

网络出版时间:2013-09-22 17:09

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130922.1709.023.html>

铅胁迫对三樱椒生理生长及铅吸收分布的影响

杨建伟¹,高宛莉¹,杜瑞卿¹,李丹丹¹,刘海伟¹,赵光骞²

(1 南阳师范学院 生命科学与技术学院,河南 南阳 473061;2 南阳市环境监测站,河南 南阳 473000)

【摘要】【目的】研究铅(Pb)对日本栃木三樱椒(以下简称三樱椒)生理生长的影响,揭示三樱椒对 Pb 的吸收特征。【方法】选用三樱椒作为试验材料,在供试土壤(Pb 本底含量为 41 mg/kg)中添加 Pb,使土壤中的 Pb 含量分别为 41(CK),291,541,791,1 041,1 541,2 041,2 541,3 041 和 3 541 mg/kg,测定三樱椒的植株高度、单株干物质质量、CAT、POD、SOD、MDA、净光合速率(P_n)及根、茎、叶、果实中 Pb 含量等指标。对植株高度、单株干物质质量与土壤 Pb 含量的关系建立分段函数;依据 CAT、POD、SOD、MDA、 P_n 5 个指标随土壤 Pb 含量的变化,对土壤污染程度进行分类;同时对 CAT、POD、SOD、MDA、 P_n 5 个指标与土壤 Pb 含量进行直接相关和综合相关分析。【结果】1)三樱椒植株高度和单株干物质质量随土壤中 Pb 含量的增加而明显下降,特别是当土壤 Pb 含量大于 1 200 mg/kg 时下降更显著;Pb 含量在 1 200 mg/kg 以下对三樱椒生长的影响不明显。2)三樱椒植株 CAT、POD、SOD、MDA、 P_n 5 个生理指标随土壤 Pb 含量的增加先上升,而后呈下降趋势;土壤 Pb 含量对 POD 和 SOD 的影响最大,其次是 CAT,对 MDA 和 P_n 的影响相对较小,与 5 个生理指标的综合相关系数为 $r=0.992$,具有极显著性($P=0.01$);聚类分析和判别分析结果,也很好地反映了土壤 Pb 不同含量对 5 个生理指标的综合影响不同。3)三樱椒根系、茎、叶、果实等各部位以及单株 Pb 含量,均随土壤 Pb 含量的增加而增加,但峰值点不同。当土壤 Pb 含量在 541 mg/kg 时,Pb 转移系数最高,之后随土壤 Pb 含量增加而逐渐减小。随土壤中 Pb 含量的增加,根部 Pb 含量增加幅度较大;茎和叶中 Pb 含量也相对稍增大,增加幅度较小;果实中 Pb 含量基本稳定,变化幅度最小。说明根部是 Pb 吸收的主要部位。【结论】三樱椒的生长生理指标随土壤 Pb 胁迫的增强均受到一定程度的影响。三樱椒根、茎、叶均可富集土壤中的 Pb,其中根部是最主要的 Pb 吸收部位,果实受影响较小。在土壤 Pb 含量为 541 mg/kg 时,Pb 转移系数达最高,表明三樱椒可以改良土壤 Pb 污染。

【关键词】 三樱椒;Pb 含量;生长生理;Pb 富集

【中图分类号】 S641.301;Q945.78

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)10-0119-06

Physiological growth and lead (Pb) enrichment of Three Cherry Pepper under lead stress

YANG Jian-wei¹,GAO Wan-li¹,DU Rui-qing¹,LI Dan-dan¹,

LIU Hai-wei¹,ZHAO Guang-qian²

(1 Department of Life Science and Technology, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061, China;

2 Environmental Monitoring Station of Nanyang, Nanyang, Henan, 473000, China)

Abstract: 【Objective】 This research revealed the physiological growth and Pb absorption and accumulation of Three Cherry Pepper from Tochigi, Japan. 【Method】 Lead were added to the culture soil with different concentrations (291,541,791,1 041,1 541,2 041,2 541,3 041 and 3 541 mg/kg) (the background was 41 mg/kg), and the physiological indicators, including height and biomass of plants, activities of CAT, POD, SOD, MDA content, net photosynthetic rate (P_n), accumulation of Pb in different tissues (roots,

