

不同基因型玉米品种对 Pb 的富集特征

秦榕璘, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 陈建军*

(云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要:为了研究不同基因型玉米品种对 Pb 的富集特征, 选用 2 个 Pb 低富集玉米品种(曲辰 11 号、曲辰 3 号)和 2 个 Pb 高富集玉米品种(靖丰 8 号、旭玉 1446), 开展 Pb 胁迫(2 000 mg·kg⁻¹)下的大田试验, 研究了玉米植株生物量的变化、各部位 Pb 含量、Pb 总吸收量、富集与转运规律、土壤 pH 值及有效态 Pb 含量。结果表明:(1)与对照相比, Pb 胁迫导致 4 个玉米品种根、茎、叶和籽粒生物量不同程度的下降, 总生物量下降 9.65%~20.46%, 但低富集玉米品种生物量的下降程度小于高富集玉米品种;(2)玉米各部位的 Pb 含量分配规律为根>叶>茎>籽粒, 分别为 95.39~121.02、25.56~43.21、14.06~25.41、2.52~5.38 mg·kg⁻¹;低富集玉米品种根的 Pb 含量高于高富集玉米品种, 而茎、叶和籽粒的 Pb 含量低于高富集玉米品种;玉米植株对 Pb 的总吸收量为 4.46~7.94 mg·株⁻¹, 低富集玉米品种植株的 Pb 总吸收量显著低于高富集玉米品种;(3)不同基因型玉米品种对 Pb 的富集系数和转运系数均小于 1, 表现为低富集玉米品种低于高富集玉米品种;(4)不同基因型玉米品种土壤 pH 值为 6.60~6.82, 且低富集玉米品种显著高于高富集玉米品种, 土壤有效态 Pb 含量范围为 969.86~1 116.15 mg·kg⁻¹。

关键词:玉米基因型; Pb 含量; 富集特征; 有效态 Pb

中图分类号: X503.231

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2016)03-0268-08

doi: 10.13254/j.jare.2016.0007

引用格式:

秦榕璘, 李元, 祖艳群, 等. 不同基因型玉米品种对 Pb 的富集特征[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3):268-275.

QIN Rong-lin, LI Yuan, ZU Yan-qun, et al. Accumulation Characteristics of Pb by *Zea Mays* of Different Genotypes[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3):268-275.

Accumulation Characteristics of Pb by *Zea Mays* of Different Genotypes

QIN Rong-lin, LI Yuan, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, CHEN Jian-jun*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To determine the characteristics of lead (Pb) accumulation by different maize genotypes, two low accumulation genotypes (Quchen 11, Quchen 3) and two high accumulation maize genotypes (Jingfeng 8, Xuyu 1446) were used in a field experiment under Pb stress (2 000 mg·kg⁻¹). The following parameters were measured including the change of plant biomass, Pb contents in different plant parts, total Pb uptake, Pb accumulation and translocation of different maize varieties, soil pH value and available Pb contents in soils. The results showed that: (1) Compared with the control, the Pb stress caused a decrease at different levels on the biomass of roots, stems, leaves and grains of the four maize genotypes. The plant biomass decreased by 9.65%~20.46%. And the decrease level on the plant biomass of the low accumulation maize genotypes was less than the high accumulation maize genotypes. (2) The Pb contents were found highest in the roots (95.39~121.02 mg·kg⁻¹), followed by the leaves (25.56~43.21 mg·kg⁻¹) and stems (14.06~25.41 mg·kg⁻¹), and least in the grains (2.52~5.38 mg·kg⁻¹). Moreover, the Pb contents in roots were higher of low accumulation maize genotypes than high accumulation maize genotypes. In contrast, the Pb contents in the stems, leaves and grains were less of the low accumulation maize genotypes than the high accumulation maize genotypes. The total Pb accumulation of maize was 4.46~7.94 mg per plant, and which was significant less of the low accumulation maize genotypes than the high accumulation maize genotypes. (3) For the four maize genotypes, both the accumulation factor and translocation factor of Pb were less than 1, and were smaller of the low accumulation maize genotypes than the high accumulation maize genotypes. (4) The pH values in soils were 6.60~6.82, which were significant higher of the low accumulation maize genotypes than the high accumulation maize genotypes, the available Pb contents in soils were 969.86~1 116.15 mg·kg⁻¹.

