农 业 资 源 与 环 境 学 报
2014 年 4 月·第 31 卷·第 2 期:155-163

Journal of Agricultural Resources and Environment
April 2014·Vol.31·No.2:155-163

不同浓度硒处理对彩叶草铅胁迫的 EDXS 和 XRD 分析

秦慧媛,胡绵好*

(江西财经大学旅游与城管管理学院资源环境系,江西 南昌 330032)

摘 要:以彩叶草(*Coleus blumei* Benth.)为材料,用营养液培养方法,研究了不同浓度硒(Se)处理对浓度为 1.0 mmol·L^{-1} Pb^{2+} 胁迫下彩叶草根、叶的形貌变化及其组分形态等变化,从光谱学角度初步探讨了硒对重金属铅毒害的缓解机制。结果表明:铅胁迫下的彩叶草根系 C、K、Ca 含量减少,O、Mg、Al、Si、Fe、Pb 含量增加,叶片中的 C、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe 含量减少,O、Cl 含量增加。铅胁迫下硒处理的彩叶草根元素种类及其元素含量均发生了明显变化;根中晶体情况及其晶相也发生了相应变化。

关键词:硒; 铅胁迫; 彩叶草; 扫描电子显微镜-X 射线能谱仪; X-射线衍射

中图分类号:Q945.78 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2014)02-0155-09 **doi**:10.13254/j.jare.2013.0230

EDXS and XRD Analyses of Coleus with Different Concentration Selenium Supplements Under Lead Stress

QIN Hui-yuan, HU Mian-hao*

(Department of Resource and Environment, School of Tourism and Urban Management, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330032, China)

Abstract: In order to study the changes of the morphologies and element composition in *Coleus blumei* Benth(Coleus)roots and leaves under 1.0 mmol·L^{-1} Pb^{2+} stress with selenium(Se) treatments, and to preliminarily investigate the relief mechanism of Se level on lead toxicity from the perspective of spectroscopy, Coleus was cultivated in nutrient solutions with different concentrations of Se. The results showed that the content of C, K and Ca elements in roots decreased, while O, Mg, Al, Si, Fe and Pb elements increased under Pb stress with Se treatments. In addition, the content of C, Mg, Al, Si, K, Ca and Fe elements in leaves decreased, while O and Cl elements increased. The element species and its contents in roots were changed obviously under Pb stress with Se treatments, and crystalline solid and crystal phase in roots were correspondingly changed.

Keywords: selenium; lead stress; *Coleus blumei* Benth; scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer(SEM-EDXS);X-ray diffraction(XRD)

随着现代工农业和社会经济的快速发展,重金属污染问题日趋严重。铅(Pb)是环境中对动植物以及人类毒性最强的重金属元素之一,其进入土壤后极易与有机物结合,且大多数存于土壤表面,难溶解,几乎不向下移动。我国铅锌矿产资源丰富,矿业开发所造成的土壤铅污染量大面广,已成为国内外环境保护与治理中不可忽视的问题。有关铅污染环境的修复已引起了全世界学者的高度关注。国外对改良、治理铅污染土壤采用的较先进的方法主要有固定法、提取法、生物降解法、电动修复法、热解吸法等等,而国内现阶段采用较多的方法有施用化学改良剂、生物处理法、增施有机肥等[1],尽管这些方法都具有一定的修复改良效果,但都存在一定的局限性,难以大规模推广应用。植物修复是利用植物去除环境中污染物质的技术,由于其原位修复、成本低、不造成二次污染等多种优势而成为国际范围的研究热点。

硒(Se)是人和动物必需的微量元素,是动物和人体谷胱甘肽氧化酶的组成成分,是一种重要的免疫功能增强剂;硒也是植物生长所需的一种有益元素,具有刺激植物生长发育、提高作物产量与品质、促进植物新陈代谢、增强植物抗氧化和抵抗环境胁迫的作用[2]。同时,硒对镉、铅等重金属具有拮抗作用,在一定程度上能够缓解重金属对植物的毒害作用[3]。当硒浓度处于一个较低水平时,硒溶液能够减缓重金属(Pb、Cd、

收稿日期:2013-12-02
基金项目:国家自然科学基金(21367013, 41001376);国家大学生创新创业训练计划项目(201310421015)
作者简介:秦慧媛(1992—),女,广西桂林人,主要从事环境修复方面的研究。E-mail:qin-hy@foxmail.com
* **通信作者**:胡绵好 E-mail:yankeu@gmail.com

As、Hg 等)对动植物的胁迫作用,硒与重金属呈现拮抗作用;当硒浓度超过一定浓度水平时,硒溶液加重了这些重金属的胁迫作用,硒与铅呈现协同作用[4-8]。硒可通过降低膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量,提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和脯氨酸(Pro)含量来保护细胞膜的完整性;降低重金属离子含量,有效抑制植物对重金属镉和铅的吸收[9-10]。吴华莲等[11]从光谱学角度证实硒能有效减轻由H_2O_2胁迫下引起钝顶螺旋藻(*Spirulina Platensis*)的氧化损伤。然而,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 处理后重金属胁迫下植物组织形貌变化、元素成分变化及其非晶体或晶体等变化还缺乏深入的研究和直接证据。