【收稿日期】 2012-11-22

【基金项目】 河南省科技厅科技攻关项目(0524050006);南阳市科技局项目(2005PT019);南阳师范学院项目(nytc200529)

【作者简介】 杨建伟(1965—),女,河南西峡人,教授,硕士,主要从事植物生理生态学研究。E-mail:1994226615@qq.com

stems, leaves and fruits) were measured. Piecewise function describing changes of plant height and dry matter along with soil Pb content was established. Soil pollution degrees were classified based on activities of CAT, POD, SOD, MDA and Pn . Direct and comprehensive correlation analysis between CAT, POD, SOD, MDA, Pn and Pb content was conducted as well. 【Result】 (1) The average height and individual biomass of pepper significantly decreased as the increase of Pb concentration, especially when the concentration of Pb was more than 1 200 mg/kg. (2) The contents of CAT, POD, SOD, MDA and Pn in seedlings increased firstly then decreased with the increase of Pb concentration. Pb had the greatest impact on POD and SOD, followed by CAT, MDA and Pn . The relevant coefficient of Pb to the five physiological indicators was 0.992 with extreme significant difference ($P=0.01$). Cluster and discriminant analysis also revealed the differences. (3) The contents of Pb in roots, stems, leaves and fruits all increased as the increase of Pb concentration with different accumulation peaks. The transfer coefficient of Pb was highest when Pb concentration was 541 mg/kg, then decreased as the increase of Pb concentration. The contents of Pb in roots increased faster than stems, leaves and fruits, indicating that roots were the major tissue for Pb absorption. 【Conclusion】 The physiological indicators of Three Cherry Pepper were affected by Pb concentrations. Pb enriched in roots, stems, leaves of Three Cherry Pepper, which can be used to reduce soil lead contamination. The highest Pb transfer coefficient occurred when the Pb concentration was 541 mg/kg.

Key words: Three Cherry Pepper; Pb concentration; physiology growth; enrichment of Pb

近年来,随着工农业生产的发展,重金属对土壤和农作物的污染问题越来越突出,特别是城市周围菜田的污染日益严重。铅(Pb)是重金属污染中的主要元素之一,它可随着汽车排放的废气及城市污水污染空气和土壤^[1-2]。Pb 沉积在土壤中,积累到一定程度就会对蔬菜作物产生毒害,影响蔬菜的产量及品质,并通过食物链危及人类身体健康。河南省南阳市作为豫西南重要的能源和有色金属产地,在石油、煤炭和有色金属的开采与利用过程中,产生了大量的重金属污染,对土壤表层动物造成不良影响,其中在一些矿区周边土壤中,各类重金属含量高达 555.45 mg/kg^[3],南阳市郊区种植的蔬菜也不同程度的受到重金属污染,其中包括 Pb 的污染^[4]。

日本栃木三樱椒(*Capsicum annuum* L. var. *Conoides* (Mill). Irish)(以下简称三樱椒),又名朝天椒,属茄科(Solanaceae)辣椒属(*Capsicum*)植物,是辣椒的一个变种^[5]。其原产日本,1976 年引种至我国,是河南省境内栽培的主要经济作物之一,主要种植于河南省南阳、安阳和洛阳等地。由于其辣味强,质细肉厚,维生素含量高,因此在国际市场享有盛誉^[6],每年大量出口东南亚各国。作为区域性支柱产业,其生产对促进河南省的蔬菜产业化发展起到了推动作用。近年来,国内外有关 Pb 对水稻、小麦等农作物生长及有关保护酶活性的影响已有较多报道^[6-10],但其对蔬菜生长及有关保护酶活性影响的研究和报道较少^[11-12],而有关 Pb 对三樱椒幼苗

生长的影响及其体内的富集特征尚未见报道。为此,本研究以河南省南阳市辣椒主栽品种三樱椒为试验材料,探索在不同的铅胁迫处理下,三樱椒生长生理指标的变化,比较分析其不同器官对 Pb 的吸收特点,并采用综合相关系数法^[13]揭示这些指标的内在变化规律,旨在为今后重金属污染土壤的植物修复和三樱椒的食用、种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

