

铅胁迫下硒处理的彩叶草根系和叶片的 SEM/ XRD 光谱学分析

袁菊红¹, 胡绵好^{2,*}

(¹江西财经大学园林系, 南昌 330032; ²江西财经大学资源环境系, 南昌 330032)

摘要: 以彩叶草 (*Coleus blumei* Benth.) 为材料, 在含 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Pb}^{2+}$ 的营养液中直接添加不同浓度 (0.1、0.5、1.0、2.5、5.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 亚硒酸钠, 利用 X-射线衍射技术 (XRD) 和扫描电镜技术 (SEM) 从光谱学角度初步探讨铅胁迫下不同浓度硒处理对彩叶草根系和叶片粉末的形态结构的影响。结果表明, 不同浓度硒对彩叶草根系和叶片粉末样品表面颗粒物微观形貌有较大影响, 其中 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硒处理的 SEM 图中颗粒分布较其它浓度处理的均匀, 结构紧密, 成扁平褶皱状; XRD 衍射角向右移, 强度、峰高、峰面积和半高宽减小。这说明 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硒能降低溶液中铅的迁移和转化; 颗粒的分布, 衍射角的移动, 强度、峰高、峰面积和半高宽等变化说明彩叶草体内铅结合形态有所变化。

关键词: 硒; 铅; 彩叶草; X-射线衍射; 扫描电子显微镜; 形态结构

中图分类号: S 68

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2013) 03-0562-09

SEM and XRD Analyses of the Roots and Leaves of Coleus with Selenium Supplements Under Lead Stress

YUAN Ju-hong¹ and HU Mian-hao^{2,*}

(¹Department of Landscape, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330032, China; ²Department of Resource Environment, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330032, China)

Abstract: With coleus (*Coleus blumei* Benth.) for the materials, using the planting method with nutrient solution containing $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Pb}^{2+}$ and adding different concentrations (0.1, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) sodium selenite, from the spectroscopy to study the effect of different selenium (Se) concentrations on the morphological and structural changes of Coleus under lead (Pb) stress by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) analysis. The results showed that the particle microstructure in the roots and leaves of Coleus under Pb stress were great influenced by different Se concentrations, the particle distribution in the roots and leaves from the SEM image of $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Se treatment was more uniform than the other concentration, and structure closer and flat plait shape, XRD diffraction angle moved to the right, and strength, high peak, peak area, and FWHM reduced. These indicated that $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Se can reduce the migration and transformation of Pb in the solution, and explain the changes of combination form of Pb in the Coleus through the particle distribution, diffraction

收稿日期: 2012-10-09; 修回日期: 2013-02-25

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

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: yankeu@gmail.com)

angle remove, the changes of strength, high peak, peak area and FWHM.

Key words: *Coleus blumei*; selenium; lead; X-ray diffraction (XRD); scanning electron microscopy (SEM); morphological and structural

铅 (Pb) 是重金属环境污染物质中影响最严重的元素之一, 其进入土壤后易与有机物结合, 极不易溶解, 主要富集在土壤表层又不向下移动, 严重影响农业生产, 对城市园林生态系统的健康和稳定也构成一定的威胁 (杨刚 等, 2005; Han et al., 2008)。植物可从土壤溶液中吸收可溶性铅或通过叶片上的气孔吸收污染空气中的铅, 当其在植物体内的含量超过一定的水平时, 就会对植物产生不良的影响。硒 (Se) 是人和动物必需的微量元素之一, 低浓度的硒还可使植物体内过氧化物酶活性提高, 增强植株的抗逆性、抗氧化能力及抗衰老能力, 有利保证植株正常生长 (Galeas et al., 2007)。硒与重金属有很强的亲和力, 可降低植物对 Pb、Cd、As、Hg 等重金属的吸收, 增强植物对这些重金属胁迫的抗性, 在一定程度上能够缓解重金属对植物的毒害作用 (吴建新 等, 2003; He et al., 2004; 李瑞平等, 2011), 硒类化合物对生物体内 Hg、As、Cd、Pb 等元素毒性还有拮抗作用 (李敏 等, 2005)。有关低浓度硒缓解重金属 (如 Cd、Al 等) 胁迫的机理已有报道 (Cartes et al., 2010; Sun et al., 2010), 但这些研究主要集中在代谢活性位点和抗氧化系统对自由基清除等方面, 而对于外源 Se 处理后植物组织颗粒分布、形貌变化及植物体内铅硒结合形态的组分变化等, 还缺乏深入的研究和直接证据。

形貌观察及物质结构与形态分析是物质研究的重要方面, 在地质分析中最传统, 最重要的结构测定方法是 XRD 技术, 各类电镜 (SEM, TEM 和 AEM) 也是最基本, 最常用的显微观察和结构测定方法。X-射线衍射技术 (X-ray diffraction, XRD) 是利用一束单色 X 射线入射到晶体 (由原子规则排列的晶胞) 时, 由不同原子散射的 X 射线相互干涉, 在某些特殊方向上产生强 X 射线衍射, 衍射线在空间分布的方位和强度与晶体结构密切相关, 已成为研究晶体最方便、最重要的手段; 因其具有不损伤样品、无污染、快捷、测量精度高、能得到有关晶体完整性的大量信息等优点, 也是研究固体样品成分与结构的一种有效分析技术和测试手段。扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 是在加速高压作用下, 由电子枪发射的电子经电子光学系统 (由聚光镜和物镜组成) 聚集成束照射到样品表面, 对样品进行逐行扫描, 具有放大倍数高、分辨率高、成像清晰、立体感强、样品制备简单等诸多优点, 是探索植物表面结构本质的重要手段之一。