与非观赏性植物相比,利用花卉植物进行铅污染环境的修复,不仅能降低环境中铅的含量,同时还能达到美化环境的目的[12],将成为未来铅污染环境修复的首选植物。彩叶草(*Coleus blumei* Benth)是多年生草本观叶类花卉植物,耐热、耐寒,对日照有较强的忍耐力,在一定程度上可通过改变渗透调节物质种类或积累量适应渗透胁迫[13]。彩叶草具有较高的观赏价值,在园林和城市绿化美化、植物景观营造等方面受到园艺和园林工作者的推崇。近年的研究还发现[14-15],彩叶草对铅胁迫表现出较强的耐性且富集铅的能力较强,其在铅污染植物修复中显示出极强的优越性和巨大的潜力[15],但其对铅耐性和积累能力的机理方面等研究还亟待深入探讨[16]。因此,本试验以彩叶草为材料,通过室内营养液培养方法,研究不同浓度硒处理对铅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硒对重金属铅毒害的缓解机制,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,也为利用花卉植物进行铅污染土壤的修复、净化和美化环境以及保障人类健康提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验材料为市场上购买的高度(≥15 cm)基本一致、生长健壮、无病虫害、叶片颜色一致的彩叶草扦插幼苗。从土壤中拔出彩叶草幼苗,用自来水把根系上的土壤冲洗干净(尽量少伤根系)后用自来水培养 10 d 左右,在 1/4~1/2 的 Hoagland 营养液中培养 14 d,使其长出新根,更好地适应生长环境。按照赵兰枝等[17]的配方配制基础完全营养液,其组成成分如下:$Ca(NO_3)_2$ 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}、$(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ 1.4×10^{-5}、Fe-EDTANa_2 9.0×10^{-2} mmol·L^{-1}。对彩叶草进行 7 d 基础完全营养液培养后,于 2011 年 10 月 20 日—11 月 12 日进行实验处理。设 2 组对照组,第一组铅、硒浓度均为 0,即未添加铅和硒,用 Pb^0Se^0 表示;第二组铅浓度为 1 mmol·L^{-1},硒浓度为 0,用 Pb^1Se^0 表示。再设 5 组铅均为 1.0 mmol·L^{-1},硒浓度分别为 0.1、0.5、1.0、2.5 mg·L^{-1} 和 5.0 mg·L^{-1} 的实验组,分别用 $Pb^1Se^{0.1}$、$Pb^1Se^{0.5}$、Pb^1Se^1、$Pb^1Se^{2.5}$、Pb^1Se^5 表示。铅以 $Pb(NO_3)_2$ 形式加入,硒以 Na_2SeO_3 形式加入。每个处理 4 次重复,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。处理 3 个星期后一次性收获彩叶草,将根、茎、叶分离后称其鲜重,装入信封中置于 70~75 ℃烘箱中烘干,磨细后备用。

1.2 扫描电子显微镜(SEM)-X 射线能谱仪(EDXS)分析和 X-射线衍射(XRD)分析

烘干后的彩叶草根、叶样品在玛瑙研钵中研磨,经压片和喷金后,利用 SU1510 型扫描电子显微镜(日本日立公司)和 250X-Max50 型能谱仪(英国牛津 INCA 公司)观察其表面微观结构,并对表面元素进行测定分析。具体扫描分析参考文献[18]的方法。能谱仪技术指标:电压为 20 kV,电子束 6.0,工作距离 10.0 mm。

采用 D8 Advance X 射线衍射仪(德国 Bruker-AXS 公司)进行 XRD 分析,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 Kβ 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°·min^{-1},步长 0.02°,角度测试范围 5°~80°。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 Origin 8.5 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 结果与讨论

2.1 彩叶草根系的 EDXS 和 XRD 分析

2.1.1 根系的 EDXS 分析

SEM 与 EDXS 联用为材料的元素分析提供了方便,对原子序数高的元素,可以做到定性和半定量分析;对轻元素分析,如碳,多数为定性分析[19]。分别对

经不同硒处理的彩叶草根系粉末样品表面形貌进行 SEM-EDXS 表征(图 1),结果表明不同处理下彩叶草根系样品表面颗粒形貌差距比较大。Pb^0Se^0 处理的彩叶草根系粉末样品表面颗粒轮廓清晰。$Pb^1Se^{0.5}$、Pb^1Se^1、$Pb^1Se^{2.5}$、Pb^1Se^5 处理后则处于高度聚集状态,颗粒有明显膨胀感,以 $Pb^1Se^{0.5}$、Pb^1Se^5 最为明显。对照组一(Pb^0Se^0)的彩叶草根系粉末样品表面含有 C、O、Al、Si、K、Ca、Fe 等元素。对照组二(Pb^1Se^0)主要有 C、O、Mg、Al、Si、K、Fe、Pb 等元素。实验组主要有 C、O、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe、Pb 等元素,Pb^1Se^1 处理还出现少量 S、Ti,$Pb^1Se^{2.5}$ 处理出现 Cl、Ti,Pb^1Se^5 处理出现 Na、Cl。

由表 1 可知,氧的含量较高,由于单独的金属元素不可能单独形成阴离子,因此各元素多是以含氧化合物的形式存在。对照组二与对照组一相比较,O、Mg、Al、Si、Ca、Pb 含量增加,C、K、Fe 含量减少。这可能是铅胁迫对植物体产生毒害,影响了彩叶草根系的抗氧化系统而使 O 增多, 导致植物对矿质营养元素

