

铅胁迫对不同叶菜生长及铅吸收的影响

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

(1.广东省农业科学院土壤肥料研究所, 广州 510640; 2.湖南农业大学园艺园林学院, 长沙 410128)

摘要:为探明铅对不同叶菜的影响差异,通过铅污染土壤的盆栽试验,研究了 21 种叶菜的铅吸收差异和生物量变化。结果表明,铅胁迫对叶菜生长大部分表现抑制作用,但也有少数表现促进作用。叶菜地上部、地下部铅含量表现为随土壤铅含量的增加而显著增加($P<0.05$),且地上部<地下部。不同科叶菜间地上部铅含量差异显著($P<0.05$),且十字花科<菊科<伞形科;地下部铅含量差异不显著($P>0.05$)。综合叶菜地上部铅含量和生物量抑制率把供试 21 种叶菜分为 4 类,矮脚 80 天特青菜心、碧绿粗苔菜心、竹芥菜和菠菜这 4 种叶菜生物量不受 Pb 胁迫的影响,且铅含量低,是铅轻度污染土壤中种植安全系数较高的菜种,茼蒿、黄心芹菜、白尖叶茼蒿和柳叶空心菜属于高吸收铅的叶菜,花芽甜麦菜属于生长影响敏感型叶菜。

关键词:叶菜;铅;生物量;聚类分析

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1232-07

Plant Growth and Lead Uptake of Leafy Vegetables Under Lead Stress

CHEN Li-na^{1,2}, AI Shao-ying¹, TANG Ming-deng¹, LI Meng-jun¹, ZENG Zhao-bing¹, WANG Yan-hong¹, YAO Jian-wu¹

(1.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)

Abstract: The contamination of leafy vegetables by Pb has been commonly reported in China. However, there were few experiments focused on Pb concentration difference among leafy vegetables under the same planting conditions and the selection of low-Pb cultivars. Therefore, a pot experiment was carried out to study the plant growth and Pb uptake of 21 kinds of leafy vegetables with the soil contaminated by Pb. The results indicated that Pb decreased biomass of majority vegetables with a few exceptions for the tested vegetables. Pb contents in shoots and roots increased significantly with the increasing of Pb in the soil, and Pb concentrations in roots were much higher than those in shoots. There was significantly difference in Pb content in shoots among three families, which were in the order of Brassicaceae < Compositae < Umbelliferae, but there was no significantly difference in roots between families. The vegetables were divided into four clusters based on Pb content and biomass inhibition. Teqing-80-day flowering Chinese cabbage, Bilicutai flowering Chinese cabbage, Zhu mustard and Spinach were found in high biomass and low-Pb concentration, then they should be the low-Pb leafy vegetables and suitable for moderately contaminated soils. High-Pb leafy vegetables included Coriander, Huangxin celery, Baijianye amaranth and Liuye water spinach, and Huaya sweet-lettuce was a biomass sensitive type.

Keywords: leafy vegetables; lead; biomass; cluster analysis

铅是一种有害的重金属环境污染物,来源于铅矿开采,含铅杀虫剂使用,城市污水的农业灌溉,废气排放等^[1]。作为一种生物代谢的非必需元素,铅在生物体内即使被少量吸收都能产生毒害作用^[2]。铅对人体各

系统和器官均有毒性作用,尤其对儿童、孕妇的危害性更大,主要累及神经、造血、胃肠道、肝脏、肾脏及心血管系统^[3]。铅对作物的影响主要表现在危害生长、降低产量上^[4]。铅能通过土壤-作物系统进入食物链,危害人体健康。进入农田生态系统的铅大部分累积于土壤耕作层中^[5],可不断地被作物吸收。

城郊与城市接壤,交通方便,是蔬菜生产的重要基地,但是城郊又往往和工业生产区、污灌区、交通干线接近,成为重金属污染的重要区域^[6]。调查表明,各

收稿日期:2010-01-07

基金项目:农业部公益性行业科研专项“核技术农业应用”(20083034);
广东省社会发展项目(2007A032303001,2008A030202002)

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

通讯作者:艾绍英 E-mail:shaoyingai@21cn.com

主要大、中城市郊区的蔬菜都已受到一定程度的重金属污染^[7-11]。叶菜因其生长周期短、见效快、适于周年生产,而在城郊广泛种植,但是叶菜类比果菜类和茎菜类更易积累重金属^[12]。作物对重金属的吸收,不同种间^[13-14]、种内不同品种间^[15-17]都存在差异。因此,本试验以广州常见的 21 种叶菜为材料,研究它们不同的铅吸收特性,为污染农田提供铅低积累叶菜,减少污染区种植易富集叶菜提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试叶菜

