

黄以波, 谢素, 亦如瀚, 等. 镉、铅、芘复合污染对红薯生长及生理特征的影响[J]. 生态科学, 2014, 33(1): 113-120.
HUANG Yibo, XIE Su, YI Ruhan, et al. Effects of a co-pollution of Cd-Pb-pyrene on the growth and physiological characteristics of sweet potato[J]. Ecological Science, 2014, 33(1): 113-120.

镉、铅、芘复合污染对红薯生长及生理特征的影响

黄以波, 谢素, 亦如瀚*, 李超, 李卉婷, 张雨航, 李妙玲, 乔宁, 邹姣宏

暨南大学环境工程系, 广东省高校水土环境毒害性污染物防治与生物修复重点实验室, 广州 510632

【摘要】以红薯为供试材料, 设计了 Cd、Pb、芘复合污染的盆栽正交实验, 研究了复合污染下红薯生长及生理特征的变化情况。结果表明: Cd-Pb-芘复合污染下, 红薯叶面积普遍受到各污染因子及其交互作用的抑制作用($P<0.01, P<0.05$); Cd、Pb、芘单因素均对红薯叶片伸展速率有显著抑制作用($P<0.01$)。Pb 是抑制茎、叶生物量的主要因素($P<0.01$), 红薯地下部对复合污染有较强的耐性。芘×Pb 交互作用是影响红薯生理生化特性的最主要因素, 其显著抑制红薯叶绿素 a 含量($P<0.01$)及红薯 SOD 酶活性($P<0.01$), 同时也显著增加了丙二醛的含量($P<0.05$)及脯氨酸的积累($P<0.01$); 此外, 单因素 Cd、Pb 和芘及其其它的交互作用也有类似的抑制或促进作用($P<0.01, P<0.05$)。

关键词: 镉-铅-芘的复合污染; 交互作用; 红薯; 生理指标

doi:10.3969/j.issn. 1008-8873.2014.01.018 中图分类号:Q948.11 文献标识码:A 文章编号:1008-8873(2014)01-113-08

Effects of a co-pollution of Cd-Pb-pyrene on the growth and physiological characteristics of sweet potato

HUANG Yibo, XIE Su, YI Ruhan*, LI Chao, LI Huiting, ZHANG Yuhang, LI Miaoling, QIAO Ning, ZOU Jiaohong

Department of Environmental Engineering, Jinan University, Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation, Department of Education of Guangdong Province, Guangzhou 510632, China

Abstract: A pot orthogonal experiment was carried out using sweet potato to figure out its growth and physiological characteristics under the stress of a co-pollution of Cd-Pb-pyrene. The results indicated that the leaf areas were significantly inhibited by the various pollution factors and their interactions under the Cd-Pb-pyrene co-pollution ($P<0.01, P<0.05$); the single factor Cd, Pb, pyrene had a remarkable suppression on leaf elongations ($P<0.01$). Pb was the most important effective factor to the biomass of stem and leaf ($P<0.01$). The underground parts of sweet potato had a stronger tolerance to the contaminations than the aboveground parts. Interaction of pyrene×Pb was the main impact factor on the physiological characteristics. It significantly suppressed the concentration of chlorophyll a and the SOD activity ($P<0.01$). On the other hand, the interaction of pyrene×Pb increased the concentration of MDA and the accumulation of proline significantly. In addition, the single factor of Cd, Pb, pyrene and their interactions had the similar inhibition or promotion effect ($P<0.01, P<0.05$).

Key words: co-pollution of Cd-Pb-pyrene; interaction; sweet potato; physiological characteristics

1 前言

重金属和多环芳烃是环境介质中常见的污染物^[1-2]。

重金属不可降解, 在一定条件下会转变形态, 其可利用态被植物吸收后可经食物链进入人体, 对人体肝脏、肾脏等产生危害。多环芳烃较难生物降解, 脂

收稿日期: 2013-12-13; 修订日期: 2013-12-26

基金项目: 国家自然科学基金委—广东省自然科学联合基金: 电子垃圾拆解区水上环境 POPs-重金属复合污染生物修复机理研究(U0933002); 2011 年度暨南大学本科创新工程项目 cx10009, cx10010

