

模拟铅胁迫下玉米不同基因型生长与铅积累及各器官间分配规律

李月芳¹, 刘 领^{1,2}, 陈 欣¹, 胡亮亮¹, 唐建军¹

(1.浙江大学生命科学学院农业生态与工程研究所, 杭州 310058; 2.河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要:我国遭受重金属污染的土地中有 87%左右是中轻度污染土壤类型,深入研究不同植物对重金属的吸收和转运积累规律,是科学利用植物和土壤资源的重要基础工作。通过玻璃网室盆栽模拟污染的手段,研究了玉米 6 种基因型在铅中度污染胁迫(800 mg·kg⁻¹)与轻度污染胁迫(400 mg·kg⁻¹)下的植株生长、铅吸收积累及其在玉米不同器官间分配的规律。结果表明,不同铅污染胁迫下,玉米不同基因型的生长及铅吸收量达到极显著差异($P<0.01$),铅在不同器官之间的分布形式也存在显著的基因型差异。轻度铅污染胁迫不同程度地促进玉米所有供试基因型的生长,而中度污染胁迫下糯玉米基因型生物量最大。与正常土壤对照条件下的表现相比,不同程度铅污染胁迫下基因型申甜 1 号的生物量增幅最大,表现出较强的铅耐受能力。不同基因型的玉米体内铅积累量随着污染水平的提高而增加,各器官内铅积累浓度差异规律为根>叶>茎>穗。掖单 13 号具有较强的铅转运能力($TF=0.6628$),申甜 1 号的生物富集能力最强($BCF=0.0264$),掖单 13 号和申甜 1 号均具有较强的铅吸收和积累能力,属于潜在的高积累基因型。但掖单 13 号根部富集量少而穗部积累多,申甜 1 号根中铅积累较多而果穗中较少。2 个甜玉米基因型果穗内铅积累量较少,其含量符合国家规定的食品生产相应的安全标准。

关键词:玉米;基因型;铅污染;积累;器官间分配

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2260-08

Plant Growth, Lead Uptake and Partitioning of Maize(*Zea mays* L.) Under Simulated Mild/ Moderate Lead Pollution Stress

LI Yue-fang¹, LIU Ling^{1,2}, CHEN Xin¹, HU Liang-liang¹, TANG Jian-jun¹

(1.Institute of Agroecology and Eco-engineering, College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2.College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Mild/moderately polluted soil accounts for about 87 percent of all heavy metal contaminated soil area in China. To a better utilization of these mild/moderately polluted soil, the most important approach might include phytoremediation which was based on deep understanding of the uptake, translocation and partitioning of heavy metal in various plants and genotypes. The experiment was conducted to compare the crop growth, lead uptake and partitioning of six genotypes of maize (*Zea mays* L.) under artificial simulating moderate (800 mg·kg⁻¹ Pb), mild (400 mg·kg⁻¹ Pb) and no-pollutant-addition conditions in greenhouse. The results showed that significant difference ($P<0.01$) in plant growth, lead absorption and partitioning of absorbed lead were found among six different genotypes of maize under both moderate and mild lead pollution stress. Under mild lead pollution (Pb400), the growth of all maize genotypes tested were significantly promoted. The waxy genotypes among the six genotyped showed the biggest biomass at moderate pollution level (Pb800). Compared to the no-addition control, Shentian-1 showed a significant increase in biomass, implying its strong tolerance to lead contamination stress. The lead accumulated in maize increased along with lead pollution stress. Lead accumulated in various organs of maize showed as: root>leaf>culm>ear. The Genotypes Yedan-13 and Shentian-1 performed higher lead uptake capacity with different partitioning characteristics that Yedan No.-13 accumulated more lead in its edible part while Shentian-1 accumulated most of absorbed lead in its belowground part than that in ear. Yedan-13 had a

收稿日期:2010-06-25

基金项目:国家自然科学基金(30970477);浙江省自然科学基金(Y307418);浙江省科技厅优先主题社会发展重点项目(2007C13063);浙江省科学技术协会国际合作项目(ZAST200401);浙江省教育厅科研计划项目(Y200805536)

作者简介:李月芳(1986—),女,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为土壤重金属污染生物修复

通讯作者:唐建军 E-mail:chandt@zju.edu.cn

lead transportation factor(TF) of 0.662 8, while Shentian-1 had a lead bioconcentration factor(BCF) of 0.026 4. These indicated that both genotypes have higher uptake and accumulating ability, implying that those two genotypes of maize could be potentially used as high accumulating plants for lead-contaminated soil restoration. The lead concentration in edible part of two sweet baby corn genotypes (cv. Jinzhumichaotian and cv. Shentian No.1) was within the limitation of state's food safety requirements.