Keywords: maize genotype; Pb content; accumulation characteristic; available Pb

收稿日期: 2016-01-05

基金项目: 国家自然科学基金-云南省联合基金(U1202236)

作者简介: 秦榕璘(1990—), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 从事土壤重金属污染与修复生态学研究。E-mail: 819277235@qq.com

* 通信作者: 陈建军 E-mail: chenjianjun94@126.com

重金属对生态系统的污染是人们普遍关注的环境问题之一。过去的50年中,大约有 2.20×10^4 t的Cr、 9.39×10^5 t的Cu、 7.83×10^5 t的Pb和 1.35×10^5 t的Zn排放到全球环境中,其中大部分进入土壤,引起了土壤重金属污染^[1]。据报道,我国Cd、Pb、As等重金属污染的耕地面积达 2.0×10^7 hm²,约占全国总耕地面积的20%^[2]。云南省有色金属矿产资源丰富,是我国重要的矿产资源基地,由于多年不断地开采,使得云南省土壤重金属污染较为严重。会泽县位于滇东北地区,是中国有名的铅锌矿冶炼区,长期的土法冶炼对环境造成了严重污染,导致Cd、Pb、Zn等重金属在土壤中高度累积^[3]。其中,Pb是土壤中最普遍和危害性较强的污染元素^[4],秦丽等^[5]分析了会泽县海镇废弃矿渣堆周边土壤,测得Pb平均值含量达 $3\ 244$ mg·kg⁻¹。而Pb沉积在土壤中,积累到一定程度会给植物各方面带来影响^[6],并且通过食物链蓄积到人体,最终危害人类健康。

不同植物^[7-8]与同一植物不同品种之间^[9-10]吸收累积重金属的能力均存在很大差异。代全林等^[11]认为,玉米是吸收和转运Pb能力较强的作物,而蔡保新等^[12]认为,玉米有较低富集Pb的能力。而玉米的品种多样,抗逆性有很大差别。李月芳等^[13]在研究6种基因型玉米对Pb的吸收累积规律中发现,6种基因型玉米整个植株累积的Pb含量存在显著的差异,所积累的重金属在不同部位间差异也很大,而各个部位的Pb累积量虽然存在根>叶>茎>穗,但是部位间差异幅度仍存在显著的基因型差异。孙洪欣等^[14]发现9个夏玉米品种将Cd从秸秆向籽粒转移的转运系数呈现显著的品种间差异,籽粒对土壤中Cd的吸收累积能力也存在显著差异。对于低富集品种,朱芳等^[15]提出了防污染品种,旨在污染土壤中作物可食部分吸收积累污染物含量低于食品卫生标准的品种。刘维涛等^[16]认为理想的重金属低累积植物应同时具备以下特征:(1)该植物的地上部和地下部重金属含量均很低或可食部位重金属含量低于相关标准;(2)该植物对重金属的累积量小于土壤中该重金属的浓度,即富集系数<1;(3)该植物从其他部位向可食部位转运重金属能力较差,即转运系数<1;(4)该植物对重金属毒害具有较高的耐受性,在较高浓度重金属污染下能够正常生长,且生物量无明显下降。

大部分土壤重金属常以溶解性很低或非溶性的化合物形态存在,这部分不能被植物根系吸收,因此能被植物吸收和累积的重金属主要取决于土壤重金

属有效态含量而非总量。而土壤pH值是影响重金属有效性的重要因子^[17]。为此,本研究以低富集玉米与高富集玉米各2个品种为供试材料进行小区试验,研究了不同基因型玉米种植株生物量变化、对Pb的吸收累积、富集与转运规律、植株Pb总吸收量、土壤pH值及土壤有效态Pb含量,力求为云南土壤重金属控制与改善、提高玉米安全生产质量,保障食品安全和实现优质农产品可持续发展提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验点位于云南省寻甸县大河桥云南农业大学试验基地,地处云南省东北部,地理坐标为东经103°13'、北纬23°32',气候条件属亚热带季风气候,年平均气温14.7℃,年降水量1040 mm。土壤属黄壤,其背景值为:pH 6.86,有机质23.30 g·kg⁻¹,全氮2.20 g·kg⁻¹,全磷11.04 g·kg⁻¹,全钾8.92 g·kg⁻¹,碱解氮40.25 mg·kg⁻¹,速效磷28.70 mg·kg⁻¹,速效钾161.61 mg·kg⁻¹,土壤Pb全量为:79.25 mg·kg⁻¹。

供试玉米选用云南省广泛种植的品种,根据课题组,已筛选出低富集玉米品种曲辰11号、曲辰3号与高富集玉米品种靖丰8号、旭玉1446。

1.2 试验设计

供试玉米于2014年6月种植,分别设对照(CK,土壤中未添加Pb)、处理(T,外源添加Pb浓度为2000 mg·kg⁻¹)2个处理,Pb的添加形态为Pb(CH₃COO)₂·3H₂O,每个处理设置3次重复,小区间筑埂,随机排列,共24个小区。每个小区面积为1.8 m×2.0 m,每小区种15穴玉米,株距为40 cm,行距为60 cm。将定量的Pb(CH₃COO)₂·3H₂O研磨成粉末后均匀拌于200 g过2 mm筛的土样中,再等量分成180份后分别施入12个Pb处理小区的各个穴中,每穴体积范围为20 cm×20 cm×20 cm,与土壤充分混匀,使土壤Pb浓度为2000 mg·kg⁻¹,平衡2周后播种。每穴播3粒种子,待玉米长出苗后,每穴仅留1株。玉米整个生长期浇水施肥,按常规方法管理。

