

Pb 胁迫条件下 3 种叶菜的生长和生理响应及其抗性差异

陈丽娜^{1,2}, 唐明灯¹, 艾绍英^{1,①}, 李盟军¹, 曾招兵¹, 王艳红¹

(1. 广东省农业科学院土壤肥料研究所 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 湖南农业大学园艺园林学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 采用水培法研究了不同浓度 (24、120 和 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Pb 胁迫条件下花芽甜麦菜 (*Sonchus oleraceus*)、碧绿粗苔菜心 (*Brassica chinensis* var. *utilis*) 和空心菜 (*Ipomoea aquatica*) 生长和部分生理指标 (包括游离脯氨酸含量及 SOD、POD 和 CAT 活性) 以及 Pb 吸收量的变化, 并通过隶属函数法对 3 种叶菜的 Pb 抗性进行了综合比较。结果表明: Pb 胁迫对 3 种叶菜单株地上部分鲜质量总体上影响不明显。随 Pb 胁迫浓度的提高, 3 种叶菜地上部分和地下部分 Pb 含量逐渐升高, 且地下部分 Pb 含量均高于地上部分, Pb 转运系数则显著降低 ($P < 0.05$); 按 Pb 含量由高至低依次为空心菜、碧绿粗苔菜心、花芽甜麦菜。在 Pb 胁迫条件下, 花芽甜麦菜中游离脯氨酸含量均略低于对照但差异不显著 ($P > 0.05$), 空心菜中游离脯氨酸含量均显著高于对照, 而碧绿粗苔菜心的游离脯氨酸含量仅在 120 和 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下显著高于对照。随 Pb 胁迫浓度提高, 3 种叶菜 SOD 活性呈逐渐增加的趋势, 但总体上与对照差异不显著; 经 Pb 胁迫处理后, 3 种叶菜的 CAT 活性或高于或低于对照, 但在 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下花芽甜麦菜的 CAT 活性显著低于对照、碧绿粗苔菜心和空心菜的 CAT 活性显著高于对照; Pb 胁迫后 3 种叶菜的 POD 活性未表现出明显的规律。经过综合评价, 3 种叶菜对 Pb 的抗性由大至小依次为碧绿粗苔菜心、空心菜、花芽甜麦菜。经过主成分分析, 确定 3 种叶菜的游离脯氨酸含量、SOD 和 CAT 活性为 Pb 胁迫的响应因子。

关键词: Pb 胁迫; 叶菜; 生长; 生理指标; Pb 抗性; 隶属函数

中图分类号: S636.9; X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2010)04-0078-06

Growth and physiological responses and variance of Pb resistance of three leaf vegetables under Pb stress

CHEN Li-na^{1,2}, TANG Ming-deng¹, AI Shao-ying^{1,①}, LI Meng-jun¹, ZENG Zhao-bing¹, WANG Yan-hong¹ (1. Guangdong Province Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Institute of Soil and Fertilizer, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. College of Horticulture and Gardening, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2010, 19(4): 78-83

Abstract: Changes of growth and some physiological indexes and Pb absorption amount in three leaf vegetables (including *Sonchus oleraceus*, *Brassica chinensis* var. *utilis* and *Ipomoea aquatica*) were studied by water culture method under Pb stress with different concentrations (24, 120 and 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), and Pb resistance of three leaf vegetables was compared comprehensively by subordinate function method. The results show that effect of Pb stress on fresh weight of above-ground part of individual of three leaf vegetables is not obvious generally. With rising of Pb concentration, Pb contents in above- and under-ground parts both increase gradually, and Pb content in under-ground part is higher than that in above-ground part, while the translocation coefficient of Pb decreases significantly ($P < 0.05$). The order of Pb content in three leaf vegetables from high to low is *I. aquatica*, *B. chinensis* var. *utilis*, *S. oleraceus*. Under Pb stress condition, free proline content in *S. oleraceus* is slightly lower than that in the control without significant difference ($P > 0.05$), while that in *I. aquatica* is significantly higher than that in the

收稿日期: 2010-03-29

基金项目: 广东省农业领域重点专项项目(2009A0201005); 广东省社会发展计划项目(2006A36703005)