Keywords: maize(*Zea mays* L.); genotype; simulated lead contamination; lead uptake; intraorganic partition

土壤重金属污染会导致农作物生长受阻、产量降低、品质下降,并且通过食物链影响人体健康^[1-3]。据农业部污灌区调查结果,在约 140 万 hm² 的污水灌溉区中,遭受重金属污染的土地面积占污水灌溉区面积的 64.8%,其中 87.04%为中、轻度污染土壤类型,严重污染的仅占 12.96%,其中 Pb、Cd、Hg、Cu 及其复合污染尤为明显^[4]。因此,如何有效治理和利用这些受到中、轻度重金属污染的土地是有效耕地不断减少的今天实现人类社会可持续发展的不可回避的现实问题和重要发展战略。

植物修复是土壤重金属污染生物修复的重要途径。植物修复的主要途径之一是利用超积累植物来提取、挥发和固定土壤中的污染物^[4]。但在许多情况下,超积累植物因其生长缓慢、生物量低,在短期内修复的效果不是很理想,应用前景受到限制,而基于植物元素吸收与分配机理发展起来的、以降低重金属在农作物可食部分积累为主要目标的生物学控制技术,运用与超积累植物相反的、对重金属排异的植物(低积累植物)或建立降低作物吸收和积累土壤重金属的种植体系,在污染的土壤上作物产品安全的生产模式日益受到重视,通过挖掘作物自身的遗传潜力,选择对污染物低吸收、低积累的作物品种将是建立作物产品安全生产体系的重要途径^[5-11]。

植物对元素过量、缺素或者其他逆境胁迫的耐性存在着广泛的物种间及基因型间差异^[12-14]。有报道指出,水稻^[15]、白菜^[16]、烟草^[17]、玉米^[18]等植物 Pb 积累特征存在显著差异,不同杂草种类对铅元素的积累也有很大差异^[19-21]。菌根真菌、种间关系等生态因素对宿主植物的耐铅能力和铅胁迫下的生理响应(包括铅的摄入与转运等)也有很大的影响^[22-25]。有关玉米不同品种对铅胁迫的响应、吸收积累规律及玉米耐性机制的研究报道较多^[26-29]。然而,人工模拟轻度及中度铅胁迫下,几种重要玉米基因型(高蛋白基因型、糯性基因型

以及鲜食类基因型)的生长表现及生产安全性的比较性研究,尚未见详尽报道。本实验采用温室大棚盆栽模拟铅污染胁迫的方式,研究玉米 6 种基因型在中、轻度污染条件下生长和摄取积累铅的情况,期望筛选出可用于植物修复的高铅积累基因型及用于籽粒(或鲜食)安全生产的低铅积累基因型。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究于 2008 年 8—10 月在浙江大学紫金港校区农业生命环境学部生命科学学院(30°17'52"N, 120°5'20"E)网室大棚里进行。采用玉米 6 个不同的基因型(包括掖单 13 号和郑单 958 两种高蛋白基因型,苏玉糯和沪玉糯 2 号两种糯性基因型,金珠蜜超甜和申甜 1 号两种鲜食甜玉米基因型,分别以基因型 1、基因型 2、基因型 3、基因型 4、基因型 5、基因型 6 表示)作为实验材料进行盆栽实验。种子购于浙江省种子公司,实验用土取自于浙江杭州市郊区水稻田,无重金属和有机污染物的污染,土壤基本性状见表 1。土样经风干后研磨,过 2 mm 筛。通过人工施加醋酸铅[(CH₃COO)₂Pb],设 3 种铅污染胁迫强度:对照土壤 Pb0(不添加醋酸铅,实际总铅背景值 30.72 mg·kg⁻¹,作为正常土壤对照 Control),Pb400(实际总铅含量为 442.37 mg·kg⁻¹,模拟轻度污染胁迫)、Pb800(实际总铅含量 846.85 mg·kg⁻¹,模拟中度污染胁迫)。

1.2 实验设计

实验所在网室上有玻璃顶棚,空高 8 m 左右,四侧铁丝网通风无阻、鸟兽不进、雨水不淋。周转箱规格长×宽×高为 42 cm×32 cm×16 cm,每盆装 20 kg 土,土样装入周转箱中平衡 30 d 后进行实验。周转箱置于铺有塑料薄膜的土壤上,每盆栽种同一基因型玉米 6 株。设置 3 种铅污染胁迫水平(Pb0、Pb400、Pb800),

表 1 供试土壤基本性状

Table 1 The main fertility characteristics of the soil used in the experiment

土壤性状 Properties	pH 值 pH value	土壤有机质 Soil organic matter/g·kg ⁻¹	总氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	速效磷 Available phosphorus/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available potassium/mg·kg ⁻¹	Pb 背景含量 Lead background/mg·kg ⁻¹
测定值 Data	5.918	38.601 9	2.49	98.03	264.72	30.72

每种铅胁迫水平设置 3 个重复,6 个基因型 3 个浓度 3 次重复共 54 盆,完全随机排列。栽培期间用自来水浇灌,使土壤保持 70%含水量。种植 70 d 后收获,将玉米按照根、茎、叶、果穗分开收样。