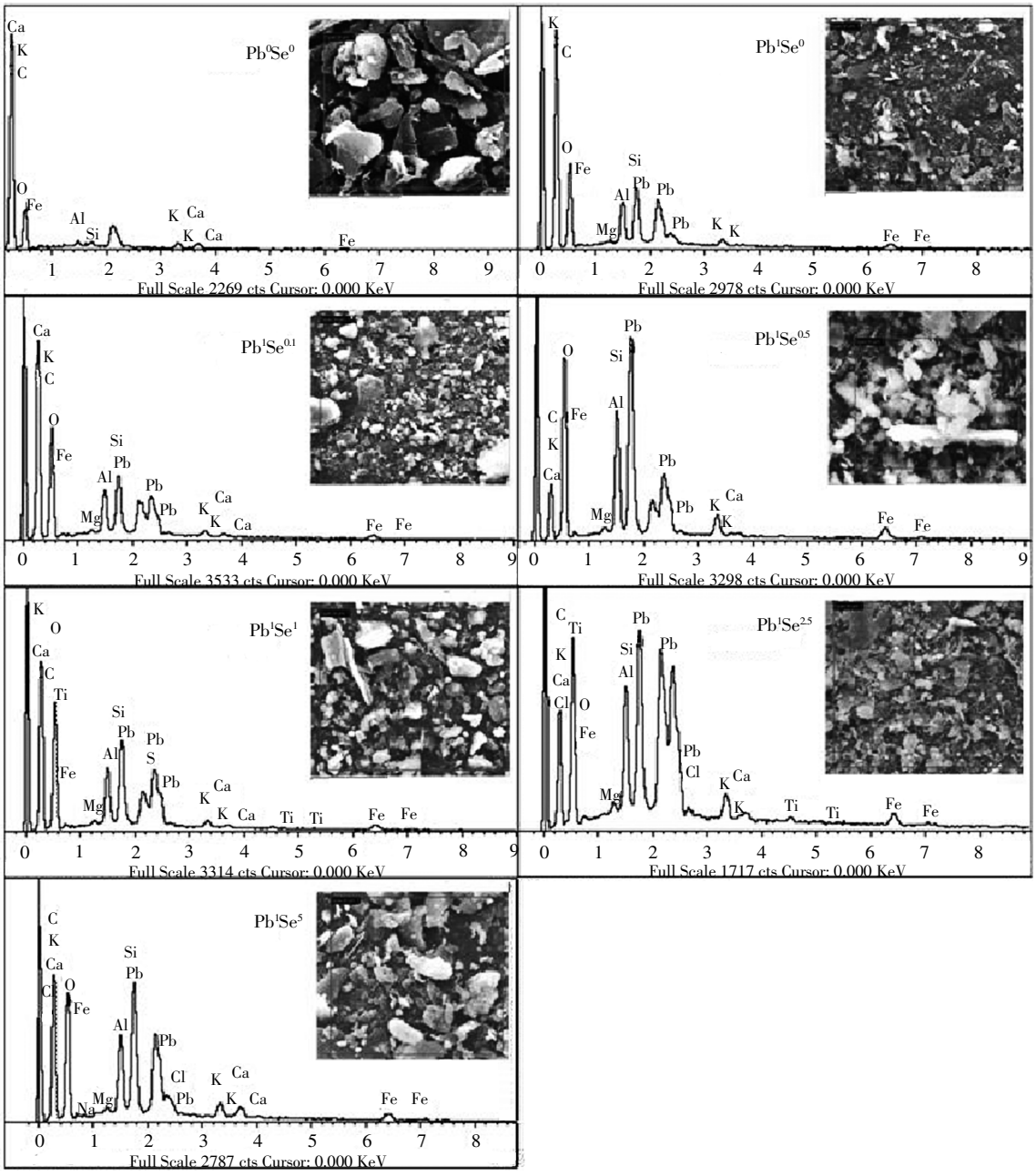

图 1 彩叶草根系粉末样品表面的 SEM-EDXS 扫描图谱

Figure 1 SEM-EDXS images of *C. blumei* roots powder

表 1 彩叶草根系粉末样品表面的 EDXS 成分(%)

Table 1 Element content of *C. blumei* roots(%)

元素 Element	Pb^0Se^0		Pb^1Se^0		$Pb^1Se^{0.1}$		$Pb^1Se^{0.5}$		Pb^1Se^1		$Pb^1Se^{2.5}$		Pb^1Se^5	
	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic
C	68.8	75.45	60.57	69.57	54.44	65.73	28.61	41.74	47.47	60.28	32.2	48.34	48.81	60.05
O	28.73	23.66	31.79	27.41	34.24	31.04	41.96	45.95	36.67	34.96	36.65	41.3	36.27	33.5
Na	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.14	0.09
Mg	—	—	0.15	0.08	0.18	0.11	0.29	0.21	0.21	0.13	0.4	0.3	0.23	0.14
Al	0.35	0.17	2.12	1.08	1.89	1.02	5.55	3.6	2.41	1.37	4.31	2.88	3.35	1.83
Si	0.34	0.16	2.86	1.4	2.61	1.35	9.87	6.16	3.73	2.03	6.32	4.05	5.97	3.14
S	—	—	—	—	—	—	—	—	0.22	0.11	—	—	—	—
Cl	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.2	0.1	0.13	0.06
K	0.69	0.23	0.41	0.14	0.38	0.14	1.56	0.7	0.48	0.19	1.51	0.7	1.01	0.38
Ca	0.77	0.25	—	—	0.14	0.05	0.21	0.09	0.19	0.07	0.49	0.22	0.79	0.29
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	0.14	0.04	0.38	0.14	—	—
Fe	0.31	0.07	0.91	0.23	0.77	0.2	2.35	0.74	1.03	0.28	1.84	0.59	1.45	0.38
Pb	—	—	1.21	0.08	5.34	0.37	9.6	0.81	7.45	0.55	15.69	1.37	1.84	0.13
Totals	100		100		100		100		100		100		100	

的吸收和转运能力变化;也可能是由于铅离子会与K、Ca 等竞争载体上的位点结合[20-21],从而对 K、Ca 等的吸收和转运起到抑制作用[22]。相关研究表明,镉能降低植物根中 K、Ca、Mg、P、Cu、Zn、Mn、Fe 的积累[23-24];陈跃均等[25]研究表明镉胁迫对保持系水稻(*Oryza sativa*)根系 Cu、Fe、Zn 的吸收积累表现为"低促高抑";而翁燕南等[20]认为,Cu-Cd 复合胁迫显著地促进了小麦幼苗对 Fe 等矿质元素的吸收。这说明不同浓度重金属胁迫对不同植物元素吸收的影响存在差异。