供试三樱椒种子(*Capsicum annuum* L. var. *Conoides* (Mill). Irish)由河南省南阳市种子公司提供。种子经精选后,用自来水浸泡 10 h,再用 1 g/L $HgCl_2$ 浸泡 8~10 min,用蒸馏水冲洗 4~5 次后,播种于含有锯末培养基的生长盘中(2011-02-20),生长盘的长、宽、高分别为 30 cm×26 cm×8 cm,将生长盘放入人工气候箱中,于 26 °C 暗培养催芽萌发;2 周后进行光照培养,光照时间 14 h/d,光照强度 350 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,昼夜温度为 26/20 °C。4 周后,将每个生长盘中高 5~8 cm、长势一致的三樱椒幼苗保留备用。

Pb 胁迫处理:在高约 50 cm、直径 30 cm 的塑料桶中装 10 kg 干土(黄棕壤土, pH 6.5, Pb 本底含量为 41 mg/kg,取自南阳市卧龙区十二里河农田),根据干土质量,依据土壤环境质量标准 GB 15615—1995 和文献^[10],结合当地重金属高度污染区的实

际情况^[3],按照大跨度、多梯度、高污染的原则设置 10 个 Pb 胁迫处理,向土壤中添加纯 Pb²⁺ (用 Pb(CH₃COOH)₂ · 3H₂O 配制,AR),使土壤 Pb 含量分别为:41 (CK),291,541,791,1 041,1 541,2 041,2 541,3 041 和 3 541 mg/kg,平衡 1 周;将三樱椒幼苗栽植于 10 个 Pb 处理土壤中,每桶 10 株,待植株成活后每桶保留 3 株并移到南阳师范学院花房内(其余幼苗回埋桶内土壤中)。晴天接受自然光照,雨天于遮雨棚内避雨,每周补充纯水 1 次。每个处理重复 3 次。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 干物质量及植株高度的测定 2011-08-03,采收三樱椒植株,即时采用直尺测量植株高度,每处理求其平均值;将根、茎、叶、果实分别用自来水冲洗后,再用蒸馏水冲洗 3 遍,沥去水分,在 120 ℃下烘至恒质量,各部分干质量的和即为单株干物质量,求平均值。

1.2.2 生理指标的测定 幼苗于 Pb 污染土壤中生长 50 d 后,采集叶片,进行生理指标测定。其中,CAT 活性采用高锰酸钾滴定法测定^[14],POD 活性采用愈创木酚法测定^[15],SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定^[15],MDA 含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定^[15]。

1.2.3 净光合速率(*Pn*)的测定 幼苗于 Pb 污染土壤中生长 50 d 后,于每天上午 10:00 左右用 TPS-1 便携式光合仪(英国 PP systems 公司)测定植株中上部未受害的正常叶片的 *Pn*(光强 1 100~1 200 μmol/(m² · s)^[15],连续测定 3 d,每处理重复测定 5 片叶,求平均值。

表 1 土壤 Pb 含量对三樱椒生长的影响

Table 1 Effect of different soil Pb concentrations on the growth of Three Cherry Pepper			
Pb 含量/(mg · kg ⁻¹) Pb content	植株高度/cm Average height	单株干物质量/g Biomass per plant	长势和颜色 Growing and colors
41(CK)	55.30±2.30	14.82±1.10	叶绿粗壮 Green leaves,strong growth
291	56.20±2.70	14.70±1.50	叶绿粗壮 Green leaves,strong growth
541	53.80±1.90	14.60±0.90	叶绿粗壮 Green leaves,strong growth
791	52.80±2.60	14.34±1.80	叶绿粗壮 Green leaves,strong growth
1 041	45.30±1.50*	13.16±1.20	叶绿粗壮 Green leaves,strong growth
1 541	45.70±1.80*	12.58±1.30*	叶绿粗壮 Green leaves,strong growth
2 041	43.20±1.60*	11.52±0.90*	叶绿粗壮 Green leaves,strong growth
2 541	40.10±1.30**	8.51±0.90*	叶绿长势弱 Green leaves,weak growth
3 041	30.30±1.90**	7.28±1.20*	叶发黄,枝条生长弱 Yellow leaves,weak growth
3 541	29.80±2.50**	7.30±1.30*	叶发黄,枝条生长弱 Yellow leaves,weak growth

注:与 CK 比较,**P*<0.05,***P*<0.01。表 3,4 同。
Note:Compared with the control group,* means significant difference at *P*=0.05 and ** means extreme significant difference at *P*=0.01. The same table 3 and 4.