1.3 测定方法

植物根样用清水洗净,再用去离子水漂洗干净。植物样品先在 120 ℃下杀青 20 min, 再在 75 ℃下烘至恒重,干燥器中冷却后分别测其各部分干重。用不锈钢粉碎机将植物样品粉碎,每份样品称取 4 g 用马弗炉在 600 ℃条件下灰化 6 h,用 50%的硝酸消化,最终定容到 50 mL 容量瓶内。用原子吸收分光光度计 AA-670(岛津公司生产)测其 Pb 含量。

1.4 数据处理

通过以下公式计算不同基因型玉米的铅元素富集系数(BCF)及转运系数(TF)。BCF=玉米体内的铅浓度/土壤中铅浓度^[30];TF=玉米地上部分的铅浓度/玉米地下部分的铅浓度^[31]。不同铅胁迫下各基因型玉米的生物量、体内各组分铅含量及富集系数、转运系数均采用 SPSS 16.0 处理系统进行 One-way-ANOVA 分析和 *F* 检验。图件由 Origin 8.0 软件制成。

2 实验结果与分析

2.1 铅胁迫对不同基因型玉米生物量的影响

铅存在水平对玉米的生物量存在显著影响。与正常土壤(Pb0)相比,轻度铅污染胁迫(Pb400)可不同程度地促进玉米 6 个基因型的植物生长,促进效应达到极显著水平($P<0.01$),基因型 1 至 6 的总生物量分别增加了 27.7%、21.5%、99.8%、33.8%、83.5%、

280.1%,其中基因型 6(申甜 1 号)的促进效果最明显(见图 1)。中度铅污染胁迫下(Pb800),基因型响应存在较大差异,基因型 2(郑单 958)和基因型 5(金珠蜜超甜)出现生长轻度受阻现象,但没有达到统计显著水平($P>0.05$),其他玉米基因型生长表现相对于其在对照条件,总生物量均有增加,但略低于轻度污染胁迫下的生长表现,其中基因型 1(掖单 13 号)增加了 18.1%,基因型 3(苏玉糯)增加了 64.8%,基因型 4(沪玉糯 2 号)增加了 18.9%,基因型 6 增加 105.6%。

2.2 铅胁迫对不同基因型玉米各器官内重金属铅含量的影响

实验结果显示,玉米体内各器官内的铅含量按高低排列依次为根>叶>茎>穗。玉米体内的铅含量随着土壤污染水平的增强相应增加。

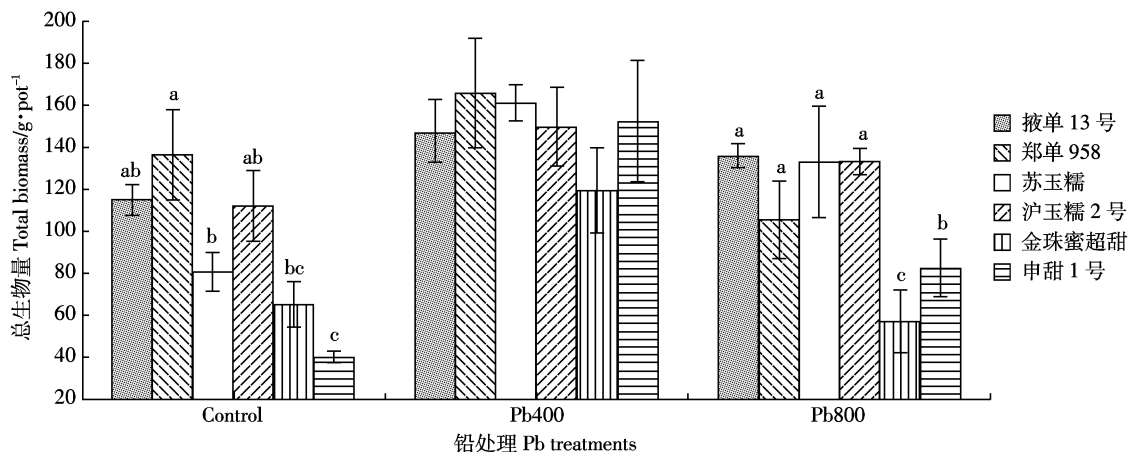
2.2.1 根

由表 2 可知,玉米不同基因型根内铅含量在不同污染程度的差异达显著水平。对照土壤下,基因型 6 的根部铅含量最低,基因型 4 的最高。在 Pb400 和 Pb800 情况下,基因型 6 在所有基因型中最高,是 Pb0 条件下的 44.7 倍和 90.3 倍;其次为基因型 3,分别是 Pb0 下的 17 倍和 38 倍。不同基因型在不同铅胁迫下的铅吸收量和响应型式(responding pattern)存在着很大的差异。

2.2.2 茎

经方差分析得知,玉米茎杆内的铅含量随着土壤内铅污染的不同处理水平差异显著。但是不同基因型间含量差异不显著。

由表 2 中可以得出,对照土壤(Pb0)情况下,玉米



不同字母表示同一胁迫条件下各基因型玉米间的差异达显著水平($P<0.05$)

Different letters marked at the bars indicates significant difference at 0.05 level

图 1 不同基因型玉米在各种加铅处理下的总生物量表现

Figure 1 Dry matter weight of different genotypes of maize under various Pb stress level