作者简介: 黄以波(1989—), 男, 江西新余人, 硕士研究生, 从事环境污染的生物修复研究

*通信作者: 亦如瀚, 女, 副教授, 博士, 从事环境污染的生物修复研究, E-mail: tyiruhan@jnu.edu.cn

溶性强, 可经食物链、呼吸系统等进入人体, 具有“三致”作用。已有研究表明在农田土壤中存在着重金属与多环芳烃共存的复合污染问题^[3-4]。

红薯具有较宽的环境耐性域, 容易培养、生长速度快、生物量较大, 在全国广为栽培。本研究选用的“广紫薯一号”品质好、产量高, 在2003年试种发现比广东主栽品种广薯111(CK)增产49.72%、85.31%, 具有较大的推广潜力, 被列为优质旱粮主推品种之一, 并于2005年2月通过广东省农作物品种审定^[5]。本试验以“广紫薯一号”红薯为受试材料, 采用温室土壤盆栽方法, 对不同浓度配比的Cd、Pb和芘复合污染对红薯生长及生理特性的影响及污染物交互作用的特征进行了初步研究, 探讨了红薯对复合污染胁迫的响应特征。

研究农作物在复合污染胁迫下的生长情况及生理生化指标的变化特征有利于了解农作物对复合污染胁迫的响应及对复合污染的耐受性等; 可为植物受损及耐受性等有关植物毒理及污染土壤的修复以及农业生产安全等研究提供理论基础和支撑数据。相关研究中, 已有对重金属^[6]、有机物^[7-8]以及重金属-多环芳烃复合污染^[9-10]对植物生态毒性的考察, 也有盐胁迫下对红薯幼苗生长及生理指标影响的研究^[11], 而重金属 Cd、Pb 和多环芳烃芘复合污染下对红薯生长及生理特性的研究还鲜见报道。

2 材料与方法

2.1 实验材料

供试红薯为“广紫薯一号”, 购自广东省农科院。挑选生长状况一致的红薯苗进行剪摘, 用去离子水培养 48 h, 待长出白色绒根后移栽至花盆中, 每盆 2 株。在红薯生长过程中, 根据天气情况用去离子水调节土壤水分, 维持田间持水量 60%左右。

盆栽土壤购自华南农业大学试验田。取 0—20 cm 表层土, 风干, 研磨, 过 4 mm 筛后备用。土壤部分理化性质如下: pH 5.8, 有机质 27.09 g·kg⁻¹, 全氮 1.24 g·kg⁻¹, 碱解氮 87.97 mg·kg⁻¹, 全磷 0.81 g·kg⁻¹, 速效磷 34.33 mg·kg⁻¹, 速效钾 51.49 mg·kg⁻¹, 阳离子交换量 7.66 cmol·kg⁻¹。

盆栽花盆上口直径 22 cm, 下口直径 10 cm, 高 18 cm。每盆装已过 4 mm 筛的土 4 kg。

2.2 实验设计

采用 3 因素芘、Cd、Pb, 2(芘) × 3(Cd, Pb)水平共

表 1 复合污染实验设计

Tab. 1 Design of combined pollution experiment

处理编号	浓度水平/(mg·kg ⁻¹)		
	芘	Cd	Pb
1	100	0.3	50
2	100	0.3	200
3	100	0.3	500
4	100	3	50
5	100	3	200
6	100	3	500
7	100	10	50
8	100	10	200
9	100	10	500
10	300	0.3	50
11	300	0.3	200
12	300	0.3	500
13	300	3	50
14	300	3	200
15	300	3	500
16	300	10	50
17	300	10	200
18	300	10	500

18 个处理的正交设计方案, 每个处理设 3 个平行, 同时做空白对照处理(CK)。

2.3 外源污染物的添加方法

芘的添加: 准确称取各处理所需要的芘溶解于 100 mL 乙酸乙酯, 分别加入到 100 g 过 100 目筛的第一母体土壤中。待乙酸乙酯挥发干, 再分别加入到 900 g 第二母体土壤中, 充分搅拌。再将第二母体污染土壤分别加入到 3 kg 土壤中, 混匀后装入花盆中。

Cd、Pb 的添加: 将 CdCl₂·2.5H₂O、Pb(NO₃)₂·3H₂O 配成实验所需要的一系列浓度, 分别加入到已添加芘的土壤中。同时施加底肥: 将 NH₄NO₃、KH₂PO₄、KNO₃ 溶于每个处理的重金属溶液中一并加入(N 0.30 g·kg⁻¹、P₂O₅ 0.20 g·kg⁻¹、K₂O 0.30 g·kg⁻¹)。待土壤水分蒸发较干时, 混匀土壤, 土壤老化 2 周后种植红薯。