对表 1 中植株高度(*Y*₁)、单株干物质量(*Y*₂)与土壤 Pb 含量(*X*)进行散点观察,发现散点连线呈现

1.2.4 Pb 含量的测定 将从试验用桶中取回的部分供试土壤作为样本,在 120 ℃下烘至恒质量;将烘干的土壤及植物的根、茎、叶、果实分别磨碎过筛(筛孔为 1.4 mm),然后每种样品称取 0.2 g,加 HNO₃-H₂O₂ (4 : 1)消化、定容、保存。用原子吸收分光光度计(美国 AAS-400 型原子吸收分光光度计)测定样品中的 Pb 含量^[16],计算植株的 Pb 转移系数,求平均值。转移系数=植株中的 Pb 含量/土壤中的 Pb 含量^[17]。

1.3 统计分析方法

对植株高度、单株干物质量与土壤 Pb 含量的关系建立分段回归函数;依据 CAT、POD、SOD、MDA、*Pn* 5 个指标随土壤 Pb 含量的变化,通过聚类分析与判别分析法对土壤污染程度进行分类;同时对 CAT、POD、SOD、MDA、*Pn* 5 个指标与土壤 Pb 含量进行直接相关、综合相关及多元回归分析^[13]。

以上分析利用软件 SPSS 17.1 和 MATLAB 7.0 编程计算。

2 结果与分析

2.1 土壤 Pb 含量对三樱椒生长的影响

从表 1 可以看出,三樱椒植株高度随土壤 Pb 含量的增加而减小,当土壤 Pb 含量(即包括 Pb 本底含量,下同)大于 1 041 mg/kg 时,与对照组相比开始显著减小。单株干物质量也随土壤 Pb 含量的增加而降低,当土壤 Pb 含量大于 1 541 mg/kg 时,与对照组相比开始显著减小。植株长势和颜色及外观,也随土壤 Pb 含量的增加而劣变。

阶段式分布(散点观察图略),对植株高度与单株干物质质量分别进行平移分段回归分析,各段最适相关系数及回归函数见表 2。

表 2 Pb 胁迫下三樱桃植株高度和单株干物质质量的平移分段回归分析

Table 2 Segmented regression analysis of the average height and biomass per plant of Three Cherry Pepper under Pb stress

项目	土壤 Pb 含量(X) Soil Pb content		
	41~791	1 041~2 541	41~3 541
植株高度 Average height	$Y_1 = -8 \times 10^{-6} X^2 + 0.0017X + 55.535,$ (1) $R^2 = 0.8401^*$	$Y_1 = -4 \times 10^{-6} X^2 + 0.0086X + 40.285,$ (2) $R^2 = 0.9866^{**}$	$Y_1 = -4 \times 10^{-7} X^2 - 0.0064X + 56.319,$ $R^2 = 0.9505^{**}$
单株干物质质量 Biomass per plant	$Y_2 = -1 \times 10^{-6} X^2 + 0.0003X + 14.84,$ (3) $R^2 = 0.9597^{**}$	$Y_2 = -2 \times 10^{-6} X^2 + 0.0055X + 10.03,$ (4) $R^2 = 0.9914^{**}$	$Y_2 = -2 \times 10^{-7} X^2 - 0.0018X + 15.325,$ $R^2 = 0.9604^{**}$