彩叶草 (*Coleus blumei* Benth.) 也称五彩苏、五色草、锦紫苏, 是唇形科鞘蕊花属多年生草本植物, 其耐热、耐寒、耐湿能力及对光照的适应性较强。彩叶草叶色娇艳多变, 品种较多, 繁殖容易, 是室内绿化的佳品和露地花坛配置的理想材料, 目前已在园林绿化中被广泛应用。本试验中通过室内营养液培养方法, 以彩叶草为材料, 研究不同浓度 Se 处理对 Pb 胁迫下彩叶草各器官的形貌变化及其组分形态等变化, 以期从光谱学角度探讨 Se 对重金属 Pb 毒害的缓解机制, 为铅污染土壤的原位化学修复治理提供直接的光谱学证据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料与amp;试验设计

试验所用的彩叶草是从南昌花鸟市场购买的扦插幼苗。从土壤中拔出彩叶草幼苗, 用自来水把根系上的土壤洗干净 (尽量少伤根系) 后用自来水培养 10 d 左右, 再用 1/4 ~ 1/2 稀释的营养液培养 14 d, 使其长出更多新根, 以便更好地适应水生长环境。

试验于 2011 年 10 月 20 日在江西财经大学生态环境实验中心进行。选取粗度和高度基本一致, 生长健壮, 无病虫害, 叶片颜色一致的幼苗, 定植于 7 孔 (直径 32 mm) 的 PVC 板上, 每孔定植 4 株 (约 25 ± 2 g), 放在盛有 5 L 营养液的塑料桶中培养。基础完全营养液按赵兰枝等 (2007) 的配方, 组成成分 ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 3.0; KNO_3 4.0; KH_2PO_4 1.0; MgSO_4 1.0; MnCl_2 3.6×10^{-3} ; H_2BO_3 4.5×10^{-2} ; CuCl_2 8×10^{-4} ; ZnCl_2 1.5×10^{-3} ; $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 1.4×10^{-5} ; Fe-EDTANa_2 9.0×10^{-2} 。

10 月 27 日进行处理。硒浓度设 0、0.1、0.5、1.0、2.5 和 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 6 个处理, 以 Na_2SeO_3 形式加入; 铅胁迫浓度为 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 以 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 形式加入。用 PbSe^0 、 $\text{PbSe}^{0.1}$ 、 $\text{PbSe}^{0.5}$ 、 $\text{PbSe}^{1.0}$ 、 $\text{PbSe}^{2.5}$ 和 $\text{PbSe}^{5.0}$ 分别表示 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Pb}^{2+}$ 结合不同硒浓度处理。每个处理重复 4 次, 随机排列, 在自然温度、光照等条件下进行试验。每隔 7 d 换 1 次营养液, 处理同时进行连续曝气。11 月 17 日一次性收获彩叶草, 用不锈钢剪刀将根、茎、叶分离, 称其鲜质量, 再装入信封中放在 $70 \sim 75 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干, 磨细后备用。

1.2 样品 X-射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 分析

彩叶草根和叶中铅含量测定: 将磨碎后的样品用 $\text{HNO}_3\text{—HClO}_4$ 进行消化处理, 送至浙江大学教育部重点实验室——污染环境修复与生态健康实验室, 采用电感耦合等离子发射光谱法 (ICP-AES) 测定其铅含量。丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法提取, 分光光度法测定 (李合生, 2000)。

植物粉末状样品 XRD 和 SEM 分析在江西财经大学新能源技术与应用研究分析测试中心进行。

XRD 分析用德国 Bruker-AXS 公司生产的 D8 Advance X 射线衍射仪, 参数设置为: Cu 靶, 测试电压 40 kV, 测试电流 40 mA, 发射狭缝 1.0 mm, 防散射狭缝 1.0 mm, 索拉狭缝 2° , 采用 Ni 片滤掉 $\text{K}\beta$ 峰, 接收狭缝 0.2 mm, 闪烁计数器计数, 连续扫描方式。为了提高扫描分辨率, 扫描速度为 $1^\circ \cdot \text{min}^{-1}$, 步长 0.02° , 角度测试范围 $5^\circ \sim 90^\circ$ 。具体测定参见 Basta 和 McGowan (2004) 的方法。

