

辛艳卫, 梁成华, 杜立宇, 等. 不同玉米品种对镉的富集和转运特性[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):839–846.

XIN Yan-wei, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different maize cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 839–846.

不同玉米品种对镉的富集和转运特性

辛艳卫, 梁成华*, 杜立宇, 吴 岩, 张亚男, 胡 悦

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘 要:通过室外盆栽试验,研究了 18 个玉米品种在土壤外加全镉含量为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下对镉的富集和转运差异,并探讨土壤镉形态与玉米吸收镉之间的关系。结果表明:供试玉米品种的生物量和产量以及根、茎、叶、籽粒积累和转运镉的能力存在显著差异,其中 9 个玉米品种籽粒镉含量未超过国家食品安全卫生标准(GB 2762—2012),3 个玉米品种的茎镉含量和 2 个玉米品种的叶镉含量均未超过国家饲料卫生标准(GB 13078—2001);根、茎、叶、籽粒部位镉的富集系数范围分别为 1.076~1.991、0.093~0.430、0.068~0.902 和 0.004~0.081。茎叶和籽粒镉的转运系数范围分别为 0.19~0.83 和 0.03~0.44,表明土壤镉从玉米地下部向地上部迁移的能力较弱。玉米吸收镉与土壤中可交换态镉有一定的正相关关系,与残渣态镉有一定的负相关关系。经综合评价,新东单 16、东单 60、沈禾 118 和富友 9 可作为镉中轻度污染土壤上种植玉米的优先选择品种。

关键词:玉米;品种差异;富集;转运;镉形态

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)05-0839-08 doi:10.11654/jaes.2016-1668

Accumulation and translocation of cadmium in different maize cultivars

XIN Yan-wei, LIANG Cheng-hua*, DU Li-yu, WU Yan, ZHANG Ya-nan, HU Yue

(Shenyang Agriculture University, College of Land and Environment, Shenyang 110866, China)

Abstract: Eighteen maize cultivars, which are widely planted in the Northeast China, were selected as materials in a pot experiment. The aims of this study were to investigate the rule of cadmium (Cd) accumulation and translocation under Cd stress conditions ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and explore the relationship between Cd form and its absorption by the crop. The results showed that the biomass and yield among cultivars were not significantly different, while the ability to accumulate and translocate Cd was significantly different in the root, stem, leaf, and grain of maize. Among the cultivars, accumulation of Cd in the grain in nine cultivars did not exceed the national hygienic standard of food safety, while that in stem in three cultivars and in leaves in two cultivars did not exceed the hygienic standard of feed. The Cd accumulation coefficients in root, stem, leaf, and grain of maize were 1.076~1.991, 0.093~0.430, 0.068~0.902, and 0.004~0.081, respectively. The transferring coefficients of stem and leaf ranged from 0.19 to 0.83 and from 0.03 to 0.44, respectively, which suggest that the maize cultivars had a certain ability to absorb Cd from the soil, but the transporting ability from shoot to stem, leaf, or grain was weak. Cd absorbed by maize had a positive correlation with the exchangeable state and negative correlation with the residual state. According to the evaluation of biomass, Cd content, enrichment, and transferring coefficient, four cultivars named Xin Dongdan 16, Dongdan 60, Shenhe 118, and Fuyou 9 could be recommended for cultivation in the mild and moderate Cd contaminated soils.

Keywords: maize; cultivar difference; accumulation; translocation; cadmium form

收稿日期:2016-12-28

作者简介:辛艳卫(1992—),女,山东潍坊人,硕士研究生,从事污染土壤修复研究。E-mail:xinywxin@163.com

*通信作者:梁成华 E-mail:liang110161@163.com

基金项目:国家科技支撑计划(2015BAD05B03)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAD05B03)

目前,人类活动导致自然界和农业环境中重金属含量明显增加^[1],我国局部地区耕地土壤重金属污染严重。重金属低富集作物品种能降低中轻度重金属污染耕地土壤上农产品的人体健康风险,因而其筛选研究具有重大意义。研究表明,植物吸收和累积重金属存在显著的种间差异和种内差异^[2-3],如玉米、水稻和马铃薯等作物^[4]。Zhang 等^[5]发现 4 种不同的湿地植物不同部位积累和转运镉的能力存在显著差异;陈建军等^[6]发现 25 个玉米品种的生物量和产量,以及根、茎、叶和籽粒对 Cd 的吸收、累积及转运能力存在显著差异;李晔等^[7]发现低浓度镉胁迫对玉米品种铁南 2 号、营丹 11 号和郑丹 958 表现为一定的刺激作用,较高浓度在某种程度上则表现了明显的抑制性,且铁南 2 号对重金属镉的抗性明显高于其他 2 个玉米品种。玉米是我国第二大粮食作物,而我国东北镉低积累玉米品种的筛选研究鲜有报道。本实验选取东北地区大面积种植的 18 个玉米品种,在外加镉污染土壤条件下,研究不同玉米品种对镉的累积和转运差异,以期筛选具有镉低累积潜力的玉米品种,并探讨土壤镉形态与玉米吸收隔之间的关系,为中轻度镉污染耕地的安全利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