共 21 种供试叶菜,见表 1,所有种子均购自广州市天河区五山路广东省农业科学院蔬菜研究所种子市场。

1.2 供试土壤

供试土壤采自广州市白云区水稻-蔬菜轮作农田,为赤红壤发育而成。土壤基本性状为:pH 5.83,有机质 23.4 g·kg⁻¹,速效 N、P、K 分别为 119、68.5、285 mg·kg⁻¹,全量 N、P、K 分别为 1.36、1.01、7.72 g·kg⁻¹。土壤自然风干后,过 1 cm 筛,分别将 100 kg 土壤装入大塑料箱中,分别加入 0、23、48 g 的 PbCl₂(分析

纯,以溶液形式加入),使得土壤中总 Pb 含量约为 0、250(土壤环境质量二级)、500 mg·kg⁻¹(三级)^[18],与土壤充分混匀后加入去离子水使土壤保持田间持水量。2 个月后自然风干,过 0.5 cm 筛,用于盆栽试验。

1.3 试验方法

采用两因素完全组合盆栽试验,铅 3 个水平和叶菜 21 种,共 63 个处理,T0 设 3 次重复,T1、T2 设 4 次重复。试验于 2008 年 10—11 月在广东省农业科学院土壤肥料研究所网室进行。每盆(底径 11 cm、口径 18 cm、高 11 cm)装土 1.5 kg。三叶期间苗,每盆留 4 株长势均匀的植株。试验期间根据天气和作物生长情况适当浇水,按 0.2 g·kg⁻¹ N、0.3 g·kg⁻¹ P₂O₅ 和 0.2 g·kg⁻¹ K₂O 的施肥量施用尿素和磷酸二氢钾,分 3 次施入。播种 45 d 后收获。

所采集的叶菜植株经自来水和蒸馏水洗净,用布吸干表面水分,分开地上和地下部并称鲜重,把地上部切碎混匀。取地上部(10 g)和地下部(全部)样品,经混酸(硝酸:高氯酸=5:1 V/V;试剂为优质纯)消解,定容到 25 mL,用火焰原子吸收分光光谱仪(Hitachi Z5000)测定叶菜地上和地下铅含量^[19]。

表 1 供试叶菜序号、种名及科名
Table 1 The number and name of vegetables tested

序号	品种	种名	科名
1	甜脆小白菜	<i>Brassica campestris ssp.chinensis</i> var. <i>communis</i> Tsen et Lee	十字花科
2	矮脚黑叶白菜		
3	青梗菜		
4	油青 60 天菜心	<i>Brassica campestris ssp.chinensis</i> var. <i>utilis</i> Tsen et Lee	
5	矮脚 80 天特青菜心		
6	碧绿粗苔菜心		菊科
7	赤叶白骨春菜	<i>Brassica juncea</i> (L.)Czern. et Coss. var. <i>juncea</i>	
8	水东鸡心芥菜	<i>Brassica juncea</i> Linn. var. <i>foliosa</i> L. H. Bailey	
9	竹芥菜		
10	广州迟芥兰	<i>Brassica alboglabra</i> L. H. Bailey	
11	千宝菜	<i>Brassica oleracea</i> Linn. var. <i>capitata</i> L. <i>×Brassica campestris ssp.chinensis</i> var. <i>communis</i>	伞形科
12	生菜	<i>Lactuca sativa</i> Linn. var. <i>ramosa</i> Hort.	
13	花芽甜麦菜	<i>Sonchus oleraceus</i> Shih	
14	茼蒿	<i>Chrysanthemum coronarium</i> Linn.	
15	油麦菜	<i>Lactuca sativa</i> Linn. var. <i>angustata</i> Irish ex Bremer	
16	芫荽	<i>Coriandrum sativum</i> Linn.	藜科
17	西芹	<i>Apium graveolens</i> Linn. var. <i>dulce</i> DC.	
18	黄心芹菜	<i>Apium graveolens</i> Linn.	
19	白尖叶苋菜	<i>Amaranthus albus</i> Linn.	
20	柳叶空心菜	<i>Ipomoea aquatica</i> Forsskal	
21	菠菜	<i>Spinacia oleracea</i> Linn.	