SEM 分析用捷克 Tescan 公司生产的 VEGA II-LSU 型扫描电子显微镜, 具体扫描分析参考李同起等 (2004) 的方法。

采用 SPSS 17.0 和 Origin8.5 软件对数据进行统计分析和制图。所有数据均取平均值 ($n = 4$)。

2 结果与分析

2.1 硒对铅胁迫下彩叶草 MDA 和 Pb 含量的影响

由图 1 可知, 在 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Pb}$ 胁迫下, 用 Se 浓度为 $0.1 \sim 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理后, 彩叶草中 MDA 含量较无 Se 处理的明显降低 ($P < 0.05$), 特别是 Se 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时。这说明外加 Se 可降低彩叶草的膜脂过氧化水平, 缓解 Pb 对彩叶草造成的毒害作用。随着 Se 浓度的升高, MDA 含量总体上呈现升高趋势, 说明 Se 对 Pb 毒害作用的缓解程度随着 Se 浓度的升高而降低 (图 1)。当 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Pb}$ 单独处理后, 彩叶草根和叶中 MDA 含量最高, 这可能是由于 Pb 作用于细胞膜上的磷脂, 改变细胞膜透性, 导致细胞膜脂质过氧化水平升高, 引起细胞膜结构损伤, 使细胞膜透性增大。加入 Se 后, MDA 含量比 Pb 单独胁迫下显著降低, 可能是由于低浓度的 Se 与 Pb 形成 Pb-Se 复合物, 从而减轻植物整体 Pb 的负担。

随着营养液中 Se 浓度的提高, 彩叶草根和叶中铅的含量均下降, 这表明 Se 对彩叶草吸收铅具有拮抗作用 (图 1)。

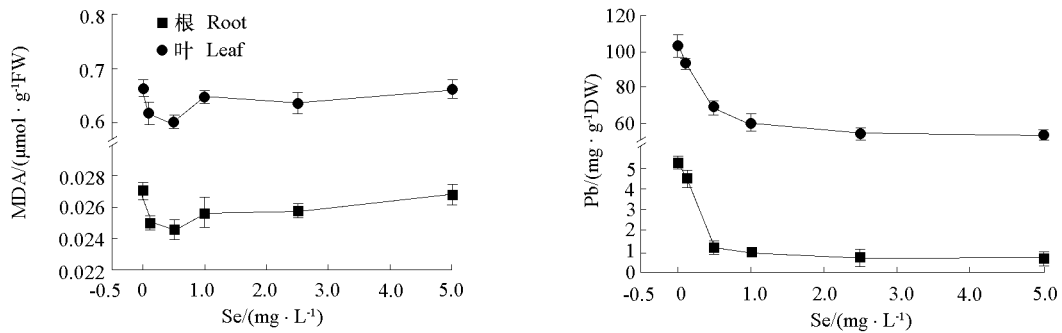


图 1 不同浓度硒对铅胁迫下彩叶草根和叶中 MDA 和 Pb 含量的影响

Fig. 1 Effect of Pb and MDA content in the roots and leaves of *Coleus blumei* with different concentrations of selenium under lead stress

2.2 硒对铅胁迫下彩叶草的 SEM、XRD 分析

2.2.1 硒对铅胁迫下彩叶草根系的 SEM、XRD 分析

不同浓度 Se 处理对铅胁迫下彩叶草根系粉末样品的颗粒分布、分散聚集度影响较大。如图 2 所示, PbSe^0 、 $\text{PbSe}^{0.1}$ 和 $\text{PbSe}^{0.5}$ 处理的彩叶草根系粉末样品表面颗粒分布不均匀, 随 Se 浓度提高而逐渐聚集; $\text{PbSe}^{1.0}$ 处理的颗粒分布呈扁平褶皱状, $\text{PbSe}^{2.5}$ 和 $\text{PbSe}^{5.0}$ 处理呈现高度聚集状态。这可能是由于铅胁迫下无 Se 处理的根系中元素组成与低浓度 Se 处理的差异不大, 只是元素含量发生了变化; 或可能是随着 Se 浓度的提高而导致特殊形貌根系中的元素组成与基体成分差异较大。

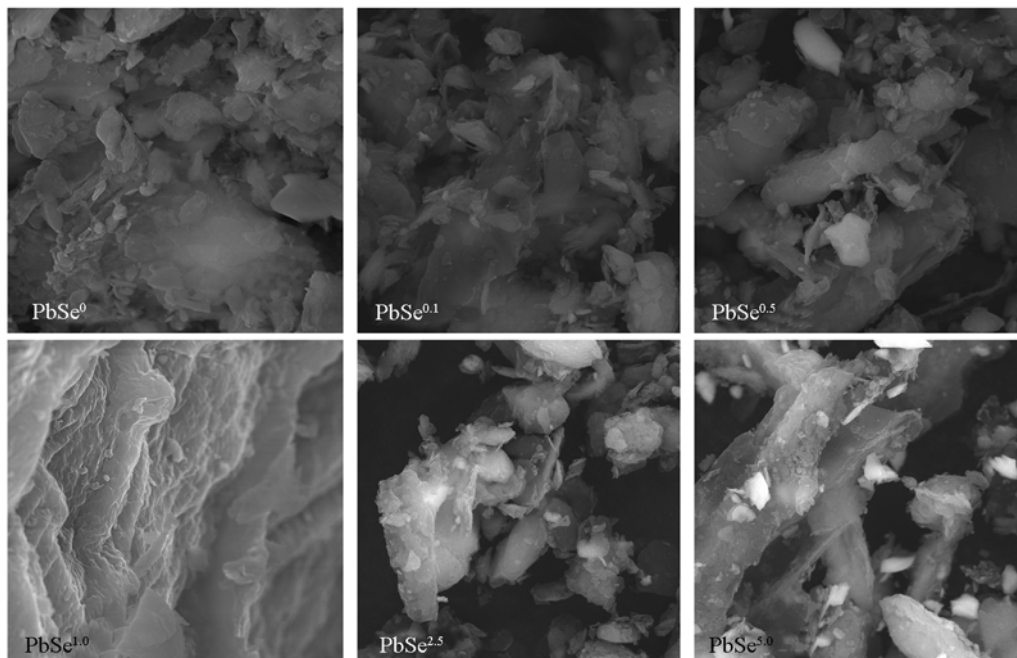


图 2 铅胁迫下不同浓度硒处理的彩叶草根系粉末样品表面扫描电镜图

Fig. 2 SEM image of *Coleus blumei* roots with different concentrations of selenium under lead stress