土壤为棕壤,采自沈阳农业大学田间试验基地 0~20 cm 耕层,经风干、过 100 目筛后备用。土壤的基本理化性质为:pH 6.89,有机质 16.9 g·kg⁻¹,全氮 1.36 g·kg⁻¹,全磷 0.41 g·kg⁻¹,全钾 10.9 g·kg⁻¹,碱解氮 63.0 mg·kg⁻¹,速效磷 14.5 mg·kg⁻¹,速效钾 96.0 mg·kg⁻¹,镉全量 0.15 mg·kg⁻¹。

1.1.2 供试玉米

试验选取东北地区大面积种植的 18 个玉米品种,并分别编号 1~18(表 1)。

1.2 试验设计

2015 年 5 月至 9 月在沈阳农业大学基地内进行室外盆栽实验。每个供试玉米品种设实验组和对照组两个处理,实验组需制备镉污染土壤:称取定量的 CdCl₂·2.5H₂O 化合物用去离子水配制成溶液后与供试土壤充分混匀,使添加镉后的土壤总镉含量达到 5.0 mg·kg⁻¹ 左右。镉污染土壤室温条件下放置 30 d 后备用。每个处理设 3 次重复,共 108 盆,每盆装土 14 kg,施用 300 mg·kg⁻¹(N、P、K 各 15%)的复合肥。播

种 5 粒,待玉米苗长至 3 片真叶时每盆留 2 棵,于大喇叭口期追加尿素 10 g·盆⁻¹。生长期使土壤含水量保持田间持水量的 60%~70%,苗期和拔节期进行人工捉虫两次,拔节期和灌浆期喷施农药。

1.3 样品采集与测定

于 9 月 20 号采集成熟期玉米和土壤样品。土壤样品自然风干磨碎后过 100 目筛备用;玉米植株样品分根、茎、叶和籽粒 4 部分取样,清水洗净后再用去离子水冲洗,在 105 ℃烘箱中杀青 30 min,75 ℃烘干,测生物量,籽粒生物量为玉米产量,并将根、茎、叶和籽粒分别粉碎,过 100 目筛备用。

土壤镉全量和植物样品镉含量测定:参照土壤农化分析的方法^[8]略加改进,取定量土壤样品用王水和高氯酸消煮,取定量植物样品加浓硝酸和混酸(硝酸:高氯酸=83:17)进行消煮。消煮液中的镉均用火焰原子吸收分光光度法测定。

1.4 统计分析

采用 Excel 2007 软件进行数据处理,SPSS 19.0 软件进行方差分析、相关性分析、回归分析、聚类分析。

镉富集系数(BF)=玉米植株各部位镉含量/土壤中镉含量。富集系数越大,表示玉米积累重金属能力越强。

镉转运系数(TF)=植株地上各部位镉含量/根部镉含量,表示镉由根部转运、分配到地上部位的能力。转运系数越高,表示重金属从根部转运到地上部位的能力越强^[9]。

2 结果与分析

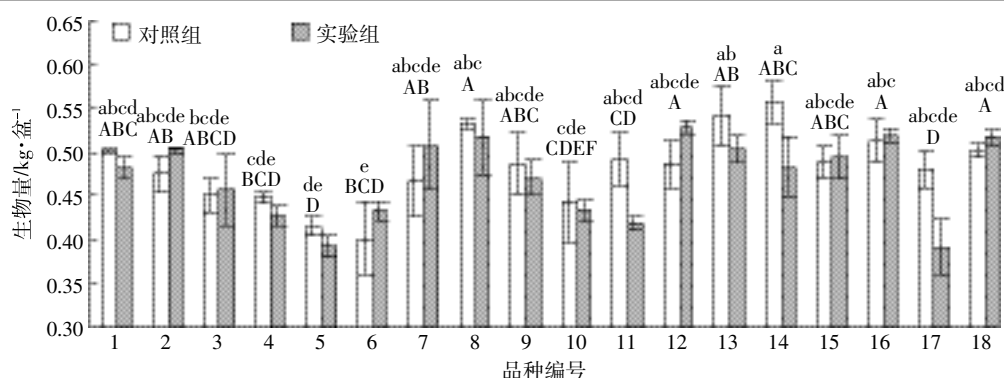
2.1 生物量和产量分析

供试玉米品种的生物量和产量见图 1 和图 2。实验组和对照组不同玉米品种生物量和产量均有显著

表 1 供试玉米品种

Table 1 The cultivars of maize

编号	品种名称	编号	品种名称
1	良玉 99	10	东单 72
2	铁研 58	11	东单 90
3	新东单 16	12	东单 60
4	中农大 4515	13	中农大 4616
5	郁禾 58	14	郑单 958
6	沈玉 21	15	沈禾 118
7	沈玉 31	16	富友 99
8	沈玉 33	17	辽单 36
9	石玉 9	18	富友 9