1.4 计算公式

生长抑制率/%=[铅对照生物量(T₀)-铅处理生物量(T₁或T₂)]/铅对照生物量(T₀)×100%

转运系数(TF)=植物地上部分铅含量/地下部分铅含量^[12](以鲜重计)

1.5 统计分析方法

采用 SPSS10.0 和 Excel 统计分析软件进行有关数据的计算统计。不同铅含量间的差异显著性分析采用 LSD 法。聚类分析应用 SPSS 软件分层聚类分析子模块,聚类法采用组间连接法,测度方法选择欧氏距离平方和。

2 结果与分析

2.1 铅胁迫对叶菜生物量的影响

为了避免叶菜种类间生物量差异大的影响,本文引用生长抑制率(图 1)比较铅对各叶菜生物量影响的差异。铅胁迫对叶菜生长有促有抑(正值表示抑制,负值表示促进)。21 种叶菜中,66.7%叶菜生长受铅抑制,且随土壤铅含量的增加抑制率变大。T₁ 和 T₂ 胁迫下分别有 19%和 24%的叶菜生物量增加,但是仅有 3 号和 15 号叶菜在 2 个铅含量下均增产。T₁、T₂ 最大抑制率分别为 47.0%(1)和 83.5%(13)。T₁ 和 T₂ 各叶菜抑制率平均值分别是 12.2%、26.1%,T₂ 抑制率是 T₁ 的 2 倍。

2.2 各叶菜地上部和地下部铅含量

供试叶菜地上部和地下部的铅含量及其品种间差异如表 2 所示。各器官的含铅量为地上部<地下部,地下部铅含量是地上部的 7 倍以上,说明铅是“粘性”金属,在植物体内迁移慢。从平均值可知,叶菜地上部和地下部的铅含量都随土壤铅含量的增加而增加,而且在 $P<0.05$ 水平上具有显著差异。地上部 T₁、T₂ 分别是 T₀ 的 4.1、8.5 倍,地下部 T₁、T₂ 分别是 T₀ 的 10.1、

24.1 倍。从 T₁ 到 T₂,地上部、地下部铅含量都呈倍数增加。地上部铅含量变异系数比地下部大,而且地上部和地下部都是低浓度比高浓度变异系数大,即随土壤铅含量的增加,各叶菜铅吸收的差异变小。

根据国家规定的卫生标准($\leq 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20],在对照土壤中,所有叶菜地上部铅含量均在标准以内,T₁ 有 11 种叶菜超标,占有供试叶菜的 52%,T₂ 仅有 3 个叶菜在标准以内,超标率达 86%。说明在人为二级及以上铅污染土壤中种植叶菜风险很大。

2.3 铅胁迫下地上部与地下部铅含量的相关性

铅胁迫下,地上部与地下部铅含量相关性见图 2。在 T₀ 处理下,地上部与地下部铅含量无相关性($P>0.05$);在 T₁ 胁迫下,两者呈显著正相关($P<0.05$);在 T₂ 胁迫下(除 20 号以外),地上部与地下部也呈显著正相关($P<0.05$)。

从图 3 可知,T₀ 的转运系数范围 0.00~1.76,远比 T₁(0.03~0.26)和 T₂(0.02~0.30)变幅大,说明在 T₀ 条件下各叶菜从地下向地上转运铅的能力差异较大,这与 T₀ 相关分析符合。大部分叶菜 T₀ 条件下转运系数都比 T₁、T₂ 高,T₁ 和 T₂ 的转运系数相近。20 号各个铅含量下的转运系数都比其他菜高,是铅容易向地上部转移的特殊叶菜,应避免在污染农田种植。

2.4 各科叶菜的铅吸收差异比较

以表 1 中十字花科、菊科和伞形科的各叶菜为组别,对地上部、地下部铅含量进行科别的方差分析(表 3)。从平均值比较可知,地上部十字花科、菊科、伞形科之间差异显著($P<0.05$),地上部铅含量表现为十字花科<菊科<伞形科,3 科地下部铅含量间无显著差异($P>0.05$)。就地上铅含量差异而言,T₀ 条件下十字花科叶菜显著小于菊科,T₁ 条件下 3 科叶菜无显著差异,而 T₂ 条件下伞形科显著高于十字花科。十字花科叶菜在 3 个铅水平下均吸铅最少,菊科与伞形科差异

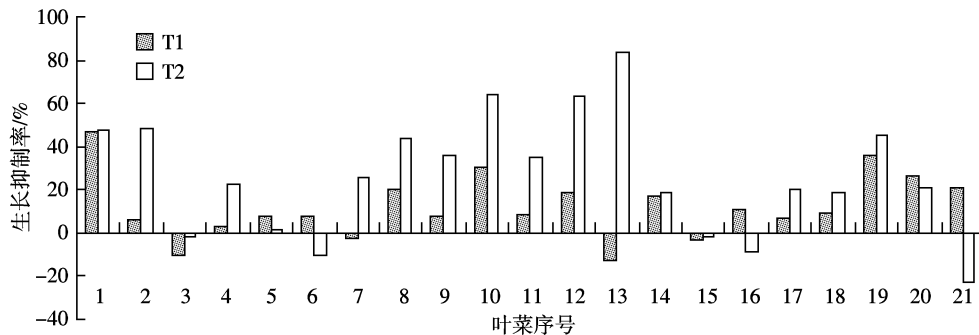


图 1 各叶菜地上部生长抑制率

Figure 1 Inhibition rate of vegetables shoot growth

表 2 供试叶菜地上部和地下部铅含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 The Pb concentrations in shoots and roots of vegetables(mg·kg⁻¹)