分段函数表明,三樱桃的平均植株高度和单株干物质质量与土壤 Pb 含量存在显著的二次回归函数关系,只是在不同的范围有不同的二次回归函数。土壤 Pb 含量为 41~791 mg/kg 和 1 041~2 541 mg/kg 时,二次分布函数完全不同,根据函数(1)和(2),求得两段函数的分界点为: $X = 1\,272.074$ (mg/kg), $Y_1 = 44.752$ cm;根据函数(3)和(4),求得两段函数的分界点为: $X = 1\,203.58$ (mg/kg), $Y_2 = 13.7525$ g。也就是从理论上讲,当土壤 Pb 含量超过 1 200 mg/kg 时,三樱桃平均植株高度和单株生物量都会明显下降,对植株生长产生了显著影响。这与表 1 中 Pb 含量在 1 000 mg/kg 以下时对

三樱桃生长影响不明显的规律一致。

2.2 土壤 Pb 含量对三樱桃生理指标的影响

从表 3 可以看出,三樱桃幼苗的 CAT、POD、SOD 及 P_n 在土壤 Pb 含量大于 1 041 mg/kg 后,开始发生显著性变化;至 Pb 含量为 1 541 mg/kg 时,各指标均出现显著性变化。其中, CAT 和 POD 活性及 P_n 随着土壤中 Pb 含量的增加呈先升高后降低的趋势, CAT 活性在土壤中 Pb 含量为 541 mg/kg 时最高, POD 活性在土壤中 Pb 含量为 1 041 mg/kg 时最高;MDA 含量和 SOD 活性随土壤中 Pb 含量的增加总体呈升高趋势。

表 3 土壤 Pb 含量对三樱桃生理指标的影响

Table 3 Physiological characteristics of Three Cherry Pepper affected by different soil Pb concentrations

Pb 含量/ (mg · kg ⁻¹) Pb content	CAT 活性/ (mg · g ⁻¹ · min ⁻¹) Enzyme activity of CAT	POD 活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹) Enzyme activity of POD	SOD 活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹) Enzyme activity of SOD	MDA 含量/ (μmol · g ⁻¹) Content of MDA	P_n / (μmol · m ⁻² · s ⁻¹) Net photosynthetic rate
41(CK)	0.35±0.05	12.82±1.90	7.00±1.10	6.97±0.50	14.79±2.10
291	0.43±0.05	17.33±2.10	10.10±1.90	6.91±0.90	15.55±1.80
541	0.57±0.09	16.30±1.50	11.60±2.20	6.99±1.50	15.28±1.70
791	0.50±0.04 [*]	17.60±1.80	10.80±1.50	6.72±1.80	14.24±1.30
1 041	0.22±0.08 [*]	26.56±1.80 ^{**}	15.40±2.30 [*]	7.59±0.90	10.33±1.90 [*]
1 541	0.04±0.03 ^{**}	25.60±1.50 ^{**}	18.40±2.20 ^{**}	8.43±0.80 [*]	7.34±1.30 [*]
2 041	0.05±0.03 ^{**}	24.50±2.10 [*]	16.60±2.40 [*]	18.37±2.10 ^{**}	7.16±0.90 [*]
2 541	0.05±0.02 ^{**}	24.26±1.90 [*]	17.60±1.80 [*]	17.93±1.90 ^{**}	7.23±1.50 [*]
3 041	0.05±0.01 ^{**}	23.50±1.80 [*]	15.60±1.90 [*]	18.37±1.70 ^{**}	3.56±0.80 [*]
3 541	0.05±0.02 ^{**}	21.26±2.20 [*]	16.90±1.50 [*]	18.49±1.80 ^{**}	3.33±1.10 [*]

依据表 3 中的 5 个生理指标进行聚类分析,将土壤 Pb 污染基本分为 3 大类:轻度污染(土壤 Pb 含量为 41~791 mg/kg),中度污染(土壤 Pb 含量为 791~1 541 mg/kg),重度污染(土壤 Pb 含量大于 1 541 mg/kg)。以此分类进行判别分析,判别函数具有极显著性($P=0.001$),对 3 个污染程度的分组判别,正确率均为 100%。土壤环境质量标准 GB 15615-1995 将土壤污染划分为一级、二级和三级,与本研究划分的范围和标准不同,但本研究 3 个污染程度的划分也能够很好地反映土壤 Pb 含量对 5