由图 3 可知, 在铅胁迫下, 不同浓度 Se 处理的彩叶草根系粉末样品的 XRD 衍射峰均落在 2θ 为 $20^\circ \sim 55^\circ$ 之间 (除 $\text{PbSe}^{0.1}$ 处理生成的 68.8° 峰外), 但峰数量、位置、强度却随着 Se 处理浓度的变化而变化。 PbSe^0 处理 XRD 衍射峰为 19 个, $\text{PbSe}^{0.1}$ 处理为 8 个, $\text{PbSe}^{0.5}$ 和 $\text{PbSe}^{2.5}$ 处理均为 6 个, $\text{PbSe}^{1.0}$ 处理为 22 个, $\text{PbSe}^{5.0}$ 处理为 5 个 (图 3)。与 PbSe^0 处理的彩叶草根系粉末样品 XRD 衍射角和强度相比, $\text{PbSe}^{0.1}$ 、 $\text{PbSe}^{0.5}$ 和 $\text{PbSe}^{2.5}$ 处理 XRD 衍射角呈边界小衍射角向右移而边界大衍射角向左移的变化, 且这 3 个浓度处理的峰强度均增强; $\text{PbSe}^{1.0}$ 处理的衍射角向右移且强度减弱 (图 3)。

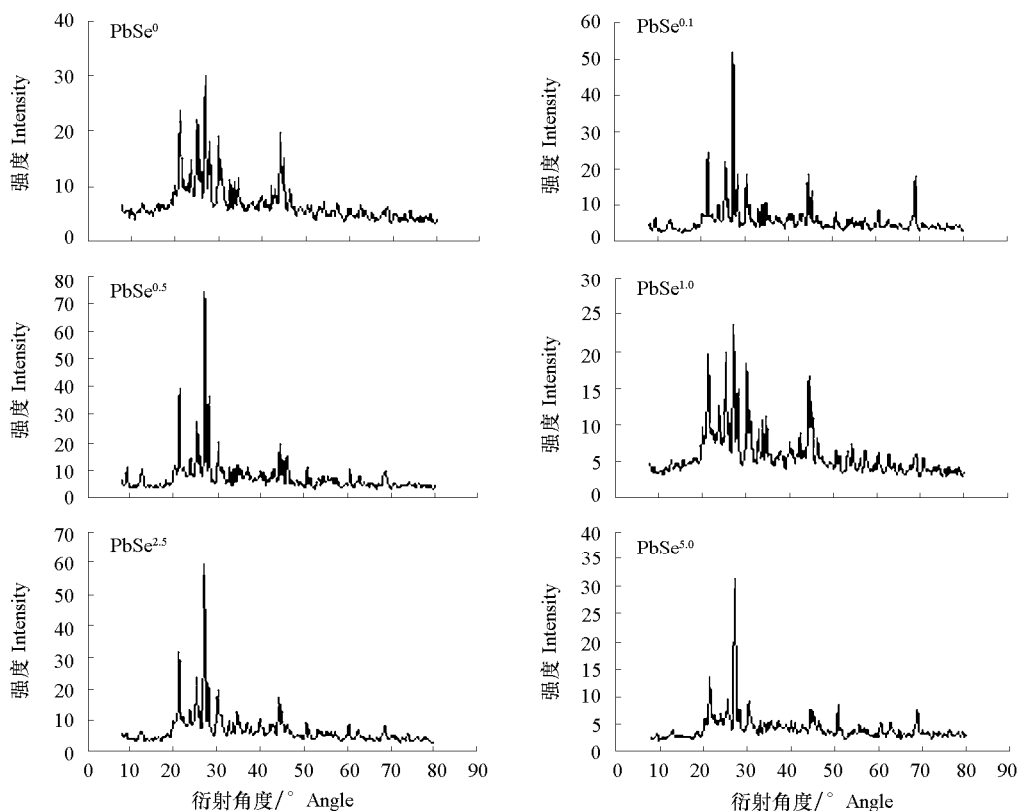


图 3 铅胁迫下不同浓度硒处理的彩叶草根系粉末样品 XRD 谱图

Fig. 3 XRD patterns of *Coleus blumei* roots with different concentrations of selenium under lead stress

