<sup>[34]</sup>。本研究发现，硒胁迫下 EDDS 处理的彩叶草通过根系中可溶性糖、可溶性蛋白及丙二醛含量的变化来增强其对硒的耐受能力，但随着 EDDS 处理浓度的升高，彩叶草根系的耐受能力下降。Römkens 等<sup>[35]</sup>研究发现，高剂量的人工合成螯合剂会对植物产生毒害作用；韩冬芳等<sup>[36]</sup>也发现，低浓度 Mg-EDTA 处理时大白菜可溶性蛋白的含量升高，但随着 Mg-EDTA 处理浓度的升高，可溶性蛋白的含量降低；武晓燕<sup>[37]</sup>研究还发现，随 Cd<sup>2+</sup>浓度的逐渐加大，外源 ASA 处理的水生植物体内 MDA 含量高于对照，表明在 Cd<sup>2+</sup>的一定浓度范围内，外施 ASA 可减缓重金属 Cd<sup>2+</sup>对植物膜的

氧化损伤。本研究还发现，硒胁迫下不同浓度 EDDS 处理的彩叶草根系中可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛含量分别与 FTIR-ATR 的 1033 cm<sup>-1</sup>、1645 cm<sup>-1</sup>、2922 cm<sup>-1</sup> 处的特征峰之间具有较好的相关性，这与顾艳红等<sup>[27]</sup>用 FTIR-ATR 分析镉胁迫对果灰藓的研究结果相一致。

O/C 原子比是衡量羧酸等含氧官能团含量的重要指标<sup>[38]</sup>。本研究通过 SEM-EDXS 分析发现，硒胁迫下 EDDS 不同浓度处理的彩叶草根系中 O/C 增加，含氧官能团数量增多，这可能有利于 Se 的有机螯合，增强根系对 Se 的耐受能力。该结果与 Solís-Domínguez 等<sup>[39]</sup>用 Cd 处理 *Echinochloa polystachya* 的研究结果相似。K、Ca、Mg、Fe 是植物必需的大量营养元素，它们的吸收、转运都反映着植物的营养平衡和健康状态，这些元素的代谢可以作为研究植物对重金属耐受性的机理之一。



a: CK; b: 1.0Se + 0E; c: 1.0Se + 0.5E; d: 1.0Se + 1.0E; e: 1.0Se + 1.5E; f: 1.0Se + 2.5E; g: 1.0Se + 5.0E.

图 5 Se 胁迫下不同浓度 EDDS 处理的彩叶草根系 SEM-EDXS 色谱图

Fig. 5 SEM-EDXS images of *C. blumei* roots under Se stress with different concentrations of EDDS

本研究发现, 硒胁迫下不同浓度 EDDS 处理的彩叶草根系中 Fe、K、Mg 峰逐渐增强且元素含量有所增加, 但 Ca 元素峰减弱且含量降低, 这说明在硒胁迫下 EDDS 处理可通过调节彩叶草根系中矿质元素的吸收与分配来缓解硒的毒性作用。武晓燕<sup>[36]</sup>在用乙酰水杨酸对水生植物镉(Cd)毒害作用的研究中印证了这一结果。硅(Si)含量的积累可提高植物对重金属毒害的耐受能力<sup>[40,41]</sup>, 本研究中硒胁迫下彩叶草根系中 Si 元素含量随着 EDDS 处理浓度的升高而增加, 表明硒胁迫下 EDDS 处理

的彩叶草通过提高 Si 元素在根系中的积累以增强其对硒的耐受能力, 出现这种现象的原因, 一方面可能由于可溶性硅酸盐在水溶液中可水解生成凝胶状的  $H_2SiO_3$ , 吸附在 Se 等周围, 避免过量 Se 与植物体内的蛋白质结合; 另一方面可能是由于 Si 输入转运蛋白 Lsi1 影响了植物对 Se 的吸收<sup>[42]</sup>, 但具体机制还亟待进一步研究。