与对照组二 Pb^1Se^0 处理相比, 实验组 Mg、Ca、Pb 的含量都增加,其中 Ca 的增加量更为明显。这说明硒对铅胁迫下彩叶草吸收 Ca 元素具有促进作用,这可能是 Se 和 Pb 或者更多元素之间形成络合物[22,26]。根中的 Mg 在硒处理后略有上升,但与硒浓度间没有明显的正负相关性。刘碧英等[27]研究结果表明,低浓度的铅胁迫使藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)根茎叶中 N、P、K、Mg 含量增加,高浓度铅胁迫降低了根茎叶中 P、K 含量和积累量。$Pb^1Se^{0.5}$ 处理在所有处理中,C 含量达最小值 28.61%,O 含量达最大值 41.96%,Al、Si、K 元素含量分别达最大值; 随着硒浓度增加一直到 0.5 $mg·L^{-1}$,彩叶草根系中的铅浓度逐渐升高,Pb^1Se^1 处理的铅含量小于 $Pb^1Se^{0.5}$ 处理,$Pb^1Se^{2.5}$ 处理铅浓度值达最高,添加高浓度硒 Pb^1Se^5 处理后铅浓度下降,但实验组所有处理均比对照组二所含铅的量高。

2.1.2 根系的 XRD 分析

由图 2 可知,不同处理下彩叶草根系样品的XRD衍射峰多落在 2θ 为 20°~37°之间。总体来看,不同处理下不同角度衍射角度对应峰的走势基本一致。实验组和对照组二分别与对照组一比较,25°和 45°附近的峰均明显增强。这可能是由于铅胁迫使植物体本身产生了对抗其毒性的物质,也可能是植物吸收铅后产生的对其有毒害作用的物质[28]。其他衍射角度下对应峰的强度、峰高等有明显变化。

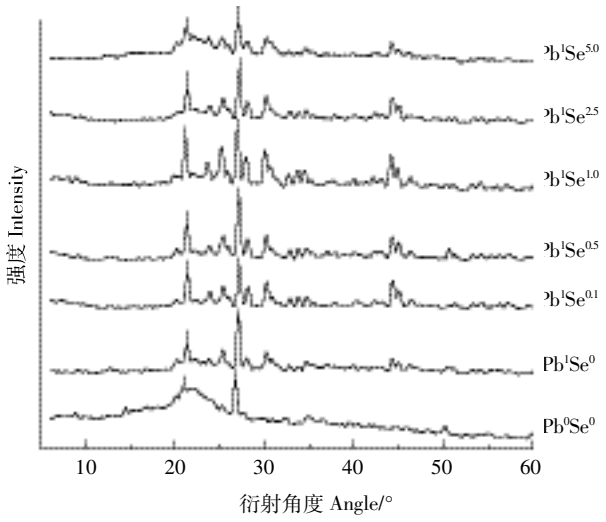

图 2 不同处理下彩叶草根系粉末样品 XRD 谱图

Figure 2 XRD patterns of *C. blumei* roots

选取如表 2 中所列的 2 处衍射角度,两对照组衍射峰的位置、强度、峰高、面积、半高宽均随着硒处理浓度变化而变化。对照组二与对照组一相比,位于 20.90°和 26.70°的两处峰均向右移动,峰强、峰面积、半高宽减小,20.90°的峰高减小,26.70°的增大。这说明在铅浓度为 1.0 mmol·L^{-1} 胁迫下,形成彩叶草根系 XRD 衍射角度为 20.90°和 26.70°对应的两处峰的晶体结晶度降低、晶相含量降低、晶粒度增大。

对比对照组二 21.32°所对应的峰,实验组的峰强度、峰高和峰面积均增大,$Pb^{1}Se^{0.5}$ 处理面积达最大值 88.76,$Pb^{1}Se^{1}$ 处理峰强达最大值 105.23,且其峰强、峰高、峰面积最接近对照组一;半高宽都比对照组二的 0.70 小($Pb^{1}Se^{5}$ 处理除外);这说明在铅胁迫下,添加硒处理可以使 21.32°对应晶体结晶度增大,晶相含量增多,晶粒度增大;硒浓度为 1 mg·L^{-1} 的处理能使结晶度、晶相含量与未受铅胁迫时在量上接近。对比对照组二 27.06°所对应的峰,$Pb^{1}Se^{0.5}$ 和 $Pb^{1}Se^{1}$ 处理的强度、面积、峰高均增加,其余减小;浓度为 0.1 mg·L^{-1} 的硒处理使半高宽减小,1 mg·L^{-1} 和 5 mg·L^{-1} 处理的上升,0.5 mg·L^{-1} 和 2.5 mg·L^{-1} 处理的不变,0.1~2.5 mg·L^{-1} 处理的变化不超过 0.01,5 mg·L^{-1} 处理的上升幅度较大。这说明 0.5 mg·L^{-1} 和 1 mg·L^{-1} 浓度的硒处理能使铅胁迫下的结晶度、晶相含量增加。结合元素变化分析判断,20.90°和 26.70°两处峰所对应的物质在彩叶草根系中的含量随硒处理的浓度变化不一致,硒处理可以使这 2 种物质向没有铅胁迫的状态恢复,说明硒在一定程度上是通过晶体结晶度和晶相含量变化来减缓铅对彩叶草的毒害作用,且使其恢复的硒浓度大致为 0.5~1.0 mg·L^{-1}。

2.2 彩叶草叶片的 EDXS 和 XRD 分析

2.2.1 叶片的 EDXS 分析

分别对不同处理下彩叶草叶片粉末样品表面形貌进行 SEM-EDXS 表征(如图 3)。对照组一($Pb^{0}Se^{0}$)的彩叶草叶片粉末样品表面颗粒排布比较均匀;对照组二($Pb^{1}Se^{0}$)的彩叶草叶片粉末样品表面出现扁片状颗粒,同一个颗粒上出现同向褶皱;试验组样品表面颗粒随硒浓度增加逐渐处于聚集状态,颗粒有膨胀感,$Pb^{1}Se^{1}$、$Pb^{1}Se^{2.5}$、$Pb^{1}Se^{5}$ 处理尤为明显。2 组对照和实验组叶片样品主要含有 C、O、Mg、Al、Si、Cl、K、Ca、Fe 等元素(表 3)。对照组二与对照组一相比,根中出现 Mg元素,并且含量增加,而在叶中则表现为减少,这可能是 Pb 促进根系对 Mg 的吸收,Mg 再与 Pb 结合将部分 Pb 固定在根系中,也可能与植物自身对重金属胁迫产生的抗性有关[29]。Ca 元素含量在根系及叶中均减少,这可能是由于 Pb 能抑制植物根细胞原生质膜上 Ca 离子通道[30],使得 Ca 很难在根部积累,从而使根系及叶中的 Ca 含量减少。