叶菜序号	地上部			地下部		
	T0	T1	T2	T0	T1	T2
1	0.02±0.02* kl	0.42±0.08 bc	0.69±0.28 def	2.1±1.9 b	5.9±5.2 bcdef	12.7±0.76 bc
2	0.01±0.01 l	0.41±0.04 bcd	0.53±0.08 efg	1.0±0.3 cd	10.8±3.0 a	12.2±0.9 bc
3	0.06±0.03 ghij	0.21±0.10 fg	0.74±0.38 de	0.2±0.1 cd	3.4±0.8 fghi	12.3±2.3 bc
4	0.02±0.01 l	0.46±0.07 bc	0.71±0.41 def	3.6±1.4 a	9.0±4.0 a	14.9±1.2 bc
5	0.12±0.01 cd	0.13±0.01 ghi	0.29±0.05 gh	0.2±0.1 cd	4.3±1.1 defghi	9.1±1.6 bc
6	0.09±0.01 efg	0.10±0.01 hi	0.23±0.05 h	0.1±0.0 d	1.8±0.4 i	6.0±0.9 c
7	0.02±0.01 kl	0.34±0.02 de	0.43±0.05 fgh	1.1±1.1 c	5.3±0.4 cdefg	11.3±2.0 bc
8	0.04±0.01 jkl	0.34±0.02 de	0.48±0.09 efgh	0.8±0.3 cd	7.5±0.6 bc	12.4±1.7 bc
9	0.07±0.01 fghi	0.10±0.02 i	0.11±0.02 h	0.2±0.0 cd	3.1±0.1 ghi	6.5±1.1 c
10	0.05±0.02 hij	0.24±0.03 ef	0.47±0.14 efgh	0.2±0.1 cd	7.3±3.2 bcde	10.2±7.0 a
11	0.07±0.02 ghi	0.24±0.05 ef	0.52±0.06 efg	0.1±0.0 d	5.5±0.6 cdefgh	7.2±8.4 bc
12	0.10±0.03 de	0.26±0.05 ef	0.54±0.10 efg	0.2±0.1 cd	7.7±3.2 bcd	17.5±6.2 bc
13	0.09±0.02 ef	0.36±0.08 cd	0.95±0.33 cd	0.2±0.1 cd	4.9±0.6 cdefgh	10.6±5.8 abc
14	0.08±0.01 efg	0.34±0.11 de	0.72±0.10 de	0.4±0.3 cd	5.5±1.3 cdefg	25.5±6.0 ab
15	0.13±0.01 c	0.28±0.02 ef	0.59±0.11 ef	0.2±0.0 cd	4.0±0.3 efghi	10.2±1.7 bc
16	0.12±0.01 cd	0.70±0.12 a	1.03±0.05 bc	0.4±0.1 cd	9.2±.36 ab	19.3±1.8 abc
17	0.06±0.00 ghij	0.21±0.07 fg	0.74±0.14 de	0.2±0.0 cd	5.9±0.7 cdefg	14.4±2.4 bc
18	0.08±0.01 fgh	0.38±0.12 cd	1.27±0.19 ab	0.3±0.0 cd	4.8±0.5 cdefghi	13.6±1.7 bc
19	0.05±0.01 ijk	0.69±0.14 a	1.11±0.13 ab	0.5±0.0 cd	7.7±0.9 b	16.7±5.5 bc
20	0.17±0.02 b	0.50±0.07 b	1.39±0.47 a	0.1±0.0 d	2.0±0.5 hi	4.6±0.8 c
21	0.20±0.01 a	0.19±0.02 fgh	0.59±0.07 ef	0.4±0.1 cd	6.2±3.1 bcdefg	13.7±2.1 bc
Mean	0.079 a	0.328 b	0.672 c	0.60 a	6.05 b	14.46 c
C.V.%	61.8	51.6	49.9	50.8	44.4	49.1
Range	0.01~0.20	0.10~0.70	0.11~1.39	0.10~0.54	1.82~11.64	4.65~36.42