1.3 样品采集与指标测定

待玉米成熟期分别采集根际土壤与植株作为试验样品。土壤样品经自然风干磨碎后分别过1 mm和0.25 mm筛,备用;植株样品分为根、茎、叶和籽粒4部分,清水洗净后再用去离子水冲洗数次,105℃烘箱中杀青30 min,再调至70℃烘干至恒重,测其生物量后粉碎,过0.25 mm筛,备用。

土壤中 Pb 含量的测定:参照《土壤农化分析》^[18]的方法,取过 0.25 mm 筛的样品 0.5 g,采用 HNO₃-HCl-HClO₄ 消解制备待测液,火焰原子吸收分光光度计测定。

玉米根、茎、叶、籽粒中 Pb 含量的测定:参照《土壤农化分析》^[18]的方法,取过 0.25 mm 筛的样品 0.5 g,采用 HNO₃-HClO₄ 消煮制备待测液,火焰原子吸收分光光度计测定。

pH 值的测定:参照《土壤农化分析》^[18]的方法,取过 1 mm 筛的土壤,水土比为 2.5:1.0, pH 计测定。

土壤有效态 Pb(可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态)含量参照 Tessier 法^[19],连续提取过程参照文献[20-21]进行,用火焰原子吸收分光光度计测定。

1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 19.0 进行数据处理和统计分析,单因素方差分析和 Duncan 多重比较检验不同玉米品种间的差异程度。

Pb 富集特征用富集系数和转运系数表示,其计

算公式分别为:

富集系数(*BCF*)=玉米体内 Pb 含量/土壤 Pb 含量^[5];

茎、叶转运系数(*TF*)=茎、叶部 Pb 含量/根部 Pb 含量^[22-23];

籽粒转运系数(*TF*)=籽粒 Pb 含量/茎叶部 Pb 含量^[24]。

2 结果与分析

2.1 Pb 对不同基因型玉米品种生物量的影响

从表 1 可以看出,Pb 胁迫下,4 个玉米品种的单株生物量均为:茎>籽粒>叶>根。并且与对照相比,4 个品种各部位(根、茎、叶、籽粒)的生物量变化率((处理值-对照值)/对照值×100%)均小于零,说明玉米各部位生长受到不同程度的抑制,使其生物量下降。Pb 胁迫下,不同玉米品种根、茎、叶、籽粒和总生物量(根+茎+叶+籽粒)范围分别为 13.49~23.41、106.24~146.03、31.00~40.86、80.95~110.60 g 和 251.15~303.85 g。与对照相比,其下降率范围分别为 2.30%~

表 1 不同基因型玉米品种植株生物量(g·株⁻¹)
Table 1 Plant biomass of different maize genotypes(g·plant⁻¹)

部位	玉米品种	植株生物量		
		CK/g·株 ⁻¹	T/g·株 ⁻¹	变化百分率/%
根	曲辰 11 号	20.12±1.49b	19.66±1.77b	-2.30
	曲辰 3 号	15.59±1.63c	13.49±1.08d	-13.47
	靖丰 8 号	26.52±1.17a	23.41±1.65a	-11.70
	旭玉 1446	20.14±1.01b	16.44±1.18c	-18.41
茎	曲辰 11 号	155.66±8.80b	135.97±8.07a	-12.65
	曲辰 3 号	123.66±5.69c	106.24±5.05b	-14.09
	靖丰 8 号	163.29±5.84ab	140.38±8.86a	-14.04
	旭玉 1446	165.70±5.42a	146.03±8.12a	-11.87
叶	曲辰 11 号	42.06±2.31b	36.62±3.46ab	-12.94
	曲辰 3 号	37.19±2.63b	31.00±2.02b	-16.65
	靖丰 8 号	50.00±3.95a	40.86±2.06a	-18.28
	旭玉 1446	39.39±2.50b	33.74±3.52b	-14.36
籽粒	曲辰 11 号	122.07±6.97a	110.60±8.21a	-8.58
	曲辰 3 号	101.55±7.98b	100.43±9.08a	-1.11
	靖丰 8 号	119.26±9.30a	80.95±6.86b	-32.12
	旭玉 1446	106.02±8.85ab	93.29±8.85ab	-12.01
总生物量	曲辰 11 号	339.91±19.29a	303.85±18.63a	-10.61
	曲辰 3 号	277.98±9.16b	251.15±7.05b	-9.65
	靖丰 8 号	359.06±15.25a	285.60±15.02a	-20.46
	旭玉 1446	331.26±15.43a	289.49±8.57a	-12.61

注:表中数据为平均值±标准差;同一部位不同字母表示不同基因型玉米品种差异达到显著水平($P<0.05, n=3$)。下同。

Notes: Data are average ± standard deviation; The different letters in the same plant part mean significant differences between the different cultivars of maize($P<0.05, n=3$). The same below.