作者简介: 陈丽娜(1984—), 女, 广东梅州人, 硕士, 主要从事土壤重金属污染及蔬菜安全生产研究。

①通信作者 E-mail: shaoyingai@21cn.com

control. But that in *B. chinensis* var. *utilis* only under high concentration (120 and $240 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) of Pb stress is significantly higher than that in the control. SOD activity of three leaf vegetables appears an gradually increasing trend with enhancing of Pb stress concentration, but generally has no significant difference with that in the control. CAT activity of three leaf vegetables is higher or lower than that of the control after Pb stress, but only under $240 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb stress that of *S. lingiaus* is significantly lower than that of the control and that of *B. chinensis* var. *utilis* and *I. aquatica* is significantly higher than that of the control. POD activity of three leaf vegetables has no obvious regularity after Pb stress. According to the comprehensive evaluation of physiological indexes, the order of Pb resistance of three leaf vegetables from strong to weak is *B. chinensis* var. *utilis*, *I. aquatica*, *S. lingiaus*. It can be determined that the response factors of three leaf vegetables to Pb stress are free proline content and activities of SOD and CAT by the principal component analysis.

Key words: Pb stress; leaf vegetable; growth; physiological index; Pb resistance; subordinate function

目前,中国农田受重金属污染面积广,且主要为中、轻度污染^[1]。作物不同种或品种间对重金属吸收和积累的能力存在差异^[2],筛选利用低重金属积累作物可为降低农产品污染风险提供有效的手段^[3]。代全林^[3]认为,作物的生物量与茎叶重金属含量无明显相关性,这可能与不同植物对重金属具有不同的抗性机制有关。有不少研究者从多方面通过植物对铅胁迫的响应差异探索不同种植物^[4]、同种植物不同生态型^[5]或不同无性系^[6]及不同品种^[7]对Pb的抗性机制,但研究内容大多集中于Pb胁迫对不同生理指标的影响规律的分析^[8-10],而对Pb胁迫条件下不同植物类群间综合生理差异的比较研究较少。由于存在在同一胁迫条件下同种植物不同品种间同一指标的差异较小^[9]、或不同品种间同一指标虽然有差异但各指标差异表现不一致^[11]等现象,因而,无法直接进行不同植物类群间的差异比较。植物体内的各项生理指标是相互作用的统一整体,因此,利用隶属函数对各指标进行综合分析,能更客观地反映不同植物类群间的抗性差异^[11-12]。

叶菜是人们日常膳食必需品,但叶菜比果菜和茎菜更易积累Pb^[13],菜地土壤Pb污染可导致叶菜产量和品质降低,并通过食物链直接或间接危害人体健康^[14]。植物的抗逆性是一个受多基因控制的复杂性状^[15],不同种类叶菜对Pb的响应机制可能不同。本研究以前期筛选的花芽甜麦菜(*Sonchus lingiaus*)、碧绿粗苔菜心(*Brassica chinensis* var. *utilis*)和空心菜(*Ipomoea aquatica*)3种Pb吸收量不同的叶菜为实验对象^[16],采用水培法研究在不同浓度Pb胁迫条件下它们的生长和部分生理指标的变化及对Pb的吸收转运规律,并通过隶属函数法进行综合评价,比较3种叶菜的Pb抗性,以期进一步从生理角度研究3种叶

菜对Pb胁迫的抗性差异及响应机制。

1 材料和方法

1.1 材料

供试花芽甜麦菜(Pb敏感型)、碧绿粗苔菜心(Pb低吸收型)和空心菜(Pb高吸收型)^[16]种子均购自广州市天河区五山农科院种子市场,挑选籽粒完整无损、大小均匀的种子备用。

1.2 方法

1.2.1 Pb胁迫处理方法 参照Islam的方法^[5]并加以改进。于2009年4月25日将种子分别播种于装有混合基质[W(蛭石):W(泥炭):W(椰糠)=6:2:1]的培养盆(长45 cm、宽30 cm、高10 cm)中,待幼苗长出1片真叶后用1/2园试营养液^[17]浇灌;4月30日选取已有2片真叶的幼苗移栽至同样规格的培养盆中进行水培,每盆12株,每盆装1/2园试营养液10 L,5 d后(5月4日)进行Pb胁迫处理,将PbCl₂加入1/2园试营养液中,使溶液中Pb的终浓度分别为24、120和240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,对照(CK,0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)则不添加PbCl₂;每种叶菜每一处理均重复3盆。每3天更换1次处理液。胁迫实验于5月18日结束,处理时间共15 d。