参考文献:

[1] 杜玉潇, 李亚男, 陈大清. 植物硒代谢积累及相关酶

- 的研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2007, 15(3): 269–276.
- [2] Gamani RJ, James WB. Role of redox potential in chemical transformations of selenium in soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60(4): 1056–1063.
- [3] 郭宇. 恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [4] 江用彬, 季宏兵, 李甜甜, 王丽新. 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.
- [5] Bañuelos GS, Ajwa HA, Terry N, Zayed A. Phytoremediation of selenium laden soils: A new technology[J]. *J Soil Water Conserv*, 1997, 52(6): 426–430.
- [6] Shardendu N, Salhani N, Boulyga SF, Stengel E. Phytoremediation of selenium by two helophyte species in subsurface flow constructed wetland[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(8): 967–973.
- [7] Lin ZQ, Cervinka V, Pickering IJ, Zayed A, Terry N. Managing selenium-contaminated agricultural drainage water by the integrated on-farm drainage management system: role of selenium volatilization[J]. *Water Res*, 2002, 36(12): 3150–60.
- [8] Wu L. Review of 15 years of research on ecotoxicology and remediation of land contaminated by agricultural drainage sediment rich in selenium[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2004, 57(3): 257–269.
- [9] Vassil AD, Kapulnik Y, Raskin I, Salt DE. The role of EDTA in lead transport and accumulation by indian mustard[J]. *Plant Physiol*, 1998, 117(2): 447–453.
- [10] Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, Ensley BD, Raskin I. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(3): 860–865.
- [11] Kayser A, Wenger K, Keller A, Attinger W, Felix HR, Gupta SK, Schulin R. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd and Cu from calcareous soil: The use of NTA and sulfur amendments[J]. *Environ Sci Technol*, 2000, 34(9): 1778–1783.
- [12] Tandy S, Ammann A, Schulin R, Nowack B. Biodegradation and speciation of residual S-S-ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in soil solution left after soil washing[J]. *Environ Pollut*, 2006, 142(2): 191–199.
- [13] Luo CL, Shen Z, Lou L, Li X. EDDS and EDTA-enhanced phytoextraction of metals from artificially contaminated soil and residual effects of chelant compound[J]. *Environ Pollut*, 2006, 144(3): 862–871.
- [14] Meers E, Tack FMG, Verloo MG. Degradability of ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in metal contaminated soils: implications for its use soil remediation[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(3): 358–363.
- [15] 刘士哲, 林东教, 唐淑军, 罗健. 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.
- [16] 赵欣胜, 崔丽娟, 摆亚军, 田魁详, 李伟强. 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.
- [17] 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.
- [18] Panizza DA, Carrillo GR, Bernal GM, Vaca MM, Duran-Dominguez-de-Bazua C. Exploration of the ability of *Coleus blumei* to accumulate aluminum[J]. *Int J Phytoremediat*, 2011, 13(5): 421–33.
- [19] 赵兰枝, 毛达, 林紫玉, 杨湘, 陈进洁, 张允伟. 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.
- [20] 石贵玉, 梁士楚, 黄雅丽, 韦宇静, 李佳枚. 互花米草幼苗对重金属镉胁迫的生理响应[J]. 广西植物, 2013, 33(6): 812–816.
- [21] 张振兴, 孙锦, 郭世荣, 王丽萍, 童辉. 增施钙素对盐胁迫下西瓜幼苗生长和可溶性蛋白含量及组分的影响[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(5): 20–24.
- [22] 付明, 卢嫣红, 姚元枝, 任宝红. 紫外分光光度法测定藜蒿的硒含量[J]. 江苏农业科学, 2009(5): 240–241.
- [23] 王赢. 铝胁迫下蚕豆 FTIR 特征及生理特性的研究[D]. 云南: 昆明理工大学, 2010.
- [24] Dean AP, Estrada B, Nicholson JM, Sigeo DC. Molecular response of *Anabaena flos-aquae* to differing concentrations of phosphorus: A combined Fourier transform infrared and X-ray microanalytical