对照组二与对照组一相比较(表 3),元素 O、Cl的含量增加,C、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe 的含量减少。$Pb^{1}Se^{0.1}$ 处理在铅胁迫下的所有处理中,C 含量达最大值 64.78%,O 含量为最小值 29.74%;$Pb^{1}Se^{5}$ 处理 C 含量达最小值 58.22%,O 含量达最大值 34.85%。$Pb^{1}Se^{0.5}$

表 2 不同处理下彩叶草根系粉末样品 XRD 数据分析

Table 2 XRD patterns analysis of *C. blumei* roots

处理 Treatment	角度 Angle/°	强度 Intensity/a.u.	峰高 Peak height/mm	峰面积 Peak area/ mV×min	半高宽 FWHM/°
$Pb^{0}Se^{0}$	20.90	108.37	91.67	65.92	0.76
	26.70	119.06	102.36	74.97	0.79
$Pb^{1}Se^{0}$	21.32	63.04	51.43	32.97	0.70
	27.06	114.63	103.02	56.57	0.51
$Pb^{1}Se^{0.1}$	21.38	69.66	60.28	37.58	0.56
	27.16	83.67	74.29	39.59	0.50
$Pb^{1}Se^{0.5}$	21.30	70.99	61.76	88.76	0.56
	27.12	120.49	111.26	59.54	0.51
$Pb^{1}Se^{1}$	21.14	105.23	90.48	51.78	0.54
	26.96	122.01	107.26	59.36	0.52
$Pb^{1}Se^{2.5}$	21.34	71.26	58.73	38.61	0.62
	27.14	106.94	94.40	49.49	0.51
$Pb^{1}Se^{5}$	21.28	77.76	61.50	52.52	1.08
	27.04	84.61	68.36	50.33	0.68

表 3 彩叶草叶片粉末样品表面的 EDXS 成分(%)

Table 3 Element content of *C. blumei* leaves(%)

元素 Element	Pb^0Se^0		Pb^1Se^0		$Pb^1Se^{0.1}$		$Pb^1Se^{0.5}$		Pb^1Se^1		$Pb^1Se^{2.5}$		Pb^1Se^5	
	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic	质量比 Weight	原子比 Atomic
C	60.2	70.2	58.88	67.95	64.78	72.81	61.09	69.6	61.6	69.79	61.01	69.47	58.22	67.11
O	29.19	25.55	33.35	28.9	29.74	25.1	32.42	27.73	33.14	28.19	32.96	28.17	34.85	30.16
Mg	0.52	0.3	0.48	0.27	0.54	0.3	0.44	0.25	0.44	0.25	0.55	0.31	0.62	0.36
Al	1.17	0.61	0.8	0.41	0.37	0.18	0.87	0.44	0.35	0.18	0.45	0.23	0.33	0.17
Si	2.11	1.05	1.39	0.69	0.63	0.3	1.44	0.7	0.35	0.17	0.5	0.24	0.69	0.34
Cl	0.63	0.25	0.73	0.28	0.55	0.21	0.57	0.22	0.65	0.25	0.65	0.25	0.94	0.37
K	3.06	1.1	2.92	1.03	1.69	0.58	1.84	0.65	2.32	0.81	2.67	0.93	2.73	0.97
Ca	1.64	0.57	1.08	0.37	1.07	0.36	0.96	0.33	0.91	0.31	0.99	0.34	1.34	0.46
Fe	1.47	0.37	0.38	0.1	0.63	0.15	0.36	0.09	0.23	0.06	0.22	0.05	0.26	0.07
Totals	100		100		100		100		100		100		100	

处理的 Al、Si 含量在实验组中为最大值,介于对照组一和对照组二的值之间。在实验组中,Cl、K 元素含量随硒浓度上升逐渐升高，但都小于对照组二的值；Pb^1Se^1 处理的 Ca 含量为所有处理中的最小值;Fe 元素含量除 $Pb^1Se^{0.1}$ 处理介于对照组一和二之间，其余实验组的值均低于 2 个对照组。

2.2.2 叶片的 XRD 分析

如图 4 所示,铅胁迫下硒处理的彩叶草叶片粉末样品 XRD 谱图中的峰多落在 2θ 为 15°~28°之间。结合表 4 分析，对照组二与对照组一在 21.90°和 27.04°处所成的峰相比,均往左偏移,峰强、峰面积、半高宽均增大,对应 21.90°的峰高增大,对应 26.70°的峰高减小。这说明铅胁迫下,彩叶草叶片的结晶度、晶相含量增大,晶粒度减小。

与对照组二 21.72°所成的峰相比，实验组中 $Pb^1Se^{0.1}$ 处理的峰往左偏移,其他处理的峰往右偏移;强度、峰高均减小;除 Pb^1Se^5 处理外其他处理的峰面积、半高宽均减小。与对照组二 26.88°所成的峰相比，$Pb^1Se^{0.1}$、Pb^1Se^5 处理的峰往左偏移,$Pb^1Se^{0.5}$、Pb^1Se^1、$Pb^1Se^{2.5}$ 处理的峰往右偏移；实验组中除 $Pb^1Se^{0.1}$ 处理外其他处理的峰强度、峰高均减小;峰面积、半高宽增大。这说明实验组中硒浓度范围为 0.5~2.5 mg·L^{-1} 的处理可以使叶片中 21.72°处所成的峰结晶度增加,晶相含量减小,晶粒度增加;使叶片中 26.88°处所成的峰结晶度减小,晶相含量增加,晶粒度减小。0.5~2.5 mg·L^{-1} 的硒处理可以改变该植物体内某些物质的结