表 2 玉米不同基因型体内各部位的铅含量

Table 2 Lead content in different organs of various genotypes of *Zea mays*

土壤污染程度 Pollution level	基因型编号 Genotype number	玉米根内铅含量 Pb in the root/mg·kg ⁻¹	玉米茎内铅含量 Pb in the stem/mg·kg ⁻¹	玉米叶内铅含量 Pb in the leaf/mg·kg ⁻¹	玉米穗内铅含量 Pb in the ear/mg·kg ⁻¹
Control without Pb addition(Pb0)	1	4.44±0.44ab	<0.01	2.94±0.56a	<0.01
	2	4.64±1.05ab	<0.01	1.55±0.09b	<0.01
	3	3.31±0.75b	<0.01	3.28±0.35a	<0.01
	4	5.41±0.46a	<0.01	1.91±0.33b	<0.01
	5	4.01±0.31ab	<0.01	<0.01c	<0.01
	6	1.86±0.98c	<0.01	<0.01c	<0.01
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	36.933**		63.622**	
Mild stress(Pb400)	1	6.80±1.69c	4.40±0.28a	4.60±0.30ab	3.25±0.71a
	2	29.81±9.30bc	1.76±0.55bc	3.52±0.44b	1.58±0.52b
	3	56.15±5.22b	2.55±0.50b	2.52±0.67b	1.04±0.20b
	4	42.80±17.73b	0.76±0.66c	0.95±0.45c	<0.01c
	5	44.26±6.66b	<0.01c	4.31±0.67ab	<0.01c
	6	83.15±9.22a	3.46±1.20ab	5.67±0.59a	<0.01c
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	27.162**	19.565**	29.187**	37.331**
Moderate stress(Pb800)	1	64.95±11.13c	5.57±0.47a	15.89±4.00a	2.80±0.60a
	2	104.49±29.66b	3.75±2.09a	9.19±2.35ab	1.91±0.69ab
	3	125.63±16.52ab	6.31±1.32a	6.21±1.80b	2.12±1.68ab
	4	98.45±10.35b	5.48±1.49a	5.77±1.13b	<0.01b
	5	106.94±23.83b	8.00±2.49a	11.39±3.81ab	<0.01b
	6	167.89±10.95a	6.27±3.15a	13.45±4.35ab	<0.01b
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	2.495	1.405	4.888*	8.073**

注:表内的数据是由 3 个重复得出的平均值与标准误,字母表示同一污染水平下其基因型间差异情况。* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

Note: Data in the table is the average and standard error derived from three replicates. The different letter means significant difference at 0.05 level between different genotypes under the same pollution level. * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$.

各基因型茎内的铅含量在原子吸收分光光度计的可检测值以外($0.001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),因而无法检出。基因型 1 在 Pb400 和 Pb800 下其茎内的铅含量差异不显著。基因型 2、3、6 随着污染水平的提高,其茎内的铅含量增加极显著,Pb800 下茎内铅含量分别为 Pb400 胁迫下茎内铅含量的 213.07%、248.24%、181.21%。基因型 4 和 5 在 Pb400 下其茎内铅浓度很低或者无法检出,但在 Pb800 下其铅含量增至 $5.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $8.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中基因型 5 在 Pb800 下茎内铅含量为 6 个基因型中最高。玉米茎的主要生理功能主要有支持、输导和储藏,铅过量积累可能会影响输导等生理功能。

2.2.3 叶

不同基因型的玉米叶内铅含量在同一铅污染水平下及不同铅污染水平之间都达到了显著差异。各基因型叶内的铅含量随着污染水平的递增也极显著增加,增加幅度高于茎中的变化。基因型 1 和 6 在 Pb400 和 Pb800 下叶内铅含量最高。叶内铅含量可能

会影响叶片的主要生理学功能。糯性基因型玉米的叶内铅含量相对其他基因型玉米较低。

2.2.4 穗

果穗是鲜食类玉米、饲料玉米等的主要收获器官。从表 2 中可以得知,穗部是同一植物基因型同一污染水平下积累铅含量最低的器官。玉米不同基因型果穗的含铅量在不同污染水平间的变化也存在显著差异。高蛋白的基因型 1、2 在 Pb800 下的果穗铅含量和 Pb400 下的差异不显著且穗部积累铅含量较高,不宜用于生产。基因型 3 在 Pb800 下的果穗铅含量高于其在 Pb400 下的表现。基因型 4、5、6 的穗内含铅量均未检出。鲜食类的甜玉米具有潜在的低积累基因型特征。

2.3 不同基因型玉米的生物富集系数(BCF)