注:同列数据后不同英文字母表示根据 LSD 差异显著性检验在 $P=0.05$ 水平上有显著差异。* 为平均值±标准差(以下相同)。

不显著。

2.5 各叶菜聚类分析

根据叶菜 T1 和 T2 处理下的地上部铅含量和地上部生长抑制率进行聚类分析, 将供试叶菜分为 4 类, 见表 4。Ⅰ类是铅积累少, 生长抑制低的叶菜; Ⅱ类是铅富集较多, 生物量也比Ⅰ类下降多; Ⅲ类是铅富集较多的一类叶菜; Ⅳ类是独特的一个类群, 铅富集比Ⅱ类稍高一点, 但是生长是明显的低浓度促进, 高浓度抑制, 而且效果显著。供试十字花科叶菜主要集中在Ⅰ类和Ⅱ类, 供试菊科叶菜主要集中在Ⅱ类, 供试伞形科叶菜主要集中在Ⅲ类, 这一结论与上述科间比较结果相符。

3 结论与讨论

铅胁迫对叶菜生长大部分表现抑制作用, 但也有少数表现促进作用。叶菜地上部铅含量小于地下部铅含量, 且随土壤铅含量的增加, 叶菜地上部、地下部铅

含量显著增加($P<0.05$), 在 T1、T2 铅处理下植株地上部与地下部铅含量均呈显著正相关($P<0.05$)。叶菜不同科间地上部铅含量差异显著($P<0.05$), 地下部差异未达显著水平($P>0.05$)。综合叶菜地上部铅含量和生物量抑制率得出: 矮脚 80 天特青菜心、碧绿粗苔菜心、竹芥菜和菠菜这 4 种叶菜生物量降低少、铅吸收少, 是铅中轻度污染土壤中种植安全系数较高的菜种。

各科叶菜地上部铅含量表现为十字花科<菊科<伞形科。不同类型叶菜铅吸收差异可能与其根系的分泌特性和根系本身的差异有关^[21]。房江育^[22]提出木质化组织中对铅的络合多于非木质化组织, 铅在植物不同组织中的分配也与植物物种有关。本试验的叶菜根组织中, 十字花科叶菜根木质化较严重, 而菊科和伞形科叶菜的根较多且偏肉质, 可能是这一组织差异使地上部铅吸收不同, 其内在机理还有待进一步研究。