表 4 不同处理下彩叶草叶片粉末样品 XRD 数据分析

Table 4 XRD patterns analysis of *C. blumei* leaves

处理 Treatment	角度 Angle/°	强度 Intensity/a.u.	峰高 Peak height/mm	峰面积 Peak area/ mV×min	半高宽 FWHM/°
Pb^0Se^0	21.90	98.70	84.00	8.51	0.10
	27.04	70.43	108.00	23.30	0.27
Pb^1Se^0	21.72	104.39	87.08	41.00	0.48
	26.88	77.64	60.33	29.45	0.58
$Pb^1Se^{0.1}$	21.62	103.88	84.42	11.74	0.12
	26.86	80.31	60.86	41.40	0.78
$Pb^1Se^{0.5}$	22.14	62.04	48.83	6.74	0.12
	27.10	62.42	49.21	34.60	0.90
Pb^1Se^1	22.16	87.17	71.08	12.56	0.16
	26.94	70.92	54.83	38.69	0.82
$Pb^1Se^{2.5}$	22.16	65.40	51.17	19.00	0.36
	27.04	53.90	42.26	31.57	0.92
Pb^1Se^5	21.74	100.32	82.12	48.07	0.60
	26.86	63.73	51.77	38.36	0.82

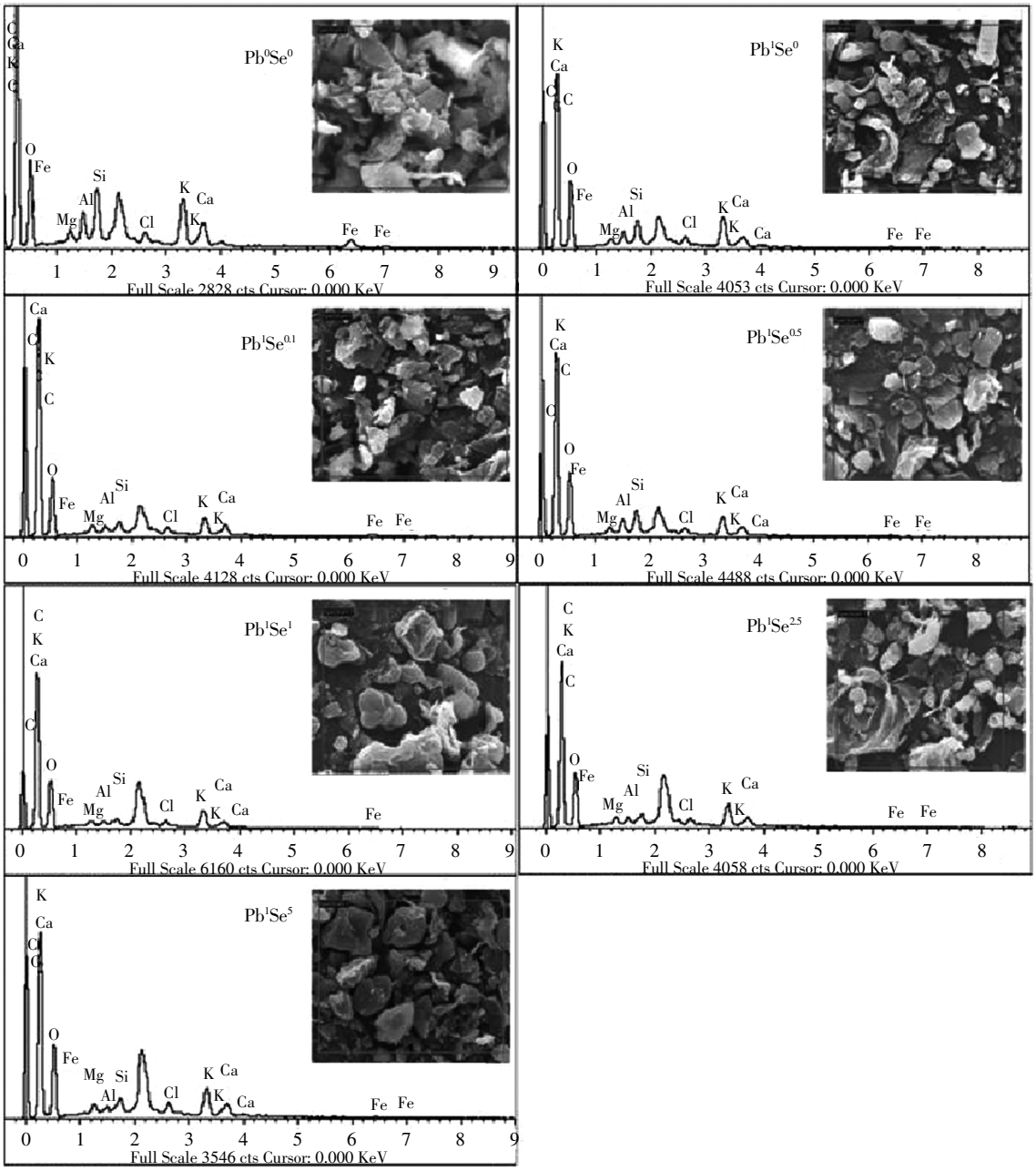

图 3　彩叶草叶片粉末样品表面的 SEM-EDXS 扫描图谱

Figure 3　SEM-EDXS images of *C. blumei* leaves powder

晶度、晶相含量、晶粒度等,使低角度峰的位置、强度、峰面积、半高宽和高角度峰的位置、强度朝未受铅胁迫的状态恢复,而外源硒处理对铅胁迫下彩叶草各器官中何种晶体或者物质发生变化以及如何变化仍需进一步分析确定。

3　结论

(1)不同浓度硒处理对铅胁迫下彩叶草根、叶粉末颗粒聚集程度、形貌影响较大,表面颗粒有膨胀感,根系中元素种类以及根、叶中各元素含量有明显变化;而且根系和叶片中的晶体情况及其晶相也发生了相应变化。