生物富集系数表明植物对该重金属的摄取能力。经统计分析得知,玉米不同基因型的生物富集系数存在显著差异,在不同污染水平下也有显著变化。

表 3 表明,除基因型 6 外,其余 5 个基因型的

BCF 在对照土壤条件(Pb0)下最高,这与土壤中的背景值有很大关系。基因型 6 在铅中、轻度污染胁迫下其 BCF 均位居所有基因型之首,其根部富集占重要作用。在轻度污染下,其 BCF 是基因型 5 的 2.74 倍;在中度污染下,是基因型 1 的 1.96 倍。基因型 5 在中度污染下生物富集系数仅次于基因型 1,相对于其在轻度污染下的表现,其铅吸收能力在重度污染下骤增 160.26%。Pb400 下,基因型 5 的 BCF 最低;Pb800 下,基因型 1 的 BCF 最低。基因型 1、3、6 的 BCF 在中、轻度污染下变化不大。可见不同基因型在不同铅污染条件下,其生物富集铅能力变化很大。综合来看,甜玉米类型铅吸收能力较强。

2.4 不同基因型玉米的转运系数(TF)

重金属转运系数反映植物所摄取的重金属在地上部和根系内的分布情况,这种重金属的分布习性可能与植物木质部转运能力等特性有关。统计结果表明,玉米不同基因型的铅转运系数(TF)存在差异,不同污染水平下也有明显变化(表 3)。

在中、轻度污染下,基因型 1 的 TF 最高,轻度污染下其 TF 高达 0.662 8,分别为基因型 2、3、4、5、6 的 9.66、17.22、53.89、49.1、17.72 倍,故基因型 1 相对于其他基因型玉米而言属于重金属铅高积累类型。基因型 1 在中度污染下的 TF 为 0.104 4,表明在中度胁迫下,该基因型向地上部转运的重金属比例减少,是植物自身保护机制所致还是因为中度胁迫下植物木质部受到伤害引起转运能力下降所致,有待研究。基因型 4、5、6 的 TF 在 Pb400 下均低于 0.05,在 Pb800 下均低于 0.08。由此可见,糯性基因型和鲜食甜玉米基因型玉米对铅向地上部分转移具有较强的阻隔力。

3 讨论

3.1 玉米对铅胁迫的响应存在显著的基因型差异

本研究表明,同一铅胁迫水平不同玉米基因型生物量之间存在显著差异,不同铅污染水平下同一基因型玉米生物量也会发生显著变化。轻度铅污染能不同程度地促进玉米生物量增长,可能与其在轻度铅胁迫

表 3 不同基因型玉米的生物富集系数(BCF)和转运系数(TF)及其方差分析结果

Table 3 Bioconcentration factor(BCF) and transfer factor(TF) of different genotypes of <i>Zea mays</i> under various lead contamination stress			
土壤污染程度 Pollution level	基因型编号 Genotype number	BCF	TF
Control(Pb0)	1	0.044 6±0.006 8a	0.234 1±0.078 41ab
	2	0.030 7±0.008 02b	0.088 0±0.022 63b
	3	0.045 4±0.008 25ab	0.366 7±0.097 21a
	4	0.039 7±0.000 49ab	0.097 6±0.023 22b
	5	0.011 6±0.002 86c	0b
	6	0.003 1±0.002 17c	0b
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	31.280**	22.374**
Mild stress(Pb400)	1	0.010 5±0.000 73b	0.662 8±0.135 17a
	2	0.009 3±0.002 51bc	0.068 6±0.013 89b
	3	0.015 1±0.000 61ab	0.038 5±0.012 82b
	4	0.009 2±0.004 89bc	0.012 3±0.010 35b
	5	0.007 8±0.001 07c	0.013 5±0.004 68b
	6	0.021 4±0.001 07a	0.037 4±0.007 26b
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	12.248**	63.453**
Moderate stress(Pb800)	1	0.013 5±0.002 4b	0.104 4±0.024 48a
	2	0.015 1±0.004 54b	0.035 3±0.013 01b
	3	0.017 3±0.001 81ab	0.042 5±0.014 12b
	4	0.014 2±0.002 13b	0.038 5±0.010 52b
	5	0.020 3±0.003 17ab	0.075 1±0.027 88ab
	6	0.026 4±0.005 04a	0.038 4±0.019 36b
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	6.157**	6.352**

注:表内的数据是由 3 个重复得出的平均值与标准误,字母表示同一污染水平下其基因型间差异情况。* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。
Note: Data in the table is the average and standard error derived from three repeats, the letter means difference situation between different genotypes under the same pollution level. * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$.

刺激下,根部分泌一些有机酸,从而促进植物吸收根际附近的矿质元素(如 Fe^{2+})有关^[14],这种受轻度胁迫刺激而增长的程度在不同基因型间也存在着差异,表明不同基因型对环境的适应性存在不同的生态幅。随着污染胁迫的继续加剧,开始有部分玉米基因型生长受阻,其原因可能是这些铅污染相对敏感的植物基因型在中度 Pb 污染下叶绿体亚显微结构发生破坏,光合色素合成受到影响^[32],阻碍电子传递,影响类囊体的蛋白质合成^[33]和参与 Calvin 循环的酶活性,从而影响光合作用^[34]。但不同基因型对中等铅胁迫的响应差异显著,这与曹莹等^[35]研究结论基本一致。