由表 1 可知, 与 PbSe^0 处理的根系粉末样品两个 XRD 衍射角 21.33° 、 27.12° 相比, $\text{PbSe}^{0.1}$ 、 $\text{PbSe}^{1.0}$ 和 $\text{PbSe}^{5.0}$ 处理的衍射角右移动, 而 $\text{PbSe}^{0.5}$ 和 $\text{PbSe}^{2.5}$ 处理的则向左移动。这一方面可能是由于半径小的 Se 原子的掺入影响根系中主体原子 Pb 峰向右移动, 另一方面也可能是由于根系层间插入了 Se 离子或 Se 的有机物而导致层间距离加大使峰位往小角度移动。 $\text{PbSe}^{0.1}$ 、 $\text{PbSe}^{0.5}$ 和 $\text{PbSe}^{2.5}$ 处理后根系粉末样品 XRD 谱中峰强、峰高及峰面积均增大, 半高宽减小 (表 1)。这说明在铅胁迫下, 这些浓度 Se 处理可使根系结晶度增强, 晶相含量提高及晶粒度增大。 $\text{PbSe}^{1.0}$ 处理的根系粉末样品 XRD 谱中峰强、峰高及峰面积均减小, 半高宽减小但比其它各浓度处理的大。而 $\text{PbSe}^{5.0}$ 处理在衍射角为 27.21° 时, 峰强、峰面积和峰高增加, 半高宽减小; 在衍射角度为 21.47° 时, 峰强和峰高降低, 峰面积和半高宽增加 (表 1)。这说明铅胁迫下, Se 浓度为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时虽然可使根系粉末样品 XRD 峰增多, 但其结晶度、晶相含量和晶粒度均降低。

表 1 铅胁迫下不同浓度硒处理彩叶草根系粉末样品 XRD 数据分析

Table 1 XRD data Analysis of *Coleus blumei* roots with different concentrations of selenium under lead stress

硒浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Selenium concentration	角度 / ° Angle	强度 Intensity	峰面积 Peak area	半高宽 Full width at half maximum	峰高 Peak high
0	21.33	22.97	14.89	0.60	19.58
	27.12	29.20	15.93	0.53	25.81
0.1	21.40	22.94	24.68	0.45	20.61
	27.16	50.83	21.14	0.40	48.50
0.5	21.29	37.93	36.82	0.44	34.60
	27.09	72.41	33.37	0.43	69.08
1.0	21.36	19.05	11.24	0.59	16.01
	27.19	22.95	11.32	0.51	19.90
2.5	21.29	30.26	43.03	0.52	27.55
	27.09	58.14	27.53	0.43	55.43
5.0	21.47	12.74	27.06	0.66	10.59
	27.21	30.41	19.77	0.46	28.27

2.2.2 硒对铅胁迫下彩叶草叶片的 SEM、XRD 分析

不同浓度硒处理对铅胁迫下彩叶草叶片形貌及颗粒的分布影响较大(图 4)。PbSe⁰ 处理的叶片粉末样品表面颗粒大小和分散状态不均匀; PbSe^{0.1} 处理其颗粒呈扁片状且不均匀; PbSe^{0.5} 处理呈整块扁平状; 而 PbSe^{1.0} 处理在这种扁平状上有许多褶皱, 分布较为均匀; 然而 PbSe^{2.5} 和 PbSe^{5.0} 处理其颗粒分布极不均匀且呈现高度聚集的状态(图 4)。

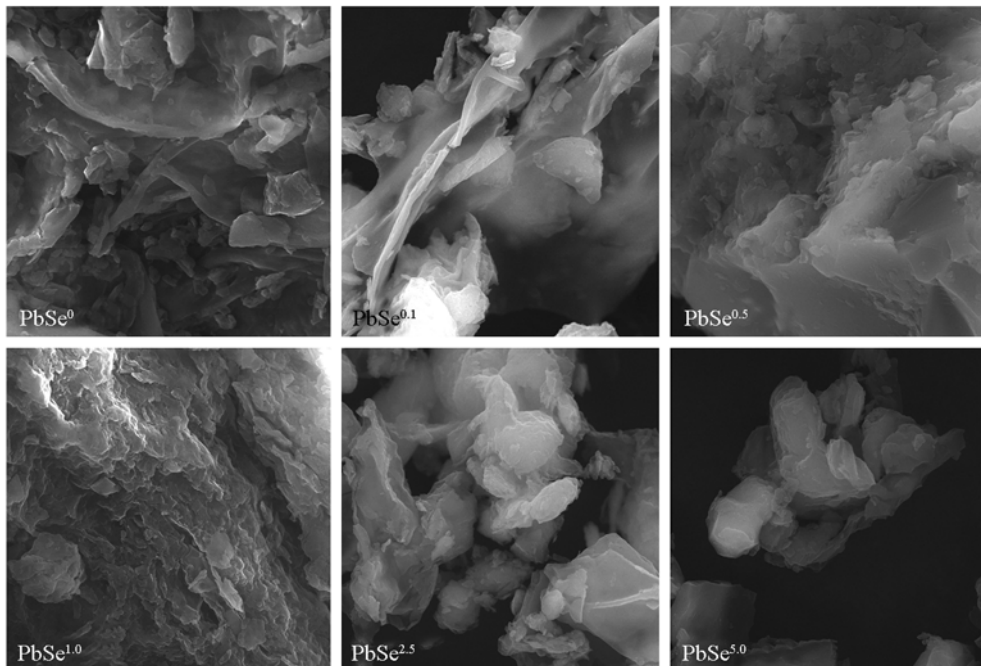


图 4 铅胁迫下不同浓度硒处理彩叶草叶片粉末样品扫描电镜图

Fig. 4 SEM image of *Coleus blumei* leaves with different concentrations of selenium under lead stress