- study[J]. *Phycologia Res*, 2008, 56(3): 193–201.
- [25] Mohaned GF, Mohaned SS, Safaa KSKH, Ahmed HMS, Mohie KM. Application of FTIR spectroscopy for rapid and simultaneous quality determination of some fruit products[J]. *Nat Sci*, 2011, 9(11): 21–31.
- [26] Prabhu M, Kavitha K, Manivasakan P, Rajendran V, Kulandaivelu P. Synthesis, characterization and biological response of magnesium-substituted nanobioactive glass particles for biomedical applications[J]. *Ceram Int*, 2013, 39(2): 1683–1694.
- [27] Davis R, Mauer LJ. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy: A rapid tool for detection and analysis of foodborne pathogenic bacteria [M]//Méndez-Vilas A ed. Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology. Spain: Formatex Research Center, 2010: 1582–1594.
- [28] 顾艳红, 刘鹏, 蔡琪敏, 陈洁, 谢鸿锴. FTIR结合生理特性研究镉胁迫对果灰藓的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 620–623.
- [29] Luo CL, Shen ZG, Li XD. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn, and Cd with EDTA and EDDS[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(1): 1–11.
- [30] Tandy S, Schulin R, Nowack B. The influence of EDDS on the uptake of heavy metals in hydroponically grown sunflowers[J]. *Chemosphere*, 2008, 62(9): 1454–1463.
- [31] Najeeb U, Xu L, Ali S, Jilani G, Gong HJ, Shen WQ, Zhou WJ. Citric acid enhances the phytoextraction of manganese and plant growth by alleviating the ultrastructural damages in *Juncus effusus* L. [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 170(2–3): 1156–1163.
- [32] 何宝燕, 尹华, 彭辉, 叶锦韶, 杨峰, 秦华明, 张娜. 酵母菌吸附重金属铬的生理代谢机理及细胞形貌分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(1): 194–198.
- [33] 乔琳, 傅兆麟, 乔传英. X射线能谱和FTIR分析铜胁迫对玉米幼苗的影响[J]. *核农学报*, 2011, 25(4): 0807–0811.
- [34] Yang SC, Li YB, Lin P. Change of leaf caloric value from *Avicennia marina* and *Aegiceras corniculatum* mangrove plants under cold stress[J]. *J Oceanography in Tai*, 2003, 22(1): 46–52.
- [35] Römkens P, Bouwrnan L, Japenga J, Draaisma C. Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soil[J]. *Environ Pollut*, 2002, 116(1): 109–121.
- [36] 韩冬芳, 王德汉, 黄培钊, 段继贤, 葛仁山, 周伟莉. 不同形态镁对‘早熟5号’大白菜产量及品质的影响[J]. *园艺学报*, 2010, 37(10): 1655–1660.
- [37] 武晓燕. 乙酰水杨酸对水生植物重金属毒害的缓解效应[D]. 南京: 南京师范大学, 2005.
- [38] Chen BL, Johnson EJ, Chefetz B, Zhu LZ, Xing BS. Sorption of polar and nonpolar aromatic organic contaminants by plant cuticular materials: the role of polarity and accessibility[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(16): 6138–6146.
- [39] Solís-Domínguez FA, González-Chávez MC, Carrillo-González R, Rodríguez-Vázquez R. Accumulation and localization of cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system[J]. *J Hazard Mater*, 2007, 141(3): 630–636.
- [40] 房江育, 马雪泥. 硅与植物抗逆性研究进展[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(11): 304–306.
- [41] Neumann D, zur Nieden U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants[J]. *Phytochemistry*, 2001, 56(7): 685–692.
- [42] Zhao XQ, Mitani N, Yamaji N, Shen RF, Ma JF. Involvement of silicon influx transporter OsNIP2;1 in selenite uptake in rice[J]. *Plant Physiol*, 2010, 153(4): 1871–1877.