18.41%、11.87%~14.09%、12.94%~18.28%、1.11%~32.12%和9.65%~20.46%。总体来说,低富集玉米品种比高富集玉米品种的单株总生物量下降程度小,对Pb胁迫表现出更好的耐性。

2.2 不同基因型玉米品种对Pb的累积差异

从图1可知,Pb胁迫下,玉米各部位Pb的含量均为:根>叶>茎>籽粒;其Pb含量范围分别为95.39~121.02、25.56~43.21、14.06~25.41、2.52~5.38 mg·kg⁻¹。总体来说,低富集玉米品种根部Pb含量高于高富集玉米品种,地上部Pb含量却低于高富集玉米品种。4个玉米品种茎、叶部Pb含量均超出饲料卫生标准(BG 13078—2001)(Pb≤5 mg·kg⁻¹),其中,茎部Pb含量是其标准限值的2.8~5.1倍,叶部Pb含量是其标准限值的5.1~8.6倍,均不可用作青贮饲料;4个品种籽粒Pb含量均超出食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中规定的(Pb≤0.2 mg·kg⁻¹),是其标准限值的12.6~26.9倍。

2.3 不同基因型玉米品种对Pb的总吸收量

从图2可知,Pb胁迫下,不同基因型玉米品种Pb总吸收量范围为:4.46~7.94 mg·株⁻¹,且低富集玉米品种低于高富集玉米品种,表明低富集玉米品种整个生命周期从土壤中吸收的Pb总量低于高富集玉米品种。

2.4 不同基因型玉米品种对Pb的富集与转运能力

从表2可知,Pb胁迫下,4个玉米品种富集系数与茎、叶、籽粒转运系数存在差异显著,表明不同基因型玉米品种对Pb的吸收富集能力与转运能力存在明显的品种间差异。富集系数与茎、叶、籽粒转运系数范围分别为:0.010~0.017与0.116~0.251、0.211~0.453、0.142~0.194,且低富集玉米品种显著低于高富集玉米品种,说明低富集玉米品种对土壤Pb的吸收能力、将Pb从根部转运到茎、叶与从茎叶部转运到籽粒的能力较高富集玉米品种弱。

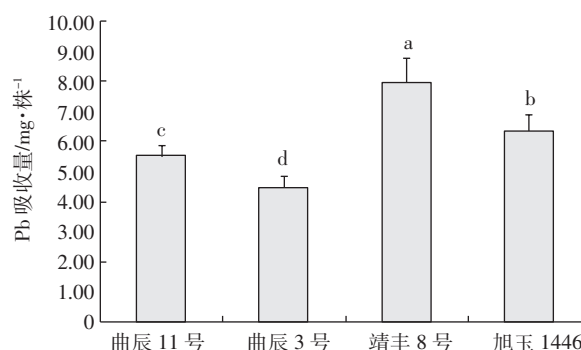


图2 Pb胁迫下不同基因型玉米品种Pb总吸收量
Figure 2 Total Pb uptakes in different maize genotypes under Pb stress

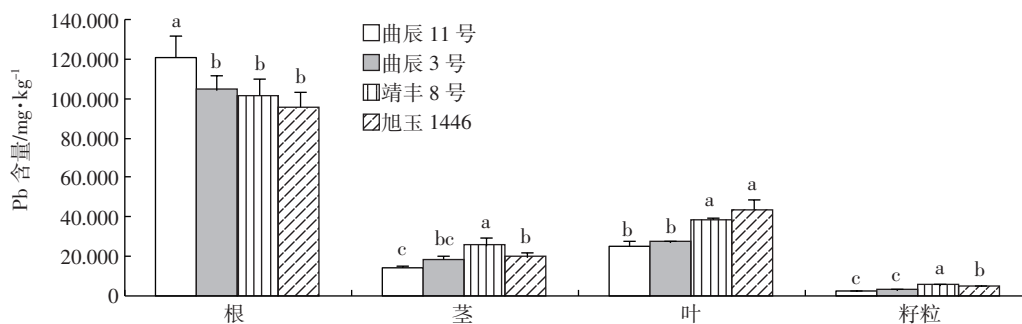


图1 Pb胁迫下不同基因型玉米植株Pb含量
Figure 1 Pb contents in the plant of different maize genotypes under Pb stress

表2 不同基因型玉米品种富集系数与转运系数

Table 2 The bioconcentration factors and translocation factors of Pb in different maize genotypes