(2)铅胁迫抑制彩叶草根系对 Ca 的吸收。硒处理可以减缓铅对彩叶草根系吸收 Ca 的抑制作用;铅胁迫下硒浓度为 0.1~1 mg·L^{-1} 处理的彩叶草叶片中 Ca 含量减少,随着硒处理浓度值提高(2.5 mg·L^{-1}),叶片中 Ca 含量增加。铅胁迫抑制彩叶草根系对 Ca 的吸收,根系中 Ca 对 Pb 有固着作用,从而阻止其运输到

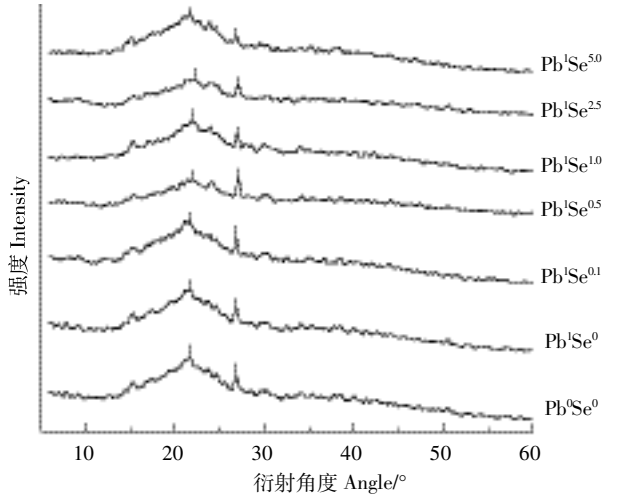

图 4 不同处理下彩叶草叶片粉末样品 XRD 谱图

Figure 4 XRD patterns of *C. blumei* leaves

其他器官,减小对植物体的毒害。

(3)0.5~1.0 mg·L^{-1}的硒浓度可以缓解铅对彩叶草的胁迫作用。

参考文献:

[1] 王英辉,陈学军,祁士华. 铅污染土壤的植物修复治理技术[J]. 土壤通报,2007,38(4): 790-794.
WANG Ying-hui, CHEN Xue-jun, QI Shi-hua. Phytoremediation techniques for lead contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 790-794. (in Chinese)

[2] 朱善良. 硒的生物学作用及其研究进展[J]. 生物学通报, 2004, 39(6): 6-8.
ZHU Shan-liang. The biological effect of selenium and its research progress[J]. *Bulletin of Biology*, 2004, 39(6): 6-8. (in Chinese)

[3] 陈 平,余土元,陈惠阳,等. 硒对镉胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 广西植物,2002,22(3): 277-282.
CHEN Ping, YU Tu-yuan, CHEN Hui-yang, et al. Effects of Se on growth and some physiological characteristics of rice seedling under Cd stress[J]. *Guihaia*, 2002, 22(3): 277-282.(in Chinese)

[4] Mirza H, Mohammad-Anwar H, Masayuki F. Exogenous selenium pretreatment protects rapeseed seedlings from cadmium-induced oxidative stress by upregulating antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems[J]. *Biological Trace Element Research*, 2012, 149(2): 248-261.

[5] 胡 莹,黄益宗,刘云霞. 砷-硒交互作用对水稻吸收转运砷和硒的影响[J]. 环境化学,2013,32(6): 952-958.
HU Ying, HUANG Yi-zong, LIU Yun-xia. Interactions between arsenic and selenium uptake and translocation in rice(*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(6): 952-958. (in Chinese)

[6] 张志元,张 翼,郭清泉,等. 含硒植物营养剂对桃和梨吸收铅、镉、汞的拮抗作用[J]. 作物研究,2011,25(4): 368-369.
ZHANG Zhi-yuan, ZHANG Yi, GUO Qing-quan, et al. Antagonism role of containing selenium plant nutrition agent used on peach and pear in absorption of lead, cadmium and mercury[J]. *Crop Research*, 2011, 25(4): 368-369. (in Chinese)

[7] 李瑞平,李光德,袁宇飞,等. 硒对汞胁迫小麦幼苗生理特性的影响[J]. 生态环境学报,2011,20(5): 975-979.
LI Rui-ping, LI Guang-de, YUAN Yu-fei, et al. Effects of Se on some physiological characterristics of wheat seeding under Hg stress[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(5): 975-979. (in Chinese)

[8] Soudani N, Troudi A, Amara I B, et al. Ameliorating effect of selenium on chromium(VI)-induced oxidative damage in the brain of adult rats[J]. *J of Physiology and Biochemistry*, 2012, 68: 397-409.

[9] 张海英,韩 涛,田 磊,等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响[J]. 园艺学报,2011,38(3): 409-416.
ZHANG Hai-ying, HAN Tao, TIAN Lei, et al. Effects of cadmium and lead accumulation in strawberry growing period by spraying Se-fertilizer to leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(3): 409-416. (in Chinese)

[10] 刘 燕,蒋光霞. 硒对镉、铅复合污染下油菜重金属抗性的影响[J]. 安徽农业科学,2010,38(21): 11096-11098.
LIU Yan, JIANG Guang-xia. Effects of Se on heavy metal-resistance of *Brassica napus* under compound pollution of Cd and Pb[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(21): 11096-11098. (in Chinese)

[11] 吴华莲,陈填烽,尹 希,等. 硒对钝顶螺旋藻氧化损伤的拮抗作用的光谱学特性及机制[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(3): 749-754.
WU Hua-lian, CHEN Tian-feng, YIN Xi, et al. Spectrometrics characteristics and underlying mechanisms of protective effects of selenium on *spirulina platensis* against oxidative stress[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(3): 749-754. (in Chinese)