3.2 不同铅胁迫下玉米不同基因型器官间重金属积累量存在显著差异

一般来说,玉米体内铅含量随着污染程度的增强会相应增加,但不同基因型对污染增强的响应不尽相同,同一基因型不同器官之间的重金属积累也因胁迫强度不同而有所差异。不同器官之间的铅含量存在差异,一般都以根部最高,叶部其次,果穗部最低。但不同基因型之间的体内铅含量的空间分布又存在显著差异。铅元素在不同器官中的分布将决定不同基因型的实际利用价值,植物生物量大而体内铅含量比较高的基因型,可用作植物修复的潜在选材;而只有那些经济器官(果穗或者种子内)内铅含量比较低(在国家规定的安全含量以下)的基因型,才能满足用作粮食生产或者水果生产(鲜食玉米和甜玉米)的目的。

基因型 1 在铅污染情况下,其生物量没有受到影响,具有较强的重金属铅适应能力。在 Pb800 情况下,其生物量位于各类基因型之首。在重金属铅胁迫下,基因型 1 的地下部分铅浓度最低,而茎、叶、穗部分含量达最高,具有较强的铅吸运能力和生物富集能力,故可作为中、轻度铅污染土壤的植物修复的备选材料。

基因型 2 在铅轻度污染情况下生物量有略微增加,在中度污染下则发生生长受阻现象。轻度污染下,基因型 2 积累重金属铅分布特征类似于基因型 1。

基因型 3 具有较强的铅耐受能力,在铅污染情况下均能正常生长,而且其体内铅含量,无论是地上部分还是地下部分,铅含量较高。可知在本实验的铅浓度下,虽然基因型 3 的生长能保持不受胁迫影响,但因其铅吸收多,故该浓度范围不适合用于安全生产。

基因型 4 在铅中、轻度污染胁迫下促进生长,也表现出较强的重金属铅抵抗能力,其地上部分(茎、叶、穗)铅含量最低,且穗部含量小于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,符

合国家食品卫生安全标准,可用于安全生产。基因型 5 在轻度胁迫下,其生物量增加,而在中度胁迫情况下时,其生物量与正常情况下相比无显著差异。但是其穗部的铅含量均小于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可用于安全生产。基因型 6 在正常情况下,其长势为所有基因型中最矮小,但在铅胁迫特别是轻度胁迫下,其生长显著促进,增加了 280.1%,在中度污染下,生物量增加 105.6%。其地下部分的铅含量为最高,可用于植物固定的玉米基因型模式植物,而且其穗部含量也符合国家食品卫生安全标准,故该基因型既可用于安全生产,在治理的同时还能产生经济效益。可见,即使在土壤存在污染的情况下,由于生物学习性的差异,有些作物还是能够进行安全生产的,并不是污染的土壤都绝对不能用于粮食生产。

3.3 玉米不同基因型重金属积累的器官间差异特征与机制及其潜在利用价值

陆开形等^[36]指出,藻类植物吸附重金属的内在机制主要靠其结构基础和代谢基础,即其特殊的细胞壁和分泌的代谢物质(有机酸和金属络合物)。实际上,玉米的铅耐受性也同样可能与这些机制有关,玉米铅污染敏感性基因型叶片膜脂过氧化作用随污染胁迫增强而加剧,质膜透性升高;低浓度铅胁迫刺激下各基因型的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性均高于对照处理,但随铅浓度升高,SOD、CAT 与 POD 活性依次下降^[37]。本研究进一步支持这一结论,即玉米各基因型之间的铅耐受性确实存在着显著差异。

同等胁迫强度下,掖单 13 号生物量位于各类基因型之首,且铅吸运能力和生物富集能力最高,故可作为中、轻度铅污染土壤的植物修复的备选材料。申甜 1 号在不同铅污染水平下均有较强的耐性,不但没有表现生长受阻,生物量反而有显著增加,其铅元素生物富集能力最强,居各基因型之首,且地下部分铅含量较高,可用于植物固定的玉米基因型模式植物,然而,其地上部分铅含量(特别是果穗内)为各基因型之最低,并且符合国家食品卫生安全标准,故该基因型既可作为植物固定,又可用于安全生产,在治理的同时还能产生经济效益。沪玉糯 2 号和金珠蜜超甜、申甜 1 号的地上部分铅含量最低,符合卫生部 2005 年发布的《食品卫生标准》中铅限量指标(小于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的要求,可用于青贮饲料的安全生产。

对重金属污染土壤逆境的响应,以及将摄入的重金属元素转运分布在不同器官里的特征,都存在着广

泛的基因型差异,如何通过遗传改良和生态综合措施改善玉米的重金属耐受能力,一直受到广泛而持久的关注,其中科学评价植物耐逆性同样相当重要。毫无疑问,科学认识与评价不同植物及基因型/生态型的耐逆性生理生态差异,并充分利用这些植物资源特质是植物修复与污染地再利用的根本原则。筛选资源、科学评价、杂交组配培育适合污染土壤安全生产的品种,都是过去、现在及未来生态生理和生态育种学者不断努力的方向,不仅需要,而且可能可行^[9-13,16]。当然,植物修复还有很多新思路值得探索^[22-23,38-39]。