个生理指标的综合影响。如果仅依据本研究设置的土壤 Pb 含量组别进行 Pb 污染程度判别分析,一方面组别太多,判别困难;另一方面也没有实际意义。

2.3 土壤 Pb 含量与三樱桃生理指标的相关分析

土壤 Pb 含量与 CAT、POD、SOD、MDA、 P_n 5 个生理指标的直接相关系数分别为-0.805,0.605,0.782,0.914,-0.955,都具有显著性($P<0.05$);对 5 个生理指标的影响系数分别为 0.462 6,0.626 6,0.627 2,0.068 2 和 0.141 6,可见土壤 Pb 含量对 POD 和 SOD 活性的影响最大,其次是

CAT,对 MDA 和 Pn 的影响相对较小。5 个生理指标与土壤 Pb 含量的综合相关系数为 0.992,具有极显著性($P=0.01$),表明随土壤 Pb 含量的增加,三樱椒受到 Pb 胁迫后,生理保护功能增强。土壤 Pb 含量(Y)与 CAT(X_1)、POD(X_2)、SOD(X_3)、MDA(X_4)、 Pn (X_5) 5 个生理指标间的回归关系为: $Y=2\,336.916+2\,461.846X_1-45.610X_2+82.221X_3+69.258X_4-245.403X_5$ 。

2.4 土壤 Pb 含量对三樱椒植株 Pb 含量的影响

从表 4 可以看出,随着土壤中 Pb 含量的增加,三樱椒根、茎、叶中的 Pb 含量总体呈增加趋势,但果实中的 Pb 含量变化不明显。当土壤 Pb 含量大

于 541 mg/kg 时,根和叶中的 Pb 含量显著高于对照组;当土壤 Pb 含量大于 2 041 mg/kg 时,茎中的 Pb 含量也开始显著高于对照组;但果实中 Pb 含量在各处理组间无显著变化。土壤中 Pb 含量与根、茎、叶、果实中 Pb 含量的相关系数分别为:0.866* ($P<0.05$),0.822* ($P<0.05$),-0.004,0.417,其中与根、茎的相关性显著,说明根部是吸收 Pb 的主要部位。三樱椒单株 Pb 含量在土壤 Pb 含量为 1 041 mg/kg 时最大,与对照组差异极显著。单株转移系数随土壤 Pb 含量增加呈先增后减的趋势,在土壤 Pb 含量为 541 mg/kg 时最大。

表 4 土壤 Pb 含量对三樱椒根、茎、叶、果实中 Pb 含量及植株 Pb 转移系数的影响
Table 4 Accumulation and transfer coefficient of Pb in roots, stems, leaves and fruits of Three Cherry Pepper under different soil Pb concentrations

土壤 Pb 含量/ (mg · kg ⁻¹) Soil Pb content	三樱桃 Pb 含量/(mg · kg ⁻¹) Pb concentration of Three Cherry Pepper						单株转移系数 Transfer coefficient per plant
	根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves	果实 Fruits	单株 Individual plant	地上部分 Aerial parts	
291	15.85±1.30	8.28±1.10	5.47±0.90	4.72±0.80	8.32±1.40	6.26	0.203
541	265.06±18.20**	10.77±1.30	10.05±1.50*	3.07±0.90	69.55±2.50**	7.26	0.239
1 041	330.76±23.20**	10.80±1.40	10.40±2.21**	5.42±1.20	101.51±2.82**	13.42	0.128
2 041	351.80±25.40**	27.99±1.80*	10.78±1.30*	5.29±1.30	96.80±2.80**	15.09	0.063
3 041	370.49±26.10**	20.46±2.20*	17.50±1.90*	4.48±1.10	72.44±2.11	14.00	0.029

3 讨 论

秦普丰^[7]研究表明,当土壤中 Pb 含量达到 1 000 mg/kg 时,可严重抑制棉花、水稻幼苗的生长发育,植株矮小且出现严重的受害症状。本研究结果表明,三樱椒植株高度和单株生物量随土壤中 Pb 含量的增加而明显下降,特别是当土壤 Pb 含量大于 1 200 mg/kg 时,下降最为显著。这是因为重金属可结合在细胞壁上,导致中胶层中果胶的交联,这种交联可能是细胞伸长生长受抑的原因^[18]。