[12] 刘家女,周启星,孙 挺,等. 花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究[J]. 应用生态学报,2007,18(7): 1617-1623.
LIU Jia-nü, ZHOU Qi-xing, SUN Ting, et al. Feasibility of applying plants in contaminated soil remediation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1617-1623. (in Chinese)

[13] 刘爱荣,张远兵,钟泽华,等. 盐胁迫对彩叶草生长和渗透调节物质积累的影响[J]. 草业学报,2013,22(2): 211-218.
LIU Ai-rong, ZHANG Yuan-bing, ZHONG Ze-hua, et al. Effects of salt stress on the growth and osmotica accumulation of *Coleus blumei* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(2): 211-218. (in Chinese)

[14] 吴 桐,李翠兰,邵泽强,等. 几种花卉植物对土壤中铅富集特征的研究[J]. 吉林农业大学学报,2012,34(3): 305-310, 315.
WU Tong, LI Cui-lan, SHAO Ze-qiang, et al. Enrichment characteristics of several ornamental plants to lead in soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2012, 34(3): 305-310, 315. (in Chinese)

[15] 李翠兰. 长春市绿地铅污染评价及其植物修复研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
LI Cui-lan. Pollution evaluation and phytoremediation of lead in greenbelt of Changchun[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[16] 邵泽强,李翠兰,张晋京. 花卉植物修复铅污染土壤的研究现状及展望[J]. 环境科学与管理,2010,35(9): 23-25.
SHAO Ze-qiang, LI Cui-lan, ZHANG Jin-jing. Present situation and outlook on remendiation of lead contaminated soils using flower plants [J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(9): 23-25. (in Chinese)

[17] 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.
ZHAO Lan-zhi, MAO Da, LIN Zi-yu, et al. Effects of different nutrient solution on pigment content and photosynthesis of *Coleus Blumei* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2007(6): 30-32. (in Chinese)

[18] 李同起,王成扬,刘秀军,等. 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[J]. 科学通报,2004,49(7): 633-638.
LI Tong-qi, WANG Cheng-yang, LIU Xiu-jun, et al. Scanning electron microscope analysis on the evolution of carbon layer structure in mesocarbon microbeads with temperature[J]. *Chinese Science Bullet*, 2004, 49(7): 633-638. (in Chinese)

[19] 吴东晓,郭丽萍,张大同. 探讨用 SEM-EDS分析材料的碳含量[J]. 电子显微学报,2003,22(6): 532.
WU Dong-xiao, GUO Li-ping, ZHANG Da-tong. Discussion of the application of SEM and EDS on carbon content analysis[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2003, 22(6): 532. (in Chinese)

[20] 翁燕南,周东美,武　敬,等. 铜镉复合胁迫下温度对小麦幼苗生长及其对铜、镉和矿质营养元素吸收与各元素在亚细胞分布的影响[J]. 生态毒理学报,2011,6(6): 607-616.
WENG Yan-nan, ZHOU Dong-mei, WU Jing, et al. Uptake, subcellular distributions of Cu, Cd and mineral elements, and plant growth for wheat seedlings under stress of Cu and Cd as affected by temperature [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(6): 607-616. (in Chinese)

[21] Perfus-Barbeoch L, Leonhardt N, Vavasseur A, et al. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status[J]. *The Plant Journal*, 2002, 32(4): 539-548.

[22] 牛力华. 植物根部对重金属固着作用的研究[D]. 天津: 天津理工大学,2012.
NIU Li-hua. Fixation of heavy metals in plant′s roots[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012. (in Chinese)

[23] Stephan U W, Grun M. Physiological disorders of the nicotiana mine auxotroph tomato mutant chloronerva at different levels of iron nutrition II: Iron deficiency response and heavy metal metabolism[J]. *Biochemie and Physiologie der Pflanzen*, 1989, 185(3-4): 189-200.

[24] 周碧青,张金彪,黄维南. 镉胁迫下草莓幼龄期叶、根矿质元素积累和分布的变化[J]. 热带植物科学,2007,36(3): 4-7.
ZHOU Bi-qing, ZHANG Jin-biao, HUANG Wei-nan. Changes of mineral element accumulation and distribution in young age strawberry under cadmium stress[J]. *Subtropical Plant Science*, 2007, 36(3): 4-7. (in Chinese)

[25] 陈跃均,李廷梅,杜　仲,等. 镉胁迫对保持系水稻根系微量元素吸收积累的影响[C]//面向未来的土壤科学(下册)——中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 成都:电子科技大学出版社,2012: 179-185.
CHEN Yue-jun, LI Ting-mei, DU Zhong, et al. Effects of cadmium stress on uptake and accumulation of mineral nutrients in root system of maintainer line rice [C]//The scientific study of soil for the future(V.2)——Proceedings of 12th CSSS representative conference and 9th academic seminars on fertilizer for soil across the Taiwan Strait. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2012: 179-185. (in Chinese)

[26] 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.

[27] 刘碧英,潘远智,赵杨迪,等. Pb 胁迫对藿香蓟营养积累与分配的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(3): 435-442.
LIU Bi-ying, PAN Yuan-zhi, ZHAO Yang-di, et al. Effects of Pb stress on nutrient accumulation and allocation of *Ageratum conyzoides* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 435-442. (in Chinese)

[28] 童建华,田　梅,陈小飞,等. 铅胁迫对水稻中铅和矿质元素含量的影响[J]. 湖面农业科学, 2009(7): 60-63.
TONG Jian-hua, TIAN Mei, CHEN Xiao-fei, et al. Effects of lead stress on the content of lead and mineral element in rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009(7): 60-63. (in Chinese)

[29] 袁祖丽,孙晓楠,刘秀敏. 植物耐受和解除重金属毒性研究进展[J]. 生态环境,2008,17(6): 2494-2502.
YUAN Zu-li, SUN Xiao-nan, LIU Xiu-min. Advance for heavy metal tolerance and detoxification research in plants[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2494-2502. (in Chinese)

[30] Huang J W, Cunningham S D. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation[J]. *New Phytologist*, 1996, 134(1): 75-84.