玉米品种	富集系数	茎转运系数	叶转运系数	籽粒转运系数
曲辰 11 号	0.010±0.001c	0.116±0.005c	0.211±0.010c	0.153±0.009b
曲辰 3 号	0.011±0.000c	0.175±0.004b	0.258±0.015c	0.142±0.014b
靖丰 8 号	0.017±0.001a	0.251±0.036a	0.377±0.044b	0.190±0.015a
旭玉 1446	0.013±0.001b	0.205±0.006b	0.453±0.037a	0.194±0.010a

注:同一列的不同字母表示不同基因型玉米品种差异达到显著水平($P<0.05, n=3$)。下同。

Notes: The different letters in the same row mean significant differences between the different cultivars of maize ($P<0.05, n=3$). The same below.

2.5 不同基因型玉米品种根际土壤 pH 值与有效态 Pb 含量

从表 3 可知, Pb 胁迫下, 4 个玉米品种根际土壤 pH 值范围为 6.60~6.82, 且表现为低富集玉米品种高于高富集玉米品种; 4 个玉米品种根际土壤有效态 Pb 含量范围为 969.86~1116.15 mg·kg⁻¹。

表 3 不同基因型玉米品种土壤 pH 值与有效态 Pb 含量

Table 3 Soil pH value and the contents of available Pb in different maize genotypes

玉米品种	pH 值	有效态 Pb 含量/mg·kg ⁻¹
曲辰 11 号	6.75±0.04a	996.31±109.08a
曲辰 3 号	6.82±0.05a	969.86±101.39a
靖丰 8 号	6.60±0.03c	1 116.15±107.99a
旭玉 1446	6.68±0.04b	1 034.73±57.76a

3 讨论

本研究中, Pb 胁迫下, 所有基因型玉米生物量较对照组均有所下降, 表现出生长受阻现象。高富集玉米品种生物量下降率较低富集玉米品种大, 其原因可能是高富集玉米品种在 Pb 胁迫下叶绿体亚显微结构更易发生破坏, 使得光合色素合成受到影响^[25], 阻碍电子传递, 影响类囊体的蛋白质合成^[26]和参与 Calvin 循环的酶活性, 从而影响光合作用^[27]。不同基因型玉米品种对 Pb 胁迫响应存在显著差异, 这与李月芳等^[13]研究结论基本一致。

不同基因型玉米品种对 Pb 胁迫的响应不尽相同, 同一基因型不同部位之间的 Pb 累积也有所差异。Florijin 等^[28]认为, 同一植物在不同部位及不同植物在离子积累方面都存在着比较大的差异, 这种差异不仅表现在营养器官上, 而且在生殖器官中也有所不同。一般情况下, 植物吸收的重金属主要集中在根部, 地上部各部位中含量都较低。本研究中, 玉米对 Pb 在不同部位的分配由高到低依次为根、叶、茎、籽粒, 这与李月芳等^[13]、曹莹等^[29]的研究结果也一致。不同基因型玉米品种同一部位对 Pb 的累积存在差异, 且低富集玉米品种根部 Pb 含量高于高富集玉米品种, 而茎、叶、籽粒部 Pb 含量则低于高富集玉米品种。这可能是由于低富集玉米品种根吸收的 Pb 更多地富集在细胞壁中, 而阻碍了进一步向地上部运输。有学者认为, Pb 与果胶羧基的络合是植物细胞能够抵抗 Pb 胁迫的最重要机制^[30]。不同基因型对 Pb 胁迫的响应机制也有所不同, 有研究表明, 黄花茅 Pb 耐性株系根中的 Pb

大多分布在细胞壁, 而铅敏感株系根中的 Pb 大多分布在高度紊乱的细胞质^[31]。另外, 高富集玉米品种根系所吸收的 Pb 在向地上部转运过程中除部分被沿途输导组织固定外, 其余部分随着蒸腾流最终在叶片表层的气孔和水孔附近过多累积^[32]。Pb 在玉米不同部位的分布将决定不同玉米品种的实际利用价值, 茎、叶部 Pb 含量较低的品种, 可用作青贮饲料, 而籽粒部 Pb 含量比较低的品种, 能满足粮食生产的目的。Pb 胁迫下, 4 个玉米品种茎、叶部 Pb 含量均超出饲料卫生标准(BG 13078—2001)中规定(Pb ≤ 5 mg·kg⁻¹), 籽粒部 Pb 含量均超出食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中规定(Pb ≤ 0.2 mg·kg⁻¹), 这可能是因为土壤中添加 Pb 浓度过高, 从而富集到茎、叶、籽粒部的浓度也相对较高。此外, 低富集玉米品种从土壤中吸收的 Pb 总量显著低于高富集玉米品种。玉米对 Pb 的总吸收量是用单株玉米根、茎、叶、籽粒部生物量与对应部位 Pb 含量乘积之和来表示, 体现了玉米整个生命周期从土壤中吸收的 Pb 总量, 这不仅与该玉米品种的生物量有很大的关系, 更与该玉米品种吸收 Pb 的多少有关, 因此不论从茎、叶作青贮饲料、籽粒食用安全还是植株吸收 Pb 总量方面, 低富集玉米品种均有一定的优势。