2.4 测定方法

培养 4 个月后收获红薯, 同时剪取叶片测定各项生理指标。参照路文静等^[12]的方法, 测定叶绿素含量采用乙醇丙酮混合液提取法; SOD 酶活性采用 NBT 光化还原法测定; 丙二醛含量采用硫代巴比妥酸显色法测定; 脯氨酸的测定采用磺基水杨酸法。

叶面积=叶片长×宽/2。

叶片伸展速率=ΔS/t (式中: ΔS 为叶面积变化量; t 为时间)^[13], 测量刚展开两三天内的新叶。

植物样品用自来水反复冲洗后再用去离子水快速淋洗三遍, 晾干, 于 105 °C 杀青 30 min, 再于 65—70 °C 烘干至恒重, 称量各部分干重。

2.5 数据分析

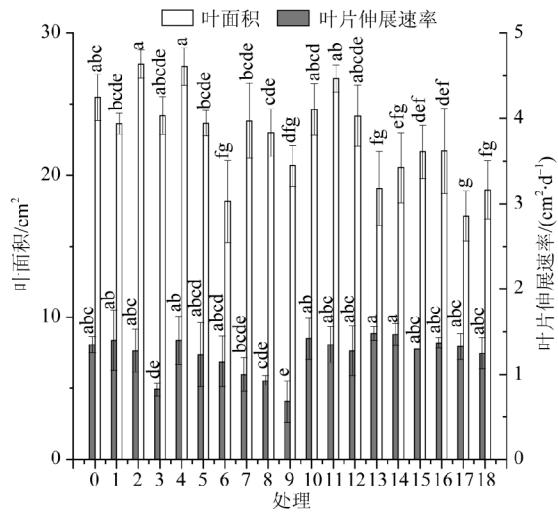
所给数据均为平均值±标准偏差的形式, 数据经整理之后使用 SPSS17.0 软件对数据进行相关统计分析。

3 结果与分析

3.1 复合污染对红薯生长的影响

图 1-2 分别表示芘、Cd、Pb 复合污染对红薯叶面积、叶片伸展率以及各生物组织干重的影响。

由图 1 可见, 红薯在处理 6、9 [w(芘)=100 mg·kg⁻¹、w(Cd)≥3 mg·kg⁻¹、w(Pb)=500 mg·kg⁻¹] 以及处理 13、14、15、16、17、18 [w(芘)=300 mg·kg⁻¹、w(Cd)≥3 mg·kg⁻¹] 时叶面积均显著降低于对照, 其中处理 17 降幅最大, 达 32.68%。红薯叶片伸展速率在处理 3、9 [w(芘)=100 mg·kg⁻¹, w(Pb)=500 mg·kg⁻¹] 下分别比对照降低了 39.26%、49.63%, 均达到显著水平。其它处理未达显著性水平。



注: 相同字母表示没有显著性差异, 不同字母表示存在显著性差异, $P<0.05$, 下同。

图 1 不同处理水平下的红薯叶面积、叶片伸展率

Fig. 1 The leaf areas and leaf elongations of sweet potatoes under different treatment levels

如图 2, 相比对照, 复合污染降低了红薯各部分的生物量, 但各处理水平的根干重无显著差异, 说明复合污染对红薯地下部损害较小。红薯茎干重在处理 2、3、6、8、9、15 [$w(\text{Pb}) \geq 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 比对照显著降低, 降幅为 32.72%—52.94%。红薯叶干重在处理 3、6、8、9、11、12、15 [$w(\text{Pb}) \geq 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 比对照显著降低, 降幅为 22.54%—56.65%。其中处理 3、6、9、12、15 均为高浓度 Pb [$w(\text{Pb})=500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 处理, 可见 Pb 对红薯地上部生物量抑制作用较明显。

如表 2 所示, 芈、Cd、Pb 单因子均对红薯叶面积、叶片伸展速率有显著抑制作用($P<0.01$), Pb 对地上部干重有显著的抑制作用($P<0.01$)。三种污染物交互作用中, 两两交互作用都显著抑制红薯叶面积, 其中芘×Pb、Cd×Pb($P<0.01$), 芈×Cd($P<0.05$); 仅有芘×Cd 显著影响叶片干重($P<0.01$); 三因素交互作用芘×Cd×Pb 显著抑制红薯叶面积($P<0.01$)。