由图 5 可知, 在铅胁迫下, 随着硒处理浓度的变化彩叶草叶片粉末样品 XRD 衍射峰数量、衍射角位置及强度也发生变化。PbSe⁰ 处理 XRD 衍射峰为 60 个, 主要集中在衍射角 9.22° ~ 52.1° 之间;

$\text{PbSe}^{0.1}$ 处理衍射峰为 63 个, 主要集中在衍射角 $9.95^\circ \sim 55.59^\circ$ 之间; $\text{PbSe}^{0.5}$ 处理衍射峰为 61 个, 主要集中在衍射角 $13.3^\circ \sim 55.42^\circ$ 之间, 同时在衍射角 60.44° 和 70.49° 各有 1 个峰; $\text{PbSe}^{1.0}$ 处理衍射峰为 57 个, 主要集中在衍射角 $10.27^\circ \sim 52.93^\circ$ 之间; $\text{PbSe}^{2.5}$ 处理衍射峰为 54 个, 主要集中在衍射角 $10.11^\circ \sim 51.19^\circ$ 之间; $\text{PbSe}^{5.0}$ 处理衍射峰为 72 个, 主要集中在衍射角 $10.86^\circ \sim 78.84^\circ$ 之间 (图 5)。与 PbSe^0 处理相比, 不同浓度硒处理使衍射角的位置均向右移动, 其中 $\text{PbSe}^{0.5}$ 处理的移动较大, 这说明了原子半径小的 Se 掺入致使主体原子 Pb 的存在形式发生变化。

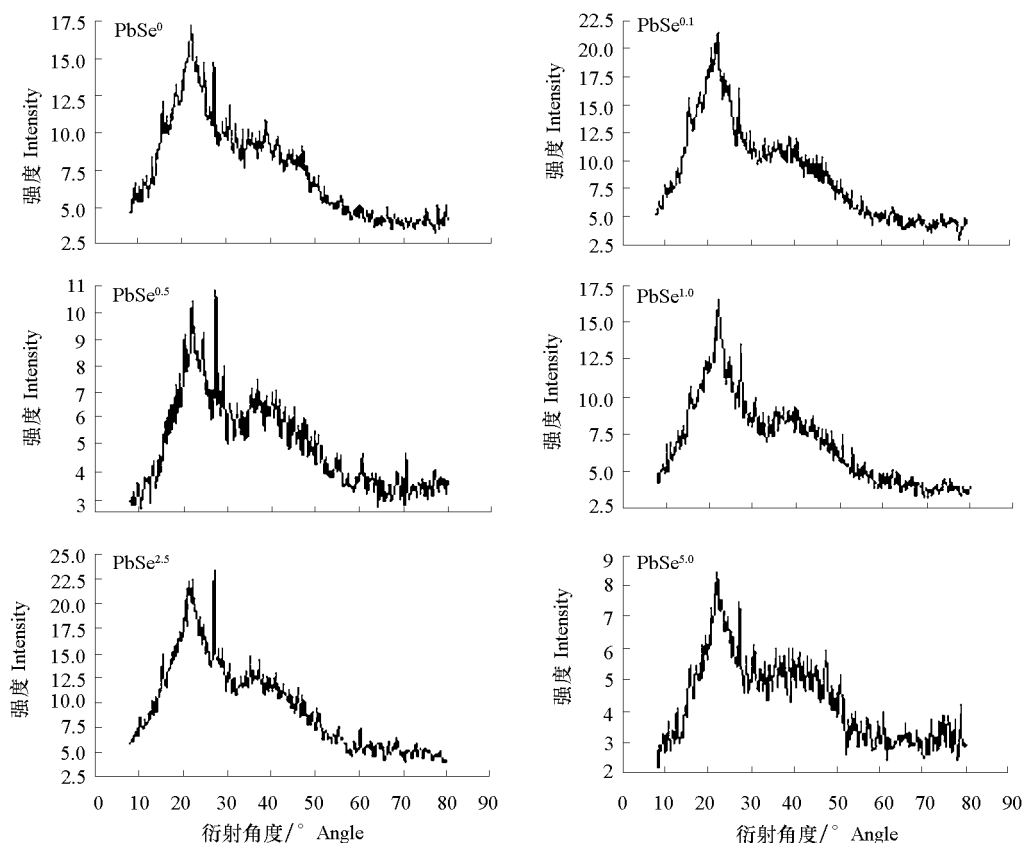


图 5 铅胁迫下不同浓度硒处理彩叶草叶片粉末样品 XRD 谱图

Fig. 5 XRD patterns of *Coleus blumei* leaves with different concentrations of selenium under lead stress

通过 Origin8.5 软件对叶片粉末样品 XRD 衍射角下特殊峰的分析发现, 不同浓度硒处理对峰强度、面积、峰高及半高宽的影响较大 (表 2)。

与 PbSe^0 处理下叶片粉末样品 XRD 衍射角 21.98° 相比, $\text{PbSe}^{0.1}$ 和 $\text{PbSe}^{0.5}$ 处理叶片 XRD 衍射角向小角度移动 (即左移), $\text{PbSe}^{1.0}$ 、 $\text{PbSe}^{2.5}$ 和 $\text{PbSe}^{5.0}$ 处理向右移动; 不同浓度硒处理叶片峰面积和半高宽均减小 (表 2); 与 PbSe^0 处理下 XRD 衍射角为 24.90° 和 27.16° 相比, 峰面积和半高宽也随着不同浓度硒处理而减小 (表 2)。这说明这些浓度 ($\text{PbSe}_{1.0}$, $\text{PbSe}^{2.5}$, $\text{PbSe}^{5.0}$) 促进叶片层间无机 Se 或有机 Se 的生成, 使叶片晶相含量、结晶体程度提高, 从而使缓解 Pb 对叶片毒害作用。