各叶菜中重金属的含量都随着土壤铅含量的增加而增加, 但各叶菜的生长并未都表现随土壤铅含量

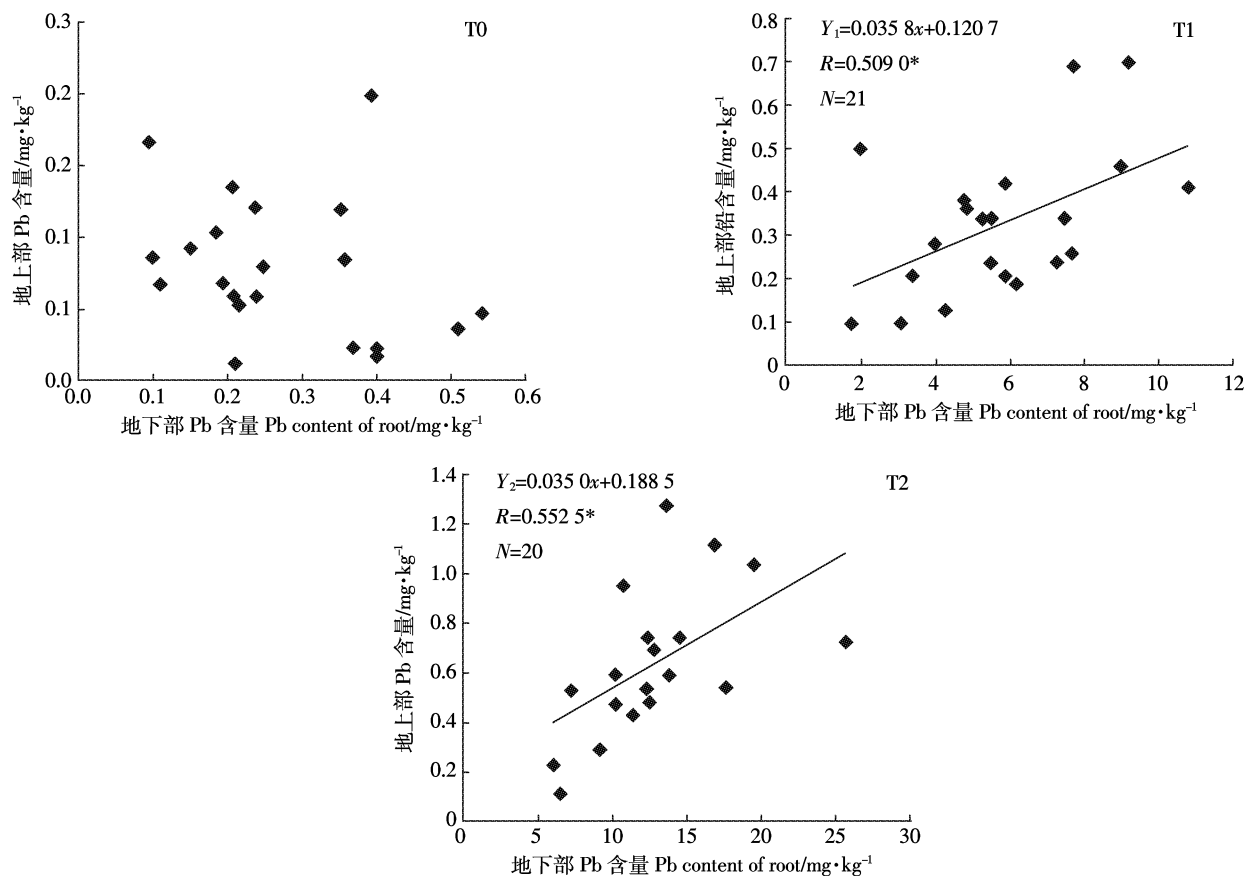


图2 铅胁迫下地上部与地下部铅含量的相关性(T2 除 20 号)

Figure 2 Correlation of Pb content between shoot and root under Pb treatment

的增加而抑制作用加强。通过相关分析可知,9 种叶菜的地上部生物量与地上铅含量存在显著负相关性 ($N=11$):生菜 (-0.825^{**})、花芽甜麦菜 (-0.640^*)、茼蒿 (-0.610^*)、白苋菜 (-0.773^*)、西芹 (-0.604^*)、60 d 菜心 (-0.631^*)、水东芥菜 (-0.714^*)、芥兰 (-0.653^*)。其余叶菜不存在相关性,说明铅对植物的生长响应与体内铅含量的影响因种类而不同。Baker 认为植物对重金属抗性的获得可通过两种途径,避(御)性

(avoidance)和耐性(tolerance),即抗性=避性+耐性。一些植物可通过某种外部机制保护自己,使其不吸收环境中高含量的重金属从而免受毒害,称之为避性。在这种情况下,植物体内重金属的浓度并不高。耐性是指植物体内具有某些特定的生理机制,使植物能生存于高含量的重金属环境中而不受伤害,此时植物体内具有较高浓度的重金属^[25-26]。

大多学者以铅积累量比较作物基因型或种类的

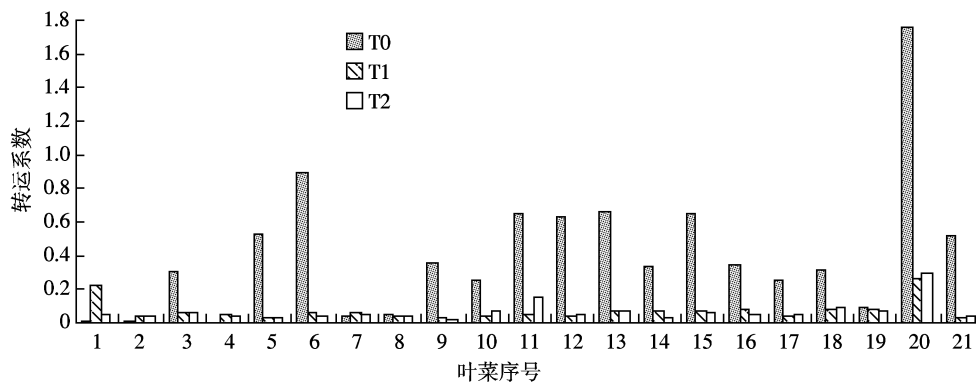


图3 各叶菜 T0、T1、T2 的转运系数

Figure 3 Vegetables translocation factor under T0, T1 and T2

表 3 各科叶菜地上部、地下部铅含量比较(mg·kg⁻¹)

Table 3 Pb concentration comparison of shoot and root among different vegetable families(mg·kg⁻¹)