3.2 复合污染对红薯生理特性的影响

以下图 3 和图 4 表示芘、Cd、Pb 复合污染对红薯各生理指标的影响。

由图 3 可知, 相比对照, 红薯叶绿素 a 含量在处理 8、9、10、15、16 出现显著降低; 叶绿素 b 含量在处理 7 显著升高, 而在处理 2、9、10、12、13、15、16 显著降低。各污染物都可能导致叶绿素 a、b 含量的降低, 也可能是芘、Pb、Cd 三者交互作用的结果。叶绿素 a/b 的值在对照与各污染处理间未显

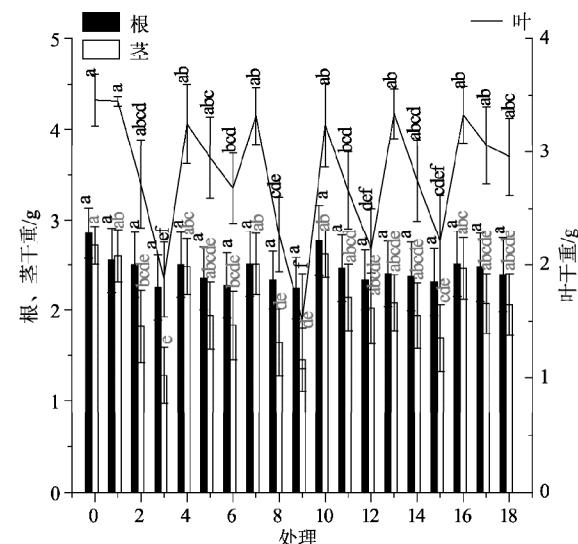


图 2 不同处理水平下的红薯各生物组织的干重

Fig. 2 The biomass of sweet potatoes tissues under different treatment levels

表 2 芘、Cd、Pb 复合污染对红薯生长的影响的方差分析

Tab. 2 The variance analysis of the effects of pyrene, Cd, Pb combined pollution on the growth of sweet potato

试验因素		叶面积	叶片伸展速率	根干重	茎干重	叶干重
芘	F 值	14.518	17.919	0.228	2.339	2.855
	P 值	0.000**	0.000**	0.638	0.142	0.107
Cd	F 值	25.522	5.451	0.301	0.198	0.945
	P 值	0.000**	0.009**	0.301	0.822	0.405
Pb	F 值	6.490	6.339	0.743	15.449	34.735
	P 值	0.001**	0.005**	0.743	0.000**	0.000**
芘×Cd	F 值	3.662	2.275	0.085	2.422	7.183
	P 值	0.035*	0.118	0.919	0.114	0.004**
芘×Pb	F 值	6.138	1.298	0.019	2.127	1.573
	P 值	0.005**	0.286	0.981	0.145	0.232
Cd×Pb	F 值	4.105	0.247	0.105	0.523	0.646
	P 值	0.007**	0.910	0.979	0.720	0.636
芘×Cd×Pb	F 值	5.609	0.487	0.110	0.224	2.475
	P 值	0.001**	0.745	0.978	0.922	0.077

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, 下同。

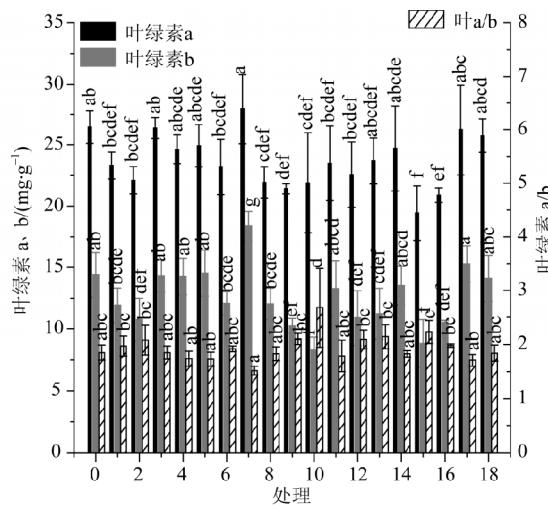


图 3 不同处理水平下红薯叶片叶绿素 a、b 含量, 叶绿素 a/b
Fig. 3 Concentrations of chlorophyll a, b, and a / b of sweet potatoes leaves under different treatment levels