1.2.2 指标测定方法 每盆随机选取6株,将植株地上部分和地下部分分别采收,称取单株地上部分鲜质量后,将地上部分和地下部分分别切碎混合,取样测定Pb含量;在余下的6株中随机采集叶片,去除叶脉后将叶片剪碎混匀,称取2 g,加入0.05 mol · L⁻¹磷酸缓冲液(pH 7.8)5 mL,冰浴研磨至匀浆,再用0.05 mol · L⁻¹磷酸缓冲液(pH 7.8)5 mL冲洗,转移至离心管中,于4 °C、10 000 g离心15 min,上清液于

冰箱(-20 ℃)中保存,用于各项生理指标的测定。

用酸性水合茚三酮显色法^{[18]72-73}测定游离脯氨酸含量;用氮蓝四唑(NBT)光化还原抑制法^{[18]73-75}测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚比色法^{[18]78-79}测定过氧化物酶(POD)活性;采用紫外吸收法^{[18]78-79}测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用火焰原子吸收分光光度计(Hitachi Z5000,日本日立公司)测定^[19]Pb含量。

1.3 数据处理及分析

分别按以下公式计算 Pb 的转运系数和抗性指数:转运系数=地上部分 Pb 含量/地下部分 Pb 含量^[13];抗性系数=处理测定值/对照测定值^[20]。

采用 SPSS 10.0 和 Excel 统计分析软件对实验数据进行统计计算,采用 LSD 法进行差异显著性分析。采用 SPSS 10.0 进行主成分分析,并利用隶属函数值对 3 种叶菜的 Pb 抗性进行综合评价;其中,公因子得分值 $C(x)$ 采用 SPSS 10.0 程序进行计算,隶属函数值 $U(x)$ 、权重值 W 和综合评价值 D 参照文献^[13]的方法进行计算。

2 结果和分析

2.1 Pb 胁迫对 3 种叶菜生长和 Pb 含量的影响

不同浓度 Pb 胁迫条件下 3 种叶菜单株地上部分鲜质量、地上部分和地下部分 Pb 含量及转运系数见

表 1。由表 1 可知,24、120 和 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫对 3 种叶菜单株地上部分鲜质量影响较小,仅 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫处理组花芽甜麦菜地上部分的鲜质量显著低于对照($P < 0.05$),其余各处理组 3 种叶菜单株地上部分的鲜质量或高于或低于对照,但差异均不显著。在 24、120 和 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下,空心菜地上部分和地下部分的 Pb 含量均最高,碧绿粗苔菜心次之、花芽甜麦菜地上部分和地下部分的 Pb 含量均最低。3 种叶菜地上部分 Pb 含量在不同 Pb 胁迫条件下有一定的差异。Pb 胁迫浓度从 24 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 120 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,花芽甜麦菜和碧绿粗苔菜心地上部分 Pb 含量均有所增加,但差异未达显著水平($P > 0.05$),空心菜地上部分 Pb 含量则显著提高;Pb 胁迫浓度从 120 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,花芽甜麦菜和碧绿粗苔菜心地上部分 Pb 含量均显著增加,空心菜地上部分 Pb 含量的增加幅度不显著。3 种叶菜地下部分 Pb 含量总体高于地上部分,且均随 Pb 胁迫浓度的提高显著增加。

转运系数可以反映 Pb 从植株地下部分向地上部分转移的速率。由表 1 可见,随着 Pb 胁迫浓度的提高,3 种叶菜对 Pb 的转运系数显著减小($P < 0.05$),即 Pb 从地下部分向地上部分转运的速率随着 Pb 胁迫浓度提高而减小。在 24 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下,空心菜对 Pb 的转运系数最大,达 0.44;其次是花芽甜麦菜,为 0.34;碧绿粗苔菜心对 Pb 的转运系数