孔祥生等^[8]证明,在重金属胁迫下,玉米叶片细胞质膜的组成和完整性遭到破坏,导致植物体内一系列生理生化过程失调,植物光合作用受到抑制;且抑制程度与植物种类、植物发育时期以及重金属的种类有关^[19]。在正常情况下,细胞内自由基的产生和清除处于动态平衡状态,自由基水平很低,不会伤害细胞。可是当植物受到胁迫时,这个平衡就会被打破,自由基累积过多,就会伤害细胞^[20-21]。植物体内的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等保护酶可以消除植物体内增加的 O₂⁻、OH⁻等自由基,解除或减轻植物的受害程度。本研究结果表明,三樱椒幼苗的保护酶 CAT、

POD、SOD 及 MDA、 Pn 5 个生理指标先随土壤 Pb 含量的增加而抗胁迫性增强,之后随土壤 Pb 含量的增加抗胁迫性呈下降趋势,各生理指标的峰值点不同。

Van Assche 等^[22]研究发现,一些植物对重金属响应的共同特征是组织中的 POD 明显升高,因此,有人建议将植物组织中 POD 活性的变化作为检测污染胁迫的灵敏指标。本研究结果也表明,土壤 Pb 含量对三樱椒 POD 的影响系数最大,说明 POD 活性可以反映土壤 Pb 的污染程度。

土壤中的 Pb 主要以难溶性化合物存在,其迁移性和生物有效性都大大降低。因此,Pb 主要累积在土壤表层。研究表明,植物吸收的铅主要累积在根部,只有少数才转移到地上部分^[23]。本研究结果也表明,三樱椒根部是吸收累积 Pb 的主要部位。

[参考文献]

[1] 张 菊,陈诗越,邓焕广,等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价 [J]. 生态学报,2012,32(10):3144-3153.
Zhang J,Chen S Y,Deng H G, et al. Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province [J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(10):3144-3153. (in Chinese)
[2] 赵云霞,杨自军. 河南省义马市及其周边地区土壤重金属含量

调查与分析 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 171-174.

Zhao Y X, Yang Z J. A survey and analysis of soil heavy metals in Yima and its surrounding areas, Henan province [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2012, 40(4): 171-174. (in Chinese)

[3] 张征田, 夏敏, 彭宇, 等. 河南南阳不同生境土壤重金属含量及其对拟水狼蛛生物学特性的影响 [J]. 昆虫学报, 2009, 52(9): 994-999.

Zhang Z T, Xia M, Peng Y, et al. Heavy metal levels in soil and their effects on biological characteristics of *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) in different habitats in Nanyang, Henan [J]. Acta Entomologica Sinica, 2009, 52(9): 994-999. (in Chinese)

[4] 王兴阳. 南阳市郊区蔬菜中重金属污染现状分析与对策 [J]. 河南农业科学, 2009(6): 37-38.

Wang X Y. Analysis and countermeasures of heavy metal pollution on vegetables in the suburb of Nanyang [J]. Henan Agricultural Sciences, 2009(6): 37-38. (in Chinese)

[5] 赵红军. 日本栃木三樱朝天椒 [J]. 中国蔬菜, 2000(5): 46-47.

Zhao H J. Japanese *Capsicum annuum* L. var [J]. Chinese Vegetables, 2000(5): 46-47. (in Chinese)

[6] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解 [J]. 生态环境, 2005, 14(1): 136-138.

Nie F H. New comprehensions of hyperaccumulator [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(1): 136-138. (in Chinese)

[7] 秦普丰. Pb 与 Cd 对棉花和水稻萌发及生长的影响 [J]. 湖南农业大学学报, 2000, 26(3): 205-207.