示出显著性差异。图 4 中, 红薯 MDA 含量除在处理 13、16 有所降低(未达显著水平)外, 其他处理均有增加, 其中 4、6、17 达到显著水平。复合污染下红薯脯氨酸含量皆高于对照, 其中处理 8、16 增幅最大, 分别增加了 40.85%、39.31%。红薯 SOD 酶活性在处理 8、11、15、18 比对照显著增大, 增幅最大为处理 18, 达 37.58%; 而处理 1、2、9、10、12、13、14、17 相比对照减小, 处理 10 减幅最大, 为 59.62%。

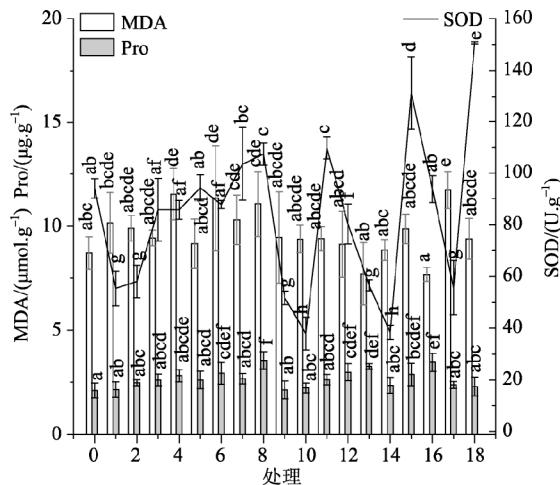


图 4 不同处理水平下红薯叶片的 MDA, Pro, SOD 含量
Fig. 4 Concentrations of MDA, Pro, SOD of sweet potatoes leaves under different treatment levels

如表 3 所示, 芘对叶绿素 b、叶绿素 a/b、MDA 产生极显著作用($P < 0.01$); Cd 对叶绿素 b、叶绿素 a/b、SOD 酶活性产生极显著作用($P < 0.01$); Pb 对叶绿素 b、叶绿素 a/b 产生显著作用($P < 0.05$), 对 SOD 酶活性产生极显著作用($P < 0.01$)。芘×Cd 对 SOD 酶活性产生极显著作用($P < 0.01$); 芘×Pb 对叶绿素 a/b、叶绿素 a/b、SOD 酶活性、脯氨酸产生极显著作用($P < 0.01$), 对 MDA 产生显著作用($P < 0.05$); Cd×Pb 对叶绿素 b、SOD 酶活性、MDA、脯氨酸产生了极显著作用($P < 0.01$), 对叶绿素 a/b 产生显著作用($P < 0.05$)。

表3 芘、Cd、Pb 复合污染对红薯生理生化特性影响的方差分析

Tab. 3 The variance analysis of the effects of pyrene, Cd, Pb combined pollution on sweet potato

试验因素		叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a/b	丙二醛	脯氨酸	SOD 酶活性
芘	F 值	1.766	10.381	7.710	9.227	0.269	1.925
	P 值	0.190	0.003**	0.008**	0.004**	0.607	0.173
Cd	F 值	0.546	6.185	5.406	0.406	2.860	44.906
	P 值	0.584	0.005**	0.009**	0.669	0.071	0.000**
Pb	F 值	0.608	4.038	3.585	0.893	0.588	64.996
	P 值	0.549	0.026*	0.037*	0.893	0.561	0.000**
芘×Cd	F 值	1.238	2.174	1.397	1.578	0.579	18.351
	P 值	0.301	0.128	0.260	0.220	0.566	0.000**
芘×Pb	F 值	5.653	18.813	8.945	4.366	6.055	120.959
	P 值	0.007**	0.000**	0.001**	0.020*	0.006**	0.000**
Cd×Pb	F 值	2.539	5.59	2.988	4.122	7.583	33.204
	P 值	0.056	0.001**	0.031*	0.000**	0.007**	0.000**
芘×Cd×Pb	F 值	5.265	7.778	1.639	88.637	0.810	2.808
	P 值	0.002**	0.000**	0.184	0.000**	0.527	0.040*

芘×Cd×Pb 对叶绿素 a、b、MDA 产生极显著作用($P<0.01$)，对 SOD 酶活性产生显著作用($P<0.05$)。

3.3 各指标间的相关性分析

由表 4 可知，红薯叶片伸展速率和红薯根干重有显著相关性，和茎、叶干重有极显著相关性。红薯根、茎、叶之间都有极显著相关性。叶绿素 a 和叶绿素 b 之间呈极显著相关，而叶绿素 a、b 都和叶绿素 a/b 呈极显著负相关。