富集系数是衡量植物对重金属累积能力大小的一个重要指标, 它是指植物体内某种重金属含量与土壤中该种重金属含量的比值, 富集系数越大, 说明富集能力越强^[33-34]。转运系数是指植物地上部重金属含量与地下部重金属含量之比, 说明重金属从根部向地上部的转运情况, 反映植物对重金属转运程度的高低。籽粒重金属转运系数是指籽粒重金属含量与茎叶重金属含量之比, 反映重金属从茎、叶部向籽粒转运的能力^[33, 35]。本研究发现, 4 个玉米品种富集系数与茎、叶、籽粒转运系数均 < 1, 这表明玉米对土壤 Pb 的吸收能力较弱, 没有达到超富集植物的标准^[36], 且玉米将 Pb 从根部转运到茎、叶部与将 Pb 从茎、叶部转运到籽粒中的能力均较弱。而 Pb 胁迫下, 低富集玉米品种富集系数与茎、叶、籽粒转运系数均显著低于高富集玉米品种, 表明低富集玉米品种对土壤 Pb 的吸收能力、将 Pb 从根部转运到茎、叶部与从茎、叶部转运到籽粒的能力较高富集玉米品种弱。究其原因, 可能是 Pb 进入玉米体内, 低富集玉米品种将更多地 Pb 储藏在根部的细胞壁中, 与果胶络合, 从而阻止了 Pb 向地上部运输^[37]。

重金属有效态是重金属元素影响植物生长的最

直接部分,而土壤 pH 值是影响重金属有效性的一个重要因子。本研究中,低富集玉米品种土壤 pH 值高于高富集玉米品种,可能是由于植物分泌根系分泌物所致。根系分泌物对根际环境物理、化学性质,根际周围土壤中微生物种群分布、土壤酶活性等对土壤重金属的有效性以及植物对重金属的吸收产生重要影响^[38-39],根系分泌物包括植物细胞主动释放或被动渗透到根际环境的低分子量有机酸(如 H₂CO₃、H⁺、氨基酸、有机酸等)和高分子量化合物(如植物络合素、植物高铁载体、类金属硫蛋白等),这类化合物对土壤重金属具有螯合作用或酸化根际,导致根际土壤 pH 值的降低,并促进土壤重金属的溶解和植物的吸收^[40]。体系 pH 值的升高,土壤中的粘土矿物、水合氧化物和有机质表面的负电荷增加,因而对 Pb 的吸附力加强,土壤中重金属可溶态含量下降,致使溶液中 Pb 浓度降低,交互作用减弱,植物吸收 Pb 的量则减少^[41],因此低富集玉米品种植株 Pb 含量较高富集玉米品种低,且富集系数也低于于高富集玉米品种。

4 结论

(1)Pb 胁迫下,4 个玉米品种的生长均受到不同程度的抑制,但 Pb 对低富集玉米品种的抑制作用小于对高富集玉米品种的抑制作用;

(2)Pb 胁迫下,低富集玉米品种与高富集玉米品种各部位 Pb 含量分配规律均为:根>叶>茎>籽粒;低富集玉米品种根部 Pb 含量高于高富集玉米品种,而地上部 Pb 含量则低于高富集玉米品种;

(3)Pb 胁迫下,低富集玉米品种富集系数与茎、叶、籽粒转运系数及 Pb 总吸收量显著低于高富集玉米品种;

(4)低富集玉米品种土壤 pH 值显著高于高富集玉米品种,土壤有效态 Pb 含量无明显差异。

参考文献:

[1] Singh O V, Labana S, Pandey G. Phytoremediation: An overview of metallic ion decontamination from soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 61(5): 405-412.

[2] 许延娜,牛明雷,张晓云.我国重金属污染源及污染现状概述[J].资源节约与环保,2013(2): 55.

XU Yan-na, NIU Ming-lei, ZHANG Xiao-yun. The pollution sources and pollution status of heavy metal in China[J]. *Resource Economization Environment Protection*, 2013(2): 55.(in Chinese)

[3] FENG X B, LI G H, QIU G L. A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous

method sin Hezhang county, Guizhou, China. Part 1: Mercury emission from zincs melting and its influences on the surface waters[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 6223-6230.

[4] 李敬伟,湛方栋,何永美,等.云南会泽铅锌矿区土壤理化与生物学性质[J].应用与环境生物学报,2014,20(5): 906-912.