表 1 不同浓度 Pb 胁迫对 3 种叶菜生长和 Pb 含量的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of Pb stress with different concentrations on growth and Pb content in three leaf vegetables($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

叶菜 Leaf vegetable	Pb 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	单株地上部分鲜质量/g Fresh weight of above-ground part of individual	Pb 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Pb content		转运系数 Translocation coefficient
			地上部分 Above-ground part	地下部分 ²⁾ Under-ground part ²⁾	
花芽甜麦菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	0 (CK)	16.8±2.2a	—	—	
	24	17.8±4.0a	0.45±0.08b	1.37±0.34c	0.34±0.09a
	120	16.7±2.6a	0.56±0.11b	4.83±0.45b	0.12±0.06b
	240	10.5±1.7b	1.00±0.12a	11.19±0.66a	0.09±0.02b
碧绿粗苔菜心 <i>Brassica chinensis</i> var. <i>utilis</i>	0 (CK)	25.4±4.7a	—	—	
	24	24.9±1.4a	0.83±0.04b	3.02±0.29c	0.28±0.05a
	120	23.4±4.3a	1.41±0.11b	11.45±1.82b	0.13±0.02b
	240	24.4±2.4a	2.54±0.52a	39.30±4.41a	0.06±0.02b
空心菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	0 (CK)	48.6±7.2a	—	—	
	24	53.6±3.7a	1.73±0.19b	3.99±0.42b	0.44±0.12a
	120	56.7±4.2a	4.90±0.44a	30.80±4.24a	0.16±0.04b
	240	54.3±2.0a	5.75±0.60a	—	—

¹⁾ 同一种叶菜中同列不同的小写字母表示在 5% 水平上有显著差异 Different small letters in the same column of same leaf vegetable indicate the significant difference at 5% level; —: 未检出 Undetected. ²⁾ 因 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下空心菜地下部分 Pb 含量异常,故数据未列出 Pb content in under-ground part of *Ipomoea aquatica* is abnormal under 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb stress, so the data is not listed.

最小,仅为0.28。在120 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,空心菜对Pb的转运系数最大,达0.16;碧绿粗苔菜心和花芽甜麦菜对Pb的转运系数差异较小,分别为0.13和0.12。在Pb胁迫条件下,花芽甜麦菜地上部分和地下部分Pb含量均低于碧绿粗苔菜心,但是其转运系数大于碧绿粗苔菜心,这可能与2种叶菜对Pb胁迫的响应机制不同有关。

2.2 Pb胁迫对3种叶菜游离脯氨酸含量和抗氧化酶活性的影响

不同浓度Pb胁迫对3种叶菜中游离脯氨酸含量和抗氧化酶活性的影响见表2。由表2可见,在24 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,碧绿粗苔菜心的游离脯氨酸含量略高于对照,但差异不显著($P>0.05$);而在120和240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,碧绿粗苔菜心的游离脯氨酸含量显著高于对照($P<0.05$)。在24、120和240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,空心菜的游离脯氨酸含量均显著高于对照组,而花芽甜麦菜的游离脯氨酸含量均略低于对照组,但差异不显著。在240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,碧绿粗苔菜心和空心菜的游离脯氨酸含量分别比对照增加了121%和76%。

在24、120和240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,3种

叶菜的SOD活性随Pb浓度提高总体呈逐渐升高的趋势,但与对照几乎无显著差异,仅在240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下花芽甜麦菜的SOD活性显著高于对照($P<0.05$)。在24~240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,3种叶菜的POD活性与对照均无显著差异($P>0.05$),且随Pb胁迫浓度的提高3种叶菜的POD活性或高于或低于对照,无明显的变化规律。

在24~240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,随Pb浓度的提高3种叶菜的CAT活性呈现不同的变化趋势。花芽甜麦菜的CAT活性在24和120 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下分别高于或低于对照,但差异均不显著($P>0.05$),而在240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下显著低于对照及其他2个胁迫处理组($P<0.05$),且较对照降低了27%;碧绿粗苔菜心的CAT活性在24和120 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下均低于对照,但差异不显著,但在240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下显著高于对照及其他2个处理组,比对照提高了52%;在24、120和240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,空心菜的CAT活性均高于对照,但在24和120 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下与对照差异不显著,在240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下显著高于对照,且较对照提高了76%。