4 讨论

4.1 复合污染对红薯生长的影响

叶片伸展速率是指单位时间内叶面积的变化量，

有研究发现该指标与地上部生物量及植物光合作用有良好的相关性^[14]。杜天庆等^[15]研究表明，Cd、Cr、Pb 污染胁迫对小麦幼苗的毒害作用以影响其叶面积和冠部干重为主。本研究结果表明，芘、Cd、Pb 复合污染条件下，芘×Cd 对红薯叶面积产生了显著抑制作用($P<0.05$)，其余各污染因子及其交互作用均达极显著抑制水平($P<0.01$)；芘、Cd、Pb 单因素均对红薯叶片伸展速率有显著抑制作用($P<0.01$)，其交互作用的影响没有达到显著性水平，芘是抑制叶片伸展速率的主要因素(表 2)。红薯叶片伸展速率与各部分生物量均表现出显著相关性，而叶面积与其他生长指标的相关性不明显(表 4)。本研究中叶片

表4 各指标之间相关性分析

Tab. 4 Correlations analysis between the indexes

	叶面积	叶片伸展速率	根干重	茎干重	叶干重	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a/b
叶面积	1	0.060	0.400	0.262	0.066	-0.020	0.011	0.020
叶片伸展速率		1	0.514*	0.634**	0.707**	-0.054	-0.142	0.200
根干重			1	0.850**	0.730**	0.193	0.044	0.193
茎干重				1	0.876**	0.225	0.165	0.010
叶干重					1	0.347	0.287	-0.124
叶绿素 a						1	0.918**	-0.683**
叶绿素 b							1	-0.895**

注：*表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$ 。

伸展速率可以作为评价、监测复合污染条件下红薯生物量变化的指示指标。

耐性指数是指污染物胁迫下植物某组织的干重与对照植物对应组织干重的比值。耐性指数是评价植物对污染物忍耐性的一个重要参数,耐性指数越大,植物生物量所受影响越小,对污染物的耐性越大^[16-17]。耐性指数>0.5表明植物对污染物有较强的耐受性,否则说明污染物对植物的毒害作用明显^[18]。本研究中绝大部分处理下红薯茎叶耐性指数均>0.5,表明红薯地上部对 Cd-Pb-芘复合污染有一定的耐性。邢维芹等^[19]研究发现在 Pb 和 B[a]P 复合污染下,Pb 是控制黑麦草生长的主要因素。当 Pb 含量达到 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上时,黑麦草株高和干物质量大幅减少。本研究结果显示,红薯地上部对高浓度 Pb [$w(\text{Pb})=500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 耐性较差,但所有处理中红薯根的耐性指数均大于 0.5。没有影响因子对红薯根干重产生显著影响,表明红薯地下部对 Cd-Pb-芘复合污染有较强的耐性(表 2)。

4.2 复合污染对红薯生理特性的影响

通过测定胁迫条件下植物的光合作用物质的变化、脂膜过氧化和抗氧化酶活性的变化以及渗透调节物质等生理指标的变化,可以探讨逆境对植物的伤害以及植物对逆境的适应机制。叶绿素是植物光合作用的主要物质,其含量高低直接影响着植物光合作用的强弱及物质合成速率的大小。Mufarrege 等^[20]研究显示,水白菜叶绿素 a 含量在 Zn 胁迫下比在 Cr、Ni、Pb 胁迫下显著降低,在 Zn、Cr 胁迫下叶绿素 a 含量是比相对生长速率更为敏感的指标。寇士伟^[21]等研究了在 Cd-Pb-Cu 复合污染下,Cd 是导致芥菜叶片叶绿素降低的主要因素,且叶绿素 a 受到的胁迫影响大于叶绿素 b。本研究中芘对叶绿素的影响大于其他两种污染物的作用。相关分析表明,叶绿素 a 与叶绿素 b 呈极显著正相关,叶绿素 a/b 与叶绿素 a、叶绿素 b 均成极显著负相关(表 4)。

当植物机体受到外界胁迫时,体内自由基增多,会刺激植物做出一系列的防御反应,如抗氧化酶的增加^[22-23]。SOD 酶就是活性氧清除反应中的一个重要抗氧化酶,SOD 酶可清除植物体内超氧阴离子自