表 2 铅胁迫下不同浓度硒处理彩叶草叶片粉末样品 XRD 数据分析

Table 2 XRD data analysis of *Coleus blumei* leaves with different concentrations of selenium under lead stress

硒浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Selenium concentration	角度 / ° Angle	强度 Intensity	峰面积 Peak area	半高宽 Full width at half maximum	峰高 Peak high
0	21.98	16.86	24.14	1.97	13.58
	24.90	14.37	11.50	1.26	11.09
	27.16	14.34	8.08	0.93	11.06
0.1	21.87	20.78	11.26	0.65	17.91
	24.87	16.30	15.52	1.27	13.43
	27.09	16.03	9.50	0.88	13.17
0.5	21.90	10.27	7.14	1.05	7.62
	24.90	7.59	1.90	0.40	4.94
	27.31	10.73	4.91	0.78	8.07
1.0	22.00	16.21	20.63	1.88	12.92
	24.83	12.35	5.93	0.71	9.07
	27.19	13.15	8.21	1.07	9.87
2.5	22.02	21.88	11.33	0.66	17.90
	24.71	17.41	11.57	0.92	13.44
	27.06	22.88	18.80	1.46	18.91
5.0	22.2	8.26	4.57	0.81	6.08
	24.65	6.84	2.73	0.60	4.67
	27.37	7.34	4.18	1.06	5.16

3 讨论

MDA 的含量变化可以反映细胞膜脂过氧化程度以及对逆境反应的强弱 (Kanazzwa et al., 2000; 刘建新 等, 2006)。本试验研究结果表明, 1.0 mmol · L⁻¹ Pb 胁迫下, 用浓度为 0.1 ~ 5 mg · L⁻¹ Se 处理后, 彩叶草中 MDA 含量明显较无 Se 处理的低 ($P < 0.05$), 特别是 Se 浓度为 0.5 mg · L⁻¹ 时。随着 Se 浓度的升高, MDA 含量总体上呈现升高趋势, 说明 Se 对 Pb 毒害作用的缓解程度随着 Se 浓度的升高而降低。该结果与在蜈蚣草 (Srivastava et al., 2009) 和小麦 (李瑞平等, 2011) 中的结果相似。本试验中还发现, 当 1.0 mmol · L⁻¹ Pb 单独处理后, 彩叶草根和叶中 MDA 含量最高, 而随着营养液中 Se 浓度的提高, 根和叶中铅的含量均下降, 这说明 Se 对彩叶草吸收铅具有拮抗作用。该发现与对油菜 (段晓琴和宋满坡, 2006)、桃和梨 (张志元 等, 2011) 的研究结果一致。

本试验中利用 SEM 和 XRD 对彩叶草根系研究发现, 不同浓度 Se 处理对铅胁迫下彩叶草根系粉末颗粒大小影响不大, 对其分散聚集程度影响较大, 根系粉末 XRD 衍射峰均落在 2θ 为 $20^\circ \sim 55^\circ$ 之间 (除 PbSe^{0.1} 处理生成的 68.8° 峰外), 但峰数量、位置、强度却随着 Se 处理浓度的变化而变化。PbSe^{1.0} 处理的根系粉末颗粒分布成扁平褶皱状, 根系衍射角向右移, 峰强、峰高及峰面积均减小, 半高宽减小但比其它各浓度处理的要大。结合根系中 MDA 变化, 初步猜测 1.0 mg · L⁻¹ Se (PbSe^{1.0}) 是缓解铅胁迫的有利浓度, 然而其通过产生哪些物质及其作用来缓解, 还有待深入研究。同时在叶片中也发现, 不同浓度 Se 处理对铅胁迫下彩叶草叶片粉末形貌及颗粒的分布影响较大, 叶片 XRD 衍射峰数量、衍射角位置及强度也发生变化。硒浓度为 1.0 mg · L⁻¹ 时, 这种扁平状上有许多褶皱, 分布较为均匀, 叶片粉末 XRD 衍射角向右移动, 但不同浓度 Se 处理叶片峰面积和半高宽均减小。然而, 1.0 mg · L⁻¹ 硒处理的铅胁迫彩叶草叶片中晶体以何种盐形成结晶体, 叶片中 Se 的有机形态是哪一种或哪一类形式, 它们是不是在植物对环境胁迫的过程中起作用, 还有待深入研究。

References

- Basta N T, McGowan S L. 2004. Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil.