项目	地上部			地下部		
	十字花科(N=11)	菊科(N=4)	伞形科(N=3)	十字花科(N=11)	菊科(N=4)	伞形科(N=3)
T0	0.05±0.01b	0.10±0.01a	0.08±0.02ab	1.03±0.39a	0.25±0.05b	0.30±0.06b
T1	0.27±0.04a	0.31±0.02a	0.43±0.14a	5.68±0.98a	5.53±0.79a	6.63±1.32a
T2	0.49±0.06b	0.68±0.10ab	1.01±0.15a	10.82±1.00a	15.95±3.60a	15.77±1.78a
Mean	0.27±0.02c	0.37±0.028b	0.51±0.45a	5.84±0.91a	7.24±2.26a	7.57±2.33a

注:同一行数据后不同英文字母表示不同科叶菜在 $P=0.05$ 水平上显著差异。

表 4 各叶菜地上部铅含量和地上部单株生物量抑制率综合聚类分析结果

Table 4 Cluster analysis based on Pb content and biomass of vegetables shoots

类别	叶菜序号	铅含量/mg·kg ⁻¹ FW		生长抑制率/%	
		T1	T2	T1	T2
I	5、6、9、21	0.10~0.19(0.13)	0.11~0.59(0.31)	8%~21%(11%)	-23%~36%(1%)
II	1、2、3、4、7、8、10、11、12、14、15、17	0.21~0.46(0.31)	0.43~0.74(0.60)	-10%~47%(12%)	-2%~64%(32%)
III	16、18、19、20	0.38~0.70(0.57)	1.03~1.39(1.20)	9%~36%(21%)	-9%~45%(19%)
IV	13	0.36	0.95	-77%	81%

注:括号中数据表示同组别叶菜铅含量或生长抑制率的平均值。

差异^[15,23],忽略了铅对作物生长的影响。Aneta^[24]提出将不同蔬菜对重金属反映差异分为两种不同类型,将蔬菜按照作物效应(减产 10%)得出的土壤铅临界值大于按照食品卫生标准(0.2 mg·kg⁻¹)得出的土壤临界值称积累型或影响残留型,反之称为敏感型或影响产量型。由于 Aneta 的这种方法需得出蔬菜作物效应与土壤铅、蔬菜铅含量与土壤铅之间的相关方程才能计算,比较麻烦。本试验以铅积累量和生长抑制率进行聚类分析,把叶菜分为 4 类,从分析结果可以看出这种分类方法符合铅积累的差异分类,同时兼顾了铅对作物生长的影响,为选择代表作物进行避性/耐性等机理研究^[25]提供依据。王松良综合考察茎叶重金属含量、生物累积指数、耐性指数、生理生化指标、分子标记,筛选到 Cd 高耐性、茎叶低 Cd 累积的小白菜基因型 D 和 Cd 高耐性、茎叶高累积小白菜基因型 K^[27]。因此,如果要更明晰地辨别各叶菜的铅抗性^[25],还需进一步从生理生化等方面深入研究比较。

参考文献:

[1] Wang Y M, Chen T C, Yeh K J, et al. Stabilization of an elevated heavy metal contaminate site[J]. *J Haz Matter*, 2001, 88: 63-74.

[2] Walker C H, Hopkin S P, Sibly R M, et al. Principles of ecotoxicology [R]. Bristol: Taylor and Francis, PA, 1996: 321.

[3] 厉有名, 姜玲玲. 铅中毒病理生理机制的若干研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2001, 8(9): 8-11.

LI You-ming, JIANG Ling-ling. Research advances on pathology and physiology mechanism of lead poisoning [J]. *Guangdong Trace Elements*

Science, 2001, 8(9): 8-11.

[4] 周泳, 涂从, 青长乐. 铅在紫色土-水稻体系中的植物效应及形态[J]. 农村生态环境, 1993, 2: 54-57.

ZHOU Yong, TU Cong, QING Chang-le. Study on forms of Pb in purple soil-rice plant system and plant response[J]. *Rural Eco-Environment*, 1993, 2: 54-57.

[5] 周海红, 张志杰, 王士龙. 重金属在农田生态系统中迁移的建模研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 315-318.

ZHOU Hai-hong, ZHANG Zhi-jie, WANG Shi-long. Transfer model of heavy metals in agro-ecosystem[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(5): 315-318.

[6] 刘翀. 我国蔬菜重金属污染现状及对策[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(12): 73-75.

LIU Chong. Current status and prevented measures of heavy metal pollution of vegetable[J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 2009, 15(12): 73-75.

[7] 师小平. 佛山市蔬菜中若干重金属元素含量调查与分析[J]. 广东微量元素科学, 2006, 13(7): 44-47.

SHI Xiao-ping. Survey and analysis on the content of heavy metal elements in vegetables of Foshan[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2006, 13(7): 44-47.

[8] 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.

HU Di-qin. Soil and crop evaluation of lead pollution in Guangzhou suburbs[J]. *Ecologic Science*, 1997, 16(1): 71-74.