由基,防止自由基破坏细胞的结构及功能,保持较高的活性水平是植物抗性强的表现。孙倩^[24]等研究发现,在 Cd 和乙草胺复合污染下,随着污染物浓度的升高,玉米幼苗 SOD 酶出现先增大后减小的变化趋势。Zhang 等^[25]也发现在 Cd 浓度为 $10 \mu\text{M}$ 时,蚕豆叶片及根部 SOD 酶活性在第 3、6 天呈现上升的趋势,而在第 9 天则出现下降。说明植物受胁迫时会启动抗氧化酶系统自我保护,而当自由基引起的伤害超出其保护范围,抗氧化酶系统受到损害。本研究结果显示单因素的 Cd、Pb 的浓度、以及两者与芘的交互作用(芘×Cd、芘×Pb)都显著影响红薯叶片的 SOD 酶活性($P<0.01$, 表 4),SOD 酶活性显著高于空白的多为 Cd、Pb 含量同时或者其中之一较高的处理(图 4)。

抗氧化酶系统只对一定范围内的胁迫起到防御效果,超出防御范围的氧自由基可以氧化膜脂而损害细胞膜,使植物发生膜脂过氧化作用最终降解生成丙二醛(MDA)。MDA 是植物体内具有细胞毒性的物质,它可与蛋白质、氨基酸等活性物质交联,形成不溶性的化合物(脂褐素)沉积,干扰细胞的正常生命活动^[26]。MDA 含量可一定程度上反映植物细胞膜受逆境伤害的程度。本研究中大部分处理下红薯的 MDA 含量比对照要高(见图 4),其中芘是复合污染条件下影响 MDA 含量的最重要因素(见表 3)。MDA 含量随着处理浓度的增高和时间的延长而不断增加,众多研究都已证明了这一点^[19,27-28]。

由于脯氨酸亲水性极强,能稳定原生质胶体及组织内的代谢过程,因而能降低凝固点,有防止细胞脱水的作用。在外界胁迫下,植物体内脯氨酸含量显著增加以起到较强的渗透调节作用,来减轻植物受到的伤害^[29]。所以植物叶片内脯氨酸含量高低一定程度上反映了植物的抗逆性强弱。张小艾等^[30]研究发现盐碱与 Pb、Cd 复合胁迫下二月兰幼苗叶片和根系脯氨酸含量均呈现逐渐上升的趋势,且在高浓度时达到最大值,比对照增加 2.5 倍和 2.32 倍,差异显著。本研究中复合污染条件下各处理红薯叶片脯氨酸均高于对照,最大增幅达 40.85%(见图 4),说明红薯对复合污染胁迫有一定程度的耐受性。

5 结论

(1) Cd-Pb-芘复合污染下, “广紫薯一号”红薯叶面积普遍受到各污染因子及其交互作用的抑制作用($P<0.01, P<0.05$), 其中Cd和芘是最主要影响因素; 芑、Cd、Pb单因素均对红薯叶片伸展速率有显著抑制作用, 其中芘的抑制作用最大。Pb是抑制红薯茎、叶生物量的主要因素。红薯地下部对芘、Cd、Pb复合污染有较强的耐性。

(2) Cd-Pb-芘复合污染下, 芑×Pb交互作用是抑制红薯叶绿素a的主要因素($P<0.01$), 同时也是显著抑制红薯SOD酶活性、增加脯氨酸的含量($P<0.01$)、促进丙二醛的累积($P<0.05$)的主要因素; 此外, 单因素Cd、Pb和芘及其他交互作用都有类似的显著性抑制或促进作用($P<0.01, P<0.05$)。