LI Jing-wei, ZHAN Fang-dong, HE Yong-mei, et al. Physicochemical and biological properties of soils from Huize lead-zinc mining area of Yunnan[J]. *Chinese Journal of Applied and Environment Biology*, 2014, 20(5): 906-912.(in Chinese)

[5] 秦丽,祖艳群,李元,等.会泽铅锌矿渣堆周边7种野生植物重金属含量及累积特征研究[J].农业环境科学学报,2013,32(8): 1558-1563.

QIN Li, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Heavy metal contents and accumulation characteristic of seven wild plants from the slagheap surrounding of Huize lead-zinc tailings [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1558-1563.(in Chinese)

[6] 王坤,梁倩,王飞,等.湖泊底泥土地利用对土壤中重金属铅、铜形态影响[J].生态环境学报,2013,22(9): 1614-1619.

WANG Kun, LIANG Qian, WANG Fei, et al. Effect of land use of lake sediments on lead and copper fractionation in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(9): 1614-1619. (in Chinese)

[7] 魏敏,刘新,陈朝琼,等.攀钢冶炼渣堆土壤与优势植物的重金属含量[J].生态学报,2008,28(6): 2931-2936.

WEI Min, LIU Xin, CHEN Chao-qiong, et al. The concentration of heavy metals in soil and dominant plants growing on spoiled heap from steel refinery[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2931-2936. (in Chinese)

[8] Ololade I A, Ologundudu A. Concentration and bioavailability of cadmium by some plants[J]. *African Journal and Biotechnology*, 2010, 6(16): 1916-1921.

[9] 唐非,雷鸣,唐贞,等.不同水稻品种对镉的积累及其动态分布[J].农业环境科学学报,2013,32(6): 1092-1098.

TANG Fei, LEI Ming, TANG Zhen, et al. Accumulation characteristic and dynamic distribution of Cd in different genotypes of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1092-1098.(in Chinese)

[10] 刘声传,罗显扬,赵志清,等.茶树对铅、镉、铜的吸收累积特性研究[J].西南农业学报,2011,24(5): 1805-1812.

LIU Sheng-chuan, LUO Xian-yang, ZHAO Zhi-qing, et al. Study on uptake and accumulation of Pb, Cd and Cu in tea plant[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(5): 1805-1812. (in Chinese)

[11] 代全民,袁剑刚,方炜,等.玉米各个器官吸收 Pb 能力的品种间的差异[J].植物生态学报,2005,29(6): 996-999.

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): 996-999.(in Chinese)

[12] 蔡保新,黄玉,王宇,等.云南某锡矿区主要农作物重金属富集差异性[J].地质通报,2014,33(8): 1175-1181.

CAI Bao-xin, HUANG Yu, WANG Yu, et al. An analysis of differences in accumulation of heavy metals in main crops in a tin mining area of

- Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8): 1175–1181. (in Chinese)
- [13] 李月芳, 刘 颖, 陈 欣, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2260–2267.
LI Yue-fang, LIU Ling, CHEN Xin, et al. Plant growth, lead uptake and partitioning of maize (*Zea mays* L.) under simulated mild/moderate lead pollution stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2260–2267. (in Chinese)
- [14] 孙洪欣, 赵全利, 薛培英, 等. 不同夏玉米品种对镉、铅积累与转运的差异性田间研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 2068–2074.
SUN Hong-xin, ZHAO Quan-li, XUE Pei-ying, et al. Variety different of cadmium and lead accumulation and translocation in summer maize [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12): 2068–2074. (in Chinese)
- [15] 朱 芳, 方 炜, 杨中艺. 番茄吸收和积累 Cd 能力的品种间差异 [J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4071–4081.
ZHU Fang, FANG Wei, YANG Zhong-yi. Variations of Cd absorption and accumulation of 36 *Lycopersicon esculentum* cultivars[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4071–4081. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] Moral R, Gilkes R J, Moreno-Caselles J. A comparison of extractants for heavy metals in contaminated soils from Spain[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33: 2781–2791.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis(the third edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. (in Chinese)
- [19] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844–851.
- [20] 张 辉, 马东升. 长江(南京段)现代沉积物中重金属的分布特征及其形态研究[J]. *环境化学*, 1997, 16(5): 429–434.
ZHANG Hui, MA Dong-sheng. The distribution and phases of heavy metals in present sediment from Yangtze river(Nanjing section)[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(5): 429–434. (in Chinese)
- [21] 王亚平, 裴 韬, 成杭新, 等. B 城近郊土壤柱状剖面中重金属元素分布特征研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 144–148.
WANG Ya-ping, PEI Tao, CHENG Hang-xin, et al. Research on the distribution characters of heavy metals in column profile of soil within B City[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 144–148. (in Chinese)
- [22] Fayiga A, Ma L Q, Cao X D, et al. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyper-accumulator *Pteris vittata* L[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(2): 289–296.
- [23] 徐卫红, 王宏信, 李文一, 等. 重金属富集植物黑麦草 Zn 的响应[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 33–36.
XU Wei-hong, WANG Hong-xin, LI Wen-yi, et al. Growth and uptake response of hyperaccumulator ryegrass to Zn stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 33–36. (in Chinese)
- [24] 杨惟薇, 刘 敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(6): 774–779.
YANG Wei-wei, LIU Min, CAO Mei-zhu, et al. Accumulation and transfer of lead(Pb) and cadmium(Cd) on different species of maize [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(6): 774–779. (in Chinese)
- [25] Sharma P, Dubey R S. Lead toxicity in plants[J]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, 17(1): 35–52.
- [26] Stefanov K, Seizova K, Popova I, et al. Effect of lead ions on the phospholipid composition in leaves of *Zea mays* and *Phaseolus vulgaris*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1995, 147(2): 243–246.
- [27] 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): 312–322.
- [28] Florijin P J, Van beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. *Plant Soil*, 1993, 150(6): 25–32.
- [29] 曹 莹, 刘 洋, 王国骄, 等. 铅-镉复合胁迫下玉米品种间积累铅、镉的差异[J]. *玉米科学*, 2009, 17(1): 80–85.
CAO Ying, LIU Yang, WANG Guo-jiao, et al. Differences in lead and cadmium concentrations among plant tissues of 25 maize cultivars under the combined stress of lead and cadmium[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(1): 80–85. (in Chinese)
- [30] Krzeslowska M. The cell wall in plant cell response to trace metals: polysaccharide remodeling and its role in defense strategy[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011, 33: 35–51.
- [31] Qureshi J A, Collin H A, H Aardwick, et al. Metal tolerance in tissue cultures of *Anthoxanthum odoratum*[J]. *Plant Cell Reports*, 1981, 1(2): 90–82.
- [32] Kodera H, Nishioka H, Muramatsu Y, et al. Distribution of lead in lead-accumulating pteridophyte *Blechnum niponicum*, measured by synchrotron radiation micro X-ray fluorescence[J]. *Analytical Sciences*, 2008, 24: 1545–1549.
- [33] 宋 波, 唐丽嵘. 桂林市土壤和蔬菜镉含量调查及食用安全性评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 238–242.
SONG Bo, TANG Li-rong. A Survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Guilin and food safety assessment of vegetable[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3): 238–242. (in Chinese)
- [34] 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): 244–251.
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): 244–251. (in Chinese)
- [35] 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4): 361–371.
GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, QIU Jin-rong, et al. Differences between corn cultivars in accumulation and translocation of heavy metals[J].

- Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4): 361-371. (in Chinese)
- [36] 张会敏, 袁 艺, 焦 慧, 等. 相思谷尾矿 8 种定居植物对重金属吸收及富集特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 886-891.
ZHANG Hui-min, YUAN Yi, JIAO Hui, et al. Heavy metal absorption and enrichment characteristics by 8 plants species settled naturally in Xiangsigu copper tailings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(5): 886-891. (in Chinese)
- [37] 徐 劫, 保积庆, 于明革, 等. 茶树根细胞壁对铅的吸附作用[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 427-432.
XU Jie, BAO Ji-qing, YU Ming-ge, et al. Lead adsorption by the root cell wall of tea plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 427-432. (in Chinese)
- [38] 陈英旭, 林 琦, 陆 芳, 等. 有机酸对铅、镉植株危害的解毒作用研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 467-472.
CHEN Yin-xu, LIN Qi, LU Fang, et al. Study on detoxication of organic acid to raddish under the stress of Pb and Cd[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4): 467-472. (in Chinese)
- [39] 常学秀, 段昌群, 王焕校. 根分泌作用与植物对金属毒害的抗性[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 315-320.
CHANG Xue-xiu, DUAN Chang-qun, WANG Huan-xiao. Root excretion and plant resistance to metal toxicity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 315-320. (in Chinese)
- [40] 孙 琴, 王晓蓉, 丁士明. 超积累植物吸收重金属的根际效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 30-36.
SUN Qin, WANG Xiao-rong, DING Shi-ming. Rhizosphere effects in metal absorption by hyperaccumulators and its research advances[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(1): 30-36. (in Chinese)
- [41] 王学峰, 杨艳琴. 土壤-植物系统重金属形态分析和生物有效性研究进展[J]. 化工环保, 2004(24): 24-27.
WANG Xue-feng, YANG Yan-qin. Progresses in research on speciation and bioavailability of heavy metals in soil-plant system [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2004(24): 24-27. (in Chinese)