4 结论

(1)玉米6个基因型对铅污染的适应性及响应存在显著差异,轻度污染刺激所有基因型的生长。

(2)玉米6个基因型整个植株积累的重金属含量存在显著的区别,所积累的重金属量在不同器官间差异也很大,不同胁迫水平下这种器官之间的重金属分布差异也会发生改变。

(3)同一胁迫水平下,玉米6个基因型各个器官内的铅积累量,虽然存在着根部>叶部>茎部>果穗部的大致趋势,但器官间差异幅度仍存在显著的基因型差异,这是植物资源利用的最重要依据。

(4)掖单13生物量大、铅积累总量多向地上部转运,属于植物修复的潜在备用材料;申甜1号耐铅性强,生物量变化不大,铅总积累量大且主要集中在根部,果穗中少有积累,可以用作修复生产兼顾的类型;沪玉糯2号及两个鲜食甜玉米果穗部分铅积累很少,完全符合国家食品安全标准,可以用于青储饲料的安全生产。

参考文献:

- [1] 周启星. 健康土壤学——土壤健康质量与农产品安全[M]. 北京:科学出版社, 2005.
ZHOU Qi-xing. Healthy Pedology: Qualified soil health and safety of agricultural product[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 唐世荣, 高尚宾, 丁永祯, 等. 我国农业环境研究中值得关注的几个科学问题[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 1-7.
TANG Shi-rong, GAO Shang-bin, DING Yong-zhen, et al. Some scientific issues concerning the agro-environmental research in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 1-7.
- [3] 马宁远, 刘鲁新, 蔺彩霞, 等. 植物修复技术在重金属污染土壤中的应用[J]. 新疆农业科技, 2008(3): 31.
MA Ning-yuan, LIU Lu-xin, LIN Cai-xia, et al. Application of phytoremediation for heavy metal-contaminated soil[J]. *Xinjiang Journal of Agricultural Science and Technology*, 2008(3): 31.
- [4] Chaney R L, Malikz M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(3): 279-284.
- [5] Arao T, Ae N, Sugiyama M, et al. Genotypic differences in cadmium uptake and distribution in soybeans[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 247-253.
- [6] Khan A G. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 18(4): 355-364.
- [7] Wu Q T, Wei Z B, Ouyang Y. Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum alfredii* H: Effects of chelator and co-planting[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2007, 180(1-4): 131-139.
- [8] 朱永官, 陈保冬, 林爱军, 等. 珠江三角洲地区土壤重金属污染控制与修复研究的若干思考[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1575-1579.
ZHU Yong-guan, CHEN Bao-dong, LIN Ai-jun, et al. Heavy metal contamination in Pearl River Delta-Status and research priorities[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(12): 1575-1579.
- [9] 刘维涛, 周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1452-1458.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Selection and breeding of heavy metal pollution-safe cultivars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6): 1452-1458.
- [10] Liu Weitao, Zhou Qixing, An Jing, et al. Variations in cadmium accumulation among chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1-3): 737-743.
- [11] Liu W, Zhou Q, Zhang Y, et al. Lead accumulation in different chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(3): 781-788.
- [12] 唐建军. 水稻抗(耐)逆性评价指标体系[J]. 云南农业科技, 1989(3): 14-15.
TANG Jian-jun. Evaluation index system of rice resistance(tolerance) [J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 1989(3): 14-15.
- [13] 唐建军, 李达模, 苏以荣. 水稻耐潜性生理生态研究的某些进展[J]. 湖南农业科学, 1990(4): 44-45.
TANG Jian-jun, LI Da-mo, SU Yi-rong. Research on rice tolerance to gleyed paddy soil and application of methods to identification and evaluation[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 1990(4): 44-45.
- [14] 唐建军, 王永锐, 傅家瑞. 植物铁素营养的生理生态观[J]. 生态科学, 1995(1): 40-47.
TANG Jian-jun, WANG Yong-rui, FU Jia-rui. Physiological ecology of iron nutrition in plant[J]. *Ecological Science*, 1995(1): 40-47.
- [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(*Brassica pekinensis* L.)对镉富集基因型差异的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 226-235.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Genotypic variation of cadmium accumulation in chinese cabbage(*Brassica pekinensis*