参考文献

- [1] SPROVIERI M, FEO M L, PREVEDELLO L, et al. Heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Naples harbour (southern Italy) [J]. Chemosphere, 2007, 67(5): 998–1009.
- [2] LI Yongli, LIU Jingling, CAO Zigu, et al. Spatial distribution and health risk of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in the water of the Luanhe River Basin, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 163(1/4): 1–13.
- [3] MAILISZEWSKA K B, SMRECZAK B. Habitat function of agricultural soils as affected by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination[J]. Environment International, 2003, 28(8): 719–728.
- [4] IRHA N, SLET J, PETERSELL V. Effect of heavy metals and PAHs on soil assessed via dehydrogenase assay[J]. Environment International, 2003, 28(8): 779–782.
- [5] 刘国辉, 姚永升, 洪苑. 广紫薯1号特征特性与高产栽培技术[J]. 广西农业科学, 2006, 37(3): 258–259.
- [6] 王文斌, 金樑, 李晶, 等. 不同pH条件下CdCl₂对紫花苜蓿种子萌发的胁迫效应[J]. 环境科学研究, 2013, 26(10): 1095–1102.
- [7] KUMMEROVÁ M, VÁŇOVÁ L, KRULOVÁ J, et al. The use of physiological characteristics for comparison of organic compounds phytotoxicity[J]. Chemosphere, 2008, 71(11): 2050–2059.
- [8] 肖爱风, 杨慧丽, 安民, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对绿色巴夫藻的生长毒性和干扰效应[J]. 生态科学, 2013, 32(4): 429–433.
- [9] LIN Qi, SHEN Kaili, ZHAO Hongmei, et al. Growth response of *Zes mays* L. in pyrene-copper co-contaminated soil and the fate of pollutants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(3): 515–521.
- [10] 徐苏男, 张利红, 陈忠林. 镉和苯并[a]芘胁迫对小麦幼苗生理指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 464–467.
- [11] QI Bingjie, WANG Jidong, MA Hongbo, et al. Effects of salt stress on the seedling's photosynthetic characteristics of different genotypes sweet potato. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3102–3108.
- [12] 路文静, 李奕松. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [13] WALCH-LIU P, NEUMANN G, BANGERTH F. Rapid effects of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51: 227–237.
- [14] HESTER, M W, MENDELSSOHN, I A. Effects of macronutrient and micronutrient additions on photosynthesis, growth parameters, and leaf nutrient concentrations of *Uniola paniculata* and *Panicum amarum*[J]. Botanical Gazette, 1990, 151: 21–29.
- [15] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 等. 小麦不同生育时期 Cd、Cr、Pb 污染监测指标体系[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1845–1855.
- [16] 周燕, 张桂花, 徐迎春, 等. 铜对凤丹生长、生理及体内矿质元素吸收分配的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3): 415–423.
- [17] YANG Bing, ZHOU M, SHU Wensheng, et al. Constitutional tolerance to heavy metals of a fiber crop, ramie (*Boehmeria nivea*), and its potential usage[J]. Environmental Pollution, 2010, 158: 551–558.
- [18] 田胜尼, 刘登义, 彭少麟, 等. 香根草和鹅观草对Cu、Pb、Zn 及其复合重金属的耐性研究[J]. 生物学杂志, 2004, 21(3): 15–19.
- [19] 邢维芹, 骆永明, 吴龙华, 等. 铅和苯并[a]芘混合污染酸性土壤上黑麦草生长及对污染物的吸收作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 485–489.
- [20] MUFARREGE M M, HADAD H R, MAINe M A. Response of *Pistia stratiotes* to heavy metals (Cr, Ni, and Zn) and phosphorous[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 58(1): 53–61.
- [21] 寇士伟, 倪高风, 马岚婷, 等. Cd-Pb-Cu 复合污染对芥菜生长及生理特性的影响[J]. 环境科学研究. 2011, 24(3):

- 282–286.
- [22] SCEBBA F, ARDUINI I, ERCOI L, et al. Cadmium effects on growth and antioxidant enzymes activities in *Miscanthus sinensis*[J]. *Biologia Plantarum*, 2006,50(4): 688–692.
- [23] ODJEGBA V J, FASIDI I O. Changes in antioxidant enzyme activities in *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) and *Pistia stratiotes*(Araceae) under heavy metal stress[J]. *Revista de Biología Tropical*. 2007, 55(3–4): 815–823.
- [24] 孙倩, 魏述勇, 曾阳, 等. 镉和乙草胺复合污染对玉米生理特性的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(2): 39–42.
- [25] ZHANG Shanshan, ZHANG Huimin, QIN Rong, et al. Cadmium induction of lipid peroxidation and effects on root tip cells and antioxidant enzyme activities in *Vicia faba* L[J]. *Ecotoxicology*, 2009, 18(7): 814–823.
- [26] SHAH K, KUMAR R G, VERMA A, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, 161: 1135–1144.
- [27] 王飞, 肖焘, 张晨, 等. Cd、Pb 单一及复合胁迫对桂花幼苗生理生化特性的影响[J]. 三峡环境与生态, 2013, 35(1): 3–7.
- [28] LI Yong, ZHANG Shanshan, JIANG Wusheng, et al. Cadmium accumulation, activities of antioxidant enzymes, and malondialdehyde(MDA) content in *Pistia stratiotes* L[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(2): 1117–1123.
- [29] ASHRAF M, FOOLAD M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 206–216.
- [30] 张小艾, 李名扬, 汪志辉, 等. 重金属及盐碱对二月兰幼苗生长和生理生化的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 187–194.