表2 不同浓度Pb胁迫对3种叶菜游离脯氨酸含量和抗氧化酶活性的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Effect of Pb stress with different concentrations on free proline content and antioxidant enzyme activity of three leaf vegetables ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

叶菜 Leaf vegetable	Pb浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	游离脯氨酸含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Free proline content	SOD活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ SOD activity	POD活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ POD activity	CAT活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ CAT activity
花芽甜麦菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	0(CK)	6.9±2.8a	28.0±1.0b	60.0±8.3ab	16.1±1.3a
	24	6.2±1.0a	30.0±3.1b	67.9±39.3ab	18.3±3.0a
	120	6.3±1.4a	33.3±4.5b	55.8±9.4b	15.4±2.5a
	240	6.5±0.5a	43.6±1.6a	75.9±11.7a	11.7±2.5b
碧绿粗苔菜心 <i>Brassica chinensis</i> var. <i>utilis</i>	0(CK)	6.2±4.6c	32.9±11.4a	217.2±106.9a	12.9±3.8b
	24	6.5±6.1bc	39.1±11.7a	260.5±125.4a	12.7±7.4b
	120	14.9±1.2a	38.6±13.4a	241.3±14.1a	10.7±2.3b
	240	13.7±1.8ab	43.1±9.7a	296.9±48.1a	19.6±2.8a
空心菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	0(CK)	7.6±0.7c	5.6±0.7a	309.2±135.4a	7.5±4.5b
	24	8.7±0.3b	6.2±10.6a	375.6±39.5a	10.9±1.0ab
	120	13.3±1.6a	6.5±4.1a	302.2±76.9a	10.0±2.2b
	240	13.4±0.6a	11.5±4.1a	364.1±26.1a	13.2±1.1a

¹⁾同一种叶菜中同列不同的小写字母表示在5%水平上有显著差异 Different small letters in the same column of same leaf vegetable indicate the significant difference at 5% level.

2.3 Pb胁迫条件下3种叶菜生理指标的综合评价

植物的重金属毒害及其抗性是多种生理过程的综合反映^[21],为了综合分析3种叶菜对Pb胁迫的抗性差异,引用隶属函数对3种叶菜的游离脯氨酸含

量、SOD活性、POD活性和CAT活性等4个生理指标进行综合评价。根据Pb抗性系数计算公式将表2中3种叶菜的4个生理指标转换为Pb抗性系数,4个生理指标的Pb抗性系数见表3。对4个生理指标的Pb

抗性系数进行进一步的因子分析(表 4), 4 个生理指标可分为 2 个因子, 累积贡献率达 1.000。第 1 因子中 4 个生理指标的负荷均较大, 其中 SOD 活性和游离脯氨酸含量的负荷最大, POD 活性的负荷最小, 第 1 因子贡献率为 0.650; 在第 2 因子中 POD 活性的因子负荷最大, SOD 活性和 CAT 活性的负荷为负值, 游离脯氨酸含量的负荷也较小, 第 2 因子贡献率为 0.350。结合表 2 的分析结果可知, Pb 胁迫条件下 3 种叶菜的

SOD 活性、游离脯氨酸含量和 CAT 活性均有一定的变化规律, 而 POD 活性的变化规律不明显。因此, 可将第 1 因子归为 Pb 胁迫的响应因子, 第 2 因子归为 Pb 胁迫的非响应因子。

Pb 胁迫条件下 3 种叶菜的公因子得分值 $C(x)$ 、隶属函数值 $U(x)$ 和综合评价价值 D 见表 5。综合评价价值越高, Pb 抗性越强, 因此, 3 种叶菜的 Pb 抗性由强到弱依次为碧绿粗苔菜心、空心菜、花芽甜麦菜。

表 3 Pb 胁迫条件下 3 种叶菜生理指标的 Pb 抗性系数

Table 3 Pb resistance coefficient of physiological indexes of three leaf vegetables under Pb stress condition