- L.)[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(2):226-235.
- [17] del Piano L, Abet M, Sorrentino C, et al. Uptake and distribution of lead in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.)[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2008, 82(1):21-25.
- [18] 匡少平, 徐仲, 张书圣. 玉米对土壤中重金属铅的吸收特性及污染防治[J]. *安全与环境学报*, 2002, 2(2):28-31.
KUANG Shao-ping, XU Zhong, ZHANG Shu-sheng. Phytoavailability of corns to heavy metal Pb content in the soils and its benefit to the environmental amelioration[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2002, 2(1):28-31.
- [19] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 杂草中具重金属超积累特征植物的筛选[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(12):1259-1265.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. Screening of the plants having the characteristics of the heavy metal hyperaccumulation in weeds[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(12):1259-1265.
- [20] 吴春华, 唐建军, 陈欣, 等. 模拟铅污染土壤中杂草的菌根形成及对铅的吸收[J]. *生态学报*, 2005, 25(6):1325-1330.
WU Chun-hua, TANG Jian-jun, CHEN Xin, et al. Mycorrhizal colonization and lead uptake of weeds in lead-polluted soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6):1325-1330.
- [21] Yang Ruyi, Tang Jianjun, Chen Xin, et al. Effects of coexisting plant species on soil microbes and soil enzymes in metal lead contaminated soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37:240-246.
- [22] 黄艺, 陈有鑑, 陶澍. 污染条件下 VAM 玉米元素积累和分布与根际重金属形态变化的关系[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7):859-862.
HUANG Yi, CHEN You-jian, TAO Shu. Uptake and distribution of Cu, Zn, Pb and Cd in maize related to metals speciation change in rhizosphere[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7):859-862.
- [23] Wu Chunhua, Chen Xin, Tang Jianjun. Lead accumulation in seventeen plant species and weed communities with various species[J]. *Communications on Soil Sciences and Plant Analysis*, 2005, 36(13/14):1891-1902.
- [24] Yang Ruyi, Tang Jianjun, Yang Yisong, et al. Invasive and non-invasive plants differ in response to soil heavy metal lead contamination[J]. *Botanical Studies*, 2007, 48:453-458.
- [25] Yang Ruyi, Yu Guodong, Tang Jianjun, et al. Effects of metal lead on growth and mycorrhizae of an invasive plant species (*Solidago canadensis* L.)[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(6):739-744.
- [26] 代全林, 袁剑刚, 方炜, 等. 玉米各器官积累 Pb 能力的品种间差异[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(6):992-999.
DAI Quan-lin, YUAN Jian-gang, FANG Wei, et al. Differences of Pb accumulation among plant tissues of 25 *Zea mays* varieties[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6):992-999.
- [27] 张利红, 李雪梅, 陈强, 等. 铅对不同品种玉米幼苗抗氧化酶活性及根系活力的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2006, 28(2):119-122.
ZHANG Li-hong, LI Xue-mei, CHEN qiang, et al. Effects of lead on antioxidant enzymes and root activities among maize cultivars[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2006, 28(2):119-122.
- [28] Malkowski E, Kita A, Galas W, et al. Lead distribution in corn seedling (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentration of potassium and calcium[J]. *Plant Growth Regulation*, 2002, 37(1):69-76.
- [29] 李静, 依艳丽, 李亮亮, 等. 几种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)在玉米植株不同器官中的分布特征[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(4):244-247.
LI Jing, YI Yan-li, LI Liang-liang, et al. Distribution of heavy metal (Cd, Pb, Cu, Zn) in different organs of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4):244-247.
- [30] 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 Fa-hui. New comprehensions of hyperaccumulator[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1):136-138.
- [31] Salt D E, Blaylock M B, Kumar N P B A, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Nature Biotechnology*, 1995, 13:468-474.
- [32] Sharma P, Dubey R S. Lead toxicity in plants[J]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, 17(1):35-52.
- [33] Stefanov K, Seizova K, Popova I, et al. Effects of lead ions on the phospholipid composition in leaves *Zea mays* and *Phaseolus vulgaris*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1995, 147(2):243-246.
- [34] Parys E, Romanowska E, Siedlecka M, et al. The effect of lead on photosynthesis and respiration in detached leaves and in mesophyll protoplasts of *Pisum sativum*[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 1998, 20(3):313-322.
- [35] 曹莹, 黄瑞冬, 曹志强. 铅胁迫对玉米生理生化特性的影响[J]. *玉米科学*, 2005, 13(3):61-64.
CAO Ying, HUANG Rui-dong, CAO Zhi-qiang. Effect of Pb stress on the physiological and biochemical traits of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(3):61-64.
- [36] 陆开形, 唐建军, 蒋德安. 藻类富集重金属的特点及其应用展望[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1):118-122.
LU Kai-xing, TANG Jian-jun, JIANG De-an. Characteristics of heavy metals enrichment in algae and its application prospects[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1):118-122.
- [37] 姚广, 高辉远, 王未未, 等. 铅胁迫对玉米幼苗叶片光系统功能及光合作用的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(3):1162-1169.
YAO Guang, GAO Hui-yuan, WANG Wei-wei, et al. The effects of Pb-stress on functions of photosystems and photosynthetic rate in maize seedling leaves[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3):1162-1169.
- [38] Chen Xin, Wu Chunhua, Tang Jianjun, et al. Arbuscular mycorrhizae enhance heavy metal lead uptake and growth of host plants under a sand culture experiment[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(5):665-671.
- [39] 李凝玉, 李志安, 丁永祯, 等. 不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(6):1369-1373.
LI Ning-yu, LI Zhi-an, DING Yong-zhen, et al. Effects of intercropping different crops with maize on the Cd uptake by maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6):1369-1373.