[9] 张勇. 沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J]. 土壤通报, 2001, 32(4): 182-186.

ZHANG Yong. Heavy metal pollution of soil and agricultural products in Shenyang suburbs: Current situation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(4): 182-186.

[10] 刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重

- 金属污染及风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5):60–63.
- LIU Hong-lian, LI Yan-hui, LI Lian-qing, et al. Pollution and risk evaluation of heavy metals in soil and agro-products from an area in the Tai-hu Lake region[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5): 60–63.
- [11] Wang L X, Guo Zh H, Xiao X Y, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and downstream of the Xiangjiang River, Hunan Province[J]. *J Geogr Sci*, 2008, 18:353–362.
- [12] 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, 2007.
- WANG Dong-qing. Inter-and intra-cultivar variations of Cd accumulation in *Brassica napus* L. [D]. Guangzhou:Sun Yat-sen University, 2007.
- [13] 吴 晓, 熊治廷, 马晓敏. 12 种蔬菜作物对铅、铜、镉抗性的研究[J]. 武汉大学学报(理学版), 2005, 51(s2):291–293.
- WU Xiao, XIONG Zhi-ting, MA Xiao-min. Resistance study of Pb, Cu, Cd on twelve species vegetables[J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2005, 51(s2):291–293.
- [14] 柯文山, 陈建军, 黄邦全, 等. 十字花科芸薹属 5 种植物对 Pb 的吸收和富集[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2004, 26(3):236–238.
- KE Wen-shan, CHEN Jian-jun, HUANG Bang-quan, et al. Uptake and accumulation of lead by five plants from colewort of Cruciferae[J]. *Journal of Hubei University(Natural Science Edition)*, 2004, 26(3): 236–238.
- [15] 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.
- LIU Jian-guo, LI Kun-quan, ZHANG Zu-jian, et al. Difference of lead uptake and distribution in rice cultivars and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2):291–294.
- [16] 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.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Variety difference of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.)[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):63–67.
- [17] 王松良, 郑金贵. 13 种小白菜基因型对 Cd、Pb、As 累积特性比较[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2005, 34(3):304–308.
- WANG Song-liang, ZHENG Jin-gui. Differential accumulation of cadmium, lead and arsenic among 13 cabbage (*Brassica chinensis*) genotypes in hydroponics culture[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2005, 34(3):304–308.
- [18] GB 15618—1995, 土壤环境质量标准[S].
- GB 15618—1995, Environmental quality standard for soils[S].
- [19] GB/T 5009.12—2003, 食品中铅的测定[S].
- GB/T 5009.12—2003, Determination of lead in foods[S].
- [20] GB 2762—2005, 食品中污染物限量[S].
- GB 2762—2005, Maximum levels of contaminants in foods[S].
- [21] 陈志德, 仲维功, 杨 杰, 等. 低铅污染条件下不同类型水稻品种对铅的响应[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(4):261–266.
- CHEN Zhi-de, ZHONG Wei-gong, YANG Jie, et al. Responses of rice cultivars to low-level Pb pollution[J]. *Jiangsu J of Agr Sci*, 2007, 23(4):261–266.
- [22] 房江育. 植物抗铅机理进展[J]. 黄山学院学报, 2008, 10(3):55–58.
- FANG Jiang-yu. Review on mechanism of lead resistance in plants[J]. *Journal of Huangshan University*, 2008, 10(3):55–58.
- [23] 李德明, 朱祝军, 钱琼秋. 白菜镉积累基因型差异研究 [J]. 园艺学报, 2004, 31(1):97–98.
- LI De-ming, ZHU Zhu-jun, QIAN Qiong-qiu. Investigation of genotypic difference of cadmium contents in shoots of *Brassica campestris* ssp. *chinensis*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(1):97–98.
- [24] Aneta Piechalak, Barbara Tomaszewska, Danuta Baralkiewicz, et al. Accumulation and detoxification of lead ions in legumes[J]. *Phytochemistry*, 2002(60):153–162.
- [25] Baker A J M. Metal tolerance[J]. *Newphytologist*, 1987, 106:93–111.
- [26] 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.
- JIANG Xing-yu, ZHAO Ke-fu. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants[J]. *Chinese Journal of Application and Environment Biology*, 2001, 7(1):92–99.
- [27] 王松良. 芸苔属蔬菜重金属累积特性及抗 Cd 基因的差异表达与克隆[D]. 福州:福建农林大学, 2004.
- WANG Song-liang. Characterization of heavy metal accumulation of Brassicea vegetable genus and mRNA differential display and cloning of Cd resistance gene[D]. Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University, 2004.