叶菜 Leaf vegetable	不同指标的 Pb 抗性系数 Pb resistance coefficient of different indexes			
	游离脯氨酸含量 Free proline content	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity
花芽甜麦菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	0.72	0.80	1.11	0.94
碧绿粗苔菜心 <i>Brassica chinensis</i> var. <i>utilis</i>	0.79	1.22	1.23	1.11
空心菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	0.67	1.40	1.12	1.52

表 4 Pb 胁迫条件下 3 种叶菜生理指标的主成分因子(因子矩阵)负荷及贡献率

Table 4 Load and contribution rate of principal component factors (factor matrix) of physiological indexes of three leaf vegetables under Pb stress condition

因子 Factor	不同指标的因子负荷 Factor load of different indexes				贡献率 Contribution rate
	游离脯氨酸含量 Free proline content	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity	
1	0.933	0.941	0.602	0.693	0.650
2	0.361	-0.337	0.798	-0.721	0.350

表 5 Pb 胁迫条件下 3 种叶菜的公因子得分值 $C(x)$ 、隶属函数值 $U(x)$ 和综合评价价值 D

Table 5 Common factor score $C(x)$, subordinate function value $U(x)$ and comprehensive evaluation value D of three leaf vegetables under Pb stress condition

叶菜 Leaf vegetable	$C(1)$	$C(2)$	$U(1)$	$U(2)$	D
花芽甜麦菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	-1.153	0.055	0.000	0.541	0.189
碧绿粗苔菜心 <i>Brassica chinensis</i> var. <i>utilis</i>	0.624	0.971	1.000	1.000	1.000
空心菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	0.529	-1.026	0.947	0.000	0.615
贡献率 Contribution rate	0.650	0.350			
权重 Weight			0.650	0.350	

3 讨论和结论

在 24、120 和 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 3 种叶菜的游离脯氨酸含量、SOD 和 CAT 活性对 Pb 胁迫均有一定的响应, 但表现不完全一致; 而 3 种叶菜的 POD 活性对 Pb 胁迫较不敏感, 这与张凤琴等^[22]、Boominathan 等^[23] 和张金彪等^[24] 的研究结果一致。在 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 花芽甜麦菜的 SOD 活性显著增加 ($P < 0.05$), 但 CAT 活性显著低于对照,

说明这一 Pb 胁迫强度超出了花芽甜麦菜 CAT 酶的耐受阈值, 但能刺激 SOD 活性; 在 24 ~ 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 花芽甜麦菜的游离脯氨酸含量和 POD 活性与对照差异不显著 ($P > 0.05$), 说明花芽甜麦菜的游离脯氨酸含量和 POD 活性这 2 个指标对 Pb 胁迫的响应作用不明显; 在 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 花芽甜麦菜的抗氧化酶系统受到 Pb 胁迫的破坏, 进而影响其植株的生长, 使地上部分鲜质量减小, 但其植株对 Pb 的吸收量则较低, 其原因还需进一步研究。在 240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 碧绿粗苔菜

心和空心菜抗氧化酶活性的变化趋势具有相似性,二者的CAT活性显著高于对照,说明二者的CAT活性对Pb胁迫的响应较为显著;在24~240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,碧绿粗苔菜心和空心菜的SOD和POD活性总体上较对照有所增加,但均未达显著水平,说明这2个指标对Pb胁迫的响应不显著;此外,与花芽甜麦菜不同的是,碧绿粗苔菜心和空心菜中游离脯氨酸含量在高浓度(120和240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Pb胁迫条件下显著高于对照,使这两种植物的细胞在逆境中保持了胞质溶胶与环境的渗透平衡,防止水分散失,从而在一定程度上增强了植物对胁迫环境的适应性^[25]。