- Environmental Pollution, 127 (1): 73 - 82.
- Cartes P, Jara A A, Pinilla L, Rosas A, Mora M L. 2010. Selenium improve the antioxidant ability against aluminium-induced oxidative stress in ryegrass roots. *Annals of Applied Biology*, 156 (2): 297 - 307.
- Duan Xiao-qin, Song Man-po. 2006. Experiment study on inhibition action of selenium to lead in plant. *Guangdong Trace Elements Science*, 13 (8): 36 - 38. (in Chinese)
- 段晓琴, 宋满坡. 2006. 硒对铅在植物体内抑制作用的实验研究. *广东微量元素科学*, 13 (8): 36 - 38.
- Galeas M L, Zhang L H, Freeman J L, Wegner M, Pilon-Smits E A. 2007. Seasonal fluctuations of selenium and sulfur accumulation in selenium hyperaccumulators and related non-accumulators. *New Phytologist*, 173 (3): 517 - 525.
- He P P, Lv X Z, Wang G Y. 2004. Effect of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables. *Environment International*, 30 (2): 167 - 172.
- Han Y L, Huang S Z, Gu J G, Qiu S, Chen J M. 2008. Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L.. *Ecotoxicology*, 17 (8): 853 - 859.
- Kanazzwa S, Sano S, Koshiha T, Ushimaru T. 2000. Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: Comparison with those during dark-induced senescence. *Physiologia Plantarum*, 109 (2): 211 - 216.
- Li He-sheng. 2000. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment. Beijing: Higher Education Press: 164 - 169. (in Chinese)
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社: 164 - 169.
- Li Tong-qi, Wang Cheng-yang, Liu Xiu-jun, Zheng Jia-ming, Wang Hui. 2004. Scanning electron microscope analysis on the evolution of carbon layer structure in mesocarbon microbeads with temperature. *Chinese Science Bulletin*, 49 (7): 633 - 638. (in Chinese)
- 李同起, 王成扬, 刘秀军, 郑嘉明, 王 慧. 2004. 中间相炭微球之碳层结构随温度演变的扫描电子显微镜分析. *科学通报*, 49 (7): 633 - 638.
- Li Min, Gao Jun-quan, Li Xiao-wei. 2005. Antagonistic action of selenium against the toxicity of lead. *Journal of Hygiene Research*, 34 (3): 375 - 377. (in Chinese)
- 李 敏, 高俊全, 李筱薇. 2005. 硒对铅毒性的拮抗作用. *卫生研究*, 34 (3): 375 - 377.
- Liu Jian-xin, Zhao Guo-lin, Wang Yi-min. 2006. Effects of Cd and Zn combined stress on membrane lipid peroxidation and antioxidant enzyme system of Maize seedlings. *Journal of Agro-Environment Science*, 25 (1): 54 - 58. (in Chinese)
- 刘建新, 赵国林, 王毅民. 2006. Cd、Zn 复合胁迫对玉米幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统的影响. *农业环境科学学报*, 25 (1): 54 - 58.
- Li Rui-ping, Li Guang-de, Yuan Yu-fei, Hou Cun-dong, Yu Chong. 2011. Effects of Se on some physiological characteristics of wheat seeding under Hg stress. *Ecology and Environmental Sciences*, 20 (5): 975 - 979. (in Chinese)
- 李瑞平, 李光德, 袁宇飞, 侯存东, 于 冲. 2011. 硒对汞胁迫小麦幼苗生理特性的影响. *生态环境学报*, 20 (5): 975 - 979.
- Srivastava M, Ma L Q, Rathinasabapathib B, Srivastava P. 2009. Effect of selenium on arsenic uptake in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Bioresource Technology*, 100 (3): 1115 - 1121.
- Sun H W, Ha J, Liang S X, Kang W J. 2010. Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 41 (10): 1195 - 1204.
- Wu Jian-xin, Ding Xiao-yu, Luo Yu-ming, Shen Jie, Bao Shu-lin, Ding Bing-zhong. 2003. Selenium relief of cadmium toxicity of *Potamogeton maackianus*. *China Environmental Science*, 23 (2): 180 - 183. (in Chinese)
- 吴建新, 丁小余, 罗玉明, 沈 洁, 保曙琳, 丁秉中. 2003. 黄丝草镉污染毒害及硒的缓解作用. *中国环境科学*, 23 (2): 180 - 183.
- Yang Gang, Wu Jun, Tang Ya. 2005. Research advances in plant resistance mechanisms under lead stress. *Chinese Journal of Ecology*, 24 (12): 1507 - 1512. (in Chinese)
- 杨 刚, 伍 钧, 唐 亚. 2005. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展. *生态学杂志*, 24 (12): 1507 - 1512.
- Zhao Lan-zhi, Mao Da, Lin Zi-yu, Yang Xiang, Chen Jin-jie, Zhang Yun-wei. 2007. Effects of different nutrient solution on pigment content and photosynthesis of *Coleus blumei*. *Guangdong Agricultural Sciences*, (6): 30 - 32. (in Chinese)
- 赵兰枝, 毛 达, 林紫玉, 杨 湘, 陈进洁, 张允伟. 2007. 不同营养液对彩叶草色素含量及光合作用的影响. *广东农业科学*, (6): 30 - 32.
- Zhang Zhi-yuan, Zhang Yi, Guo Qing-quan, You Yong, Ming Qian-qian. 2011. Antagonism role of containing selenium plant nutrition agent used on peach and pear in absorption of lead, cadmium and mercury. *Crop Research*, 25 (4): 368 - 369. (in Chinese)
- 张志元, 张 翼, 郭清泉, 游 勇, 明倩倩. 2011. 含硒植物营养剂对桃和梨吸收铅、镉、汞的拮抗作用. *作物研究*, 25 (4): 368 - 369.