Qin P F. Effects of cadmium and lead in soil on the germination and growth of rice and cotton [J]. Journal of Hunan Agricultural University, 2000, 26(3): 205-207. (in Chinese)

[8] 孔祥生, 张妙霞, 郭秀璞. Cd²⁺ 毒害对玉米幼苗细胞膜透性及保护酶活性的影响 [J]. 农业环境保护, 1999, 18(3): 133-134.

Kong X S, Zhang M X, Guo X P. Effect of cadmium toxicity on cell membrane permeability and protective enzyme activity of maize seedling [J]. Agro-environmental Protection, 1999, 18(3): 133-134. (in Chinese)

[9] 魏学玲, 史如霞, 杨颖丽, 等. Pb²⁺ 胁迫对两种小麦幼苗生理特性影响的研究 [J]. 植物研究, 2009, 29(6): 714-720.

Wei X L, Shi R X, Yang Y L, et al. Effects of Pb²⁺ stress on physiological characteristics of two wheat seedlings [J]. Bulletin of Botanical Research, 2009, 29(6): 714-720. (in Chinese)

[10] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 等. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4475-4482.

Du T Q, Yang J Z, Hao J P, et al. Influences of multiple stress by Cd, Pb and Cr on physiological biochemical characters of wheat seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4475-4482. (in Chinese)

[11] 唐咏. 铅污染对辣椒幼苗生长及 SOD 和 POD 活性的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(1): 26-28.

Tang Y. Effect of lead pollution on the growth and the activity of superoxide dismutase and peroxidase in hotpepper seedlings [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2001, 32(1): 26-28. (in Chinese)

[12] 徐明飞, 张永志, 王钢军, 等. 铅对辣椒生长特性及其细胞组织超微结构的影响 [J]. 中国农学通报, 2008, 24(3): 369-373.

Xu M F, Zhang Y Z, Wang G J, et al. Effect of Pb on growth characteristics and cell ultrastructure of capsicum [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(3): 369-373. (in Chinese)

[13] 杜瑞卿, 武福华, 王庆林, 等. 松突圆蚧数量、环境因子及马尾松受危害程度三者间的相关性分析 [J]. 昆虫学报, 2009, 52(5): 544-550.

Du R Q, Wu F H, Wang Q L, et al. Correlation analysis of population size of *Hemiberlesia pitysophila* (Homoptera: Diaspididae), environmental factors and the hazard degree of masson pine [J]. Acta Entomologica Sinica, 2009, 52(5): 544-550. (in Chinese)

[14] 刘萍, 李明军. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 125-127.

Liu P, Li M J. Experimental technology of plant physiology [M]. Beijing: Science Press, 2009: 125-127. (in Chinese)

[15] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 123-124, 268-269, 274-276.

Zhang Z L, Qu W J. Experimental guide of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 123-124, 268-269, 274-276. (in Chinese)

[16] 龚小见, 周婵媛, 陈华国, 等. 不同产地吉祥草中重金属的含量测定 [J]. 光谱实验室, 2011, 28(2): 670-673.

Gong X J, Zhou C Y, Chen H G, et al. Determination of five elements in *Reineckea carnea* (Andr) Kunth from different areas [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2011, 28(2): 670-673. (in Chinese)

[17] 黎佳佳, 胡红青, 付庆灵, 等. Cd、Pb 单一与复合污染对辣椒生物量及重金属残留的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 49-53.

Li J J, Hu H Q, Fu Q L, et al. Impact of single cadmium, lead and their combination pollution on pepper biomass and residues of heavy metals [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 49-53. (in Chinese)

[18] 赵博生, 毕红卫. 重金属对植物细胞的毒害作用研究进展 [J]. 淄博学院学报: 自然科学与工程版, 1999, 1(1): 86-88.

Zhao B S, Bi H W. Research advances on toxicology of heavy metals in plant cells [J]. Journal of Zibo University in China, 1999, 1(1): 86-88. (in Chinese)

[19] 张波, 王进鑫, 初江涛, 等. 水分和铅胁迫对刺槐苗木叶片生理指标的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(8): 63-68.

Zhang B, Wang J X, Chu J T, et al. Effects of water and Pb stress leaf physiological characteristics of *Robinia pseudoacacia* [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2011, 39(8): 63-68. (in Chinese)