在24、120和240 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,3种叶菜的Pb积累能力由强至弱依次为空心菜、碧绿粗苔菜心、花芽甜麦菜,而3种叶菜对Pb的抗性由强至弱依次为碧绿粗苔菜心、空心菜、花芽甜麦菜,因而,3种叶菜Pb吸收量的高低与其抗性强弱并不完全呈正相关,这可能与不同种类植物对Pb胁迫具有不同的响应机制和抗性机制有关。从3种叶菜对Pb的抗性和地上部分Pb含量可以看出:碧绿粗苔菜心对Pb胁迫是低积累、高耐性植物,空心菜对Pb胁迫是高积累、高耐性植物,而花芽甜麦菜对Pb胁迫则是低积累、低耐性植物。植物对重金属抗性分为避性和耐性^[21],根据Baker^[26]的抗性分类,碧绿粗苔菜心和空心菜均属于Pb耐性种类,花芽甜麦菜则可能属于Pb避性植物。其中,碧绿粗苔菜心将Pb积累在根部,属于根富集重金属的排斥型;而空心菜则属于积累型。这种抗性分类结果还需要进一步的研究确证。

参考文献:

- [1] 胡迪琴. 广州市近郊农田土壤及作物铅污染水平评价[J]. 生态科学, 1997, 16(1): 71-74.
- [2] 刘维涛, 周启星, 孙约兵, 等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 63-67.
- [3] 代全林. 玉米(*Zea mays*)对Cd、Pb胁迫响应的品种间差异及机理研究[D]. 广州: 中山大学生命科学学院, 2005: 6-8.
- [4] 贾玉华. 三种植物对重金属Cd和Pb抗性及其修复潜力的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学草业与环境科学学院, 2008: 22-23.
- [5] Islam E U. Mechanisms of lead uptake and tolerance in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi* and its possible role in the phytoremediation of lead contaminated soils [D]. Hangzhou: College of Environmental and Resource Sciences of Zhejiang University, 2007: 35-42.
- [6] 赵志新, 乔瑞芳, 季孔庶. 杂交鹅掌楸不同无性系对Pb胁迫的生理响应及抗性比较[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(4): 7-12.
- [7] 刘建国, 李坤权, 张祖建, 等. 水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 291-294.
- [8] 黄晓华, 周青, 程宏英, 等. 五种常绿树木对铅污染胁迫的反应[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 13(6): 48-50.
- [9] 王艳, 鄂巍, 吴丹. 铜、铅污染对翦股颖和高羊茅生理的影响[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2005, 23(1): 74-77.
- [10] 殷云龙, 李晓明, 华建峰, 等. 土壤和叶面Pb污染对小麦生长及体内Pb分布和积累的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(2): 28-33.
- [11] 王小鸽, 张文辉, 何景峰, 等. 3个瑞典能源柳无性系对铅污染耐受性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1400-1407.
- [12] 李亮, 夏新莉, 尹伟伦, 等. 用隶属函数法对10个沙棘品种抗旱性的综合评价[J]. 山东林业科技, 2007(1): 59-60.
- [13] 王冬卿. 甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)品种间及品种内Cd积累差异研究[D]. 广州: 中山大学环境科学与工程学院, 2007: 13-26, 31-32.
- [14] 荣湘民, 岳振华, 朱红梅. 湖南省几种主要菜园土铅的化行行为及其作物效应的初步研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1996, 5(1): 27-32.
- [15] 许桂芳, 张朝阳, 向佐湘. 利用隶属函数法对4种珍珠菜属植物的抗寒性综合评价[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 24-26.
- [16] 陈丽娜, 艾绍英, 唐明灯, 等. 铅胁迫对不同叶菜生长及铅吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010(7): 1232-1238.
- [17] 马太和. 无土栽培[M]. 北京: 北京出版社, 1985: 1-5.
- [18] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [19] GB/T 5009.12—2003, 食品中铅的测定[S].
- [20] 田如男, 袁安全, 薛建辉. 4种常绿阔叶乔木树种幼苗抗铅胁迫能力的比较[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(6): 81-84.
- [21] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
- [22] 张凤琴, 王友绍, 李小龙. 复合重金属胁迫对秋茄幼苗某些生理特性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2234-2239.
- [23] Boominathan R, Doran P M. Cadmium tolerance and antioxidative defenses in hairy roots of the cadmium hyperaccumulator, *Thlaspi caerulescens* [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 83(2): 158-167.
- [24] 张金彪, 周碧青, 雷永程, 等. 植物源POD和CAT的筛选及其与重金属的相互作用[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2009, 38(3): 295-300.
- [25] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 119-120.
- [26] Baker A J M. Metal tolerance [J]. New Phytologist, 1987, 106: 93-111.