采用 duncan 法。小写字母不同表示对照组品种间某一指标差异显著($P < 0.05$)。大写字母不同表示实验组品种间某一指标差异显著($P < 0.05$)。下同

By the method of Duncan. The different lower letters means that the index of control group has significant difference among maize cultivars($P < 0.05$).

The different capital letters means that the index of experimental group has significant difference among maize cultivars($P < 0.05$). The same as below

图 1 不同玉米品种生物量

Figure 1 Biomass of different maize cultivars

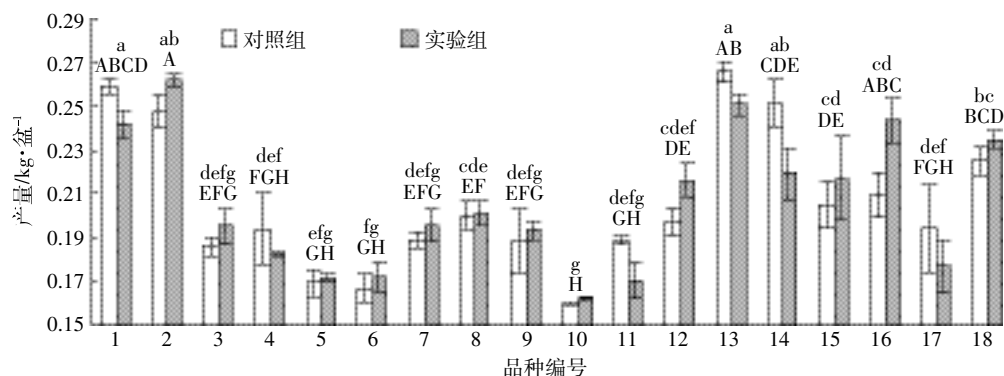


图 2 不同玉米品种产量

Figure 2 Yields of different maize cultivars

性差异($P < 0.05$)。实验组和对照组生物量范围分别为 0.39~0.53、0.40~0.56 $\text{kg} \cdot \text{盆}^{-1}$, 平均值分别为 0.47、0.48 $\text{kg} \cdot \text{盆}^{-1}$, 两组产量范围分别为 0.16~0.26、0.16~0.27 $\text{kg} \cdot \text{盆}^{-1}$, 平均值分别为 0.21、0.21 $\text{kg} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。总的来看, 在盆栽实验条件下供试玉米品种之间的生物量和产量存在较大差异, 但就每一个品种来说, 土壤镉全量为 5.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对玉米生长的影响不大。

2.2 不同玉米品种根、茎、叶、籽粒镉的含量

实验组和对照组不同玉米品种根、叶、茎、籽粒镉含量分别见图 3、图 4、图 5 和图 6。实验组和对照组的根、叶、茎、籽粒镉含量都有显著差异($P < 0.05$)。

实验组和对照组根镉含量范围分别为 4.80~8.76、0.054~0.150 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 7.36、0.087 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实验组根镉含量最低和最高的品种分别是 6 号和 1 号。对照组根镉含量最低和最高的品种分别是 4 号和 9 号。

实验组和对照组叶镉含量范围分别为 0.30~4.15、0.029~0.062 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 1.87、0.046 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实验组叶镉含量最低和最高的品种分别是 15 号和 16 号。对照组叶镉含量最低和最高的品种分别是 18 号和 3 号。对照组所有品种和实验组 3、15 号品种叶镉含量未超过国家饲料卫生标准($\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

实验组和对照组茎镉含量范围分别为 0.42~1.98、0.01~0.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 1.11、0.029 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实验组茎镉含量最低和最高的品种分别是 7 号和 16 号。对照组茎镉含量最低和最高的品种分别是 18 号和 9 号。对照组所有品种和实验组 7、12、18 号品种茎镉含量未超过国家规定饲料卫生标准。

实验组和对照组籽粒镉含量范围分别为 0.016~0.363、0.001 7~0.003 7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 0.144 0、0.002 7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实验组籽粒镉含量最低和最高的品种分别是 18 号和 8 号。对照组所有品种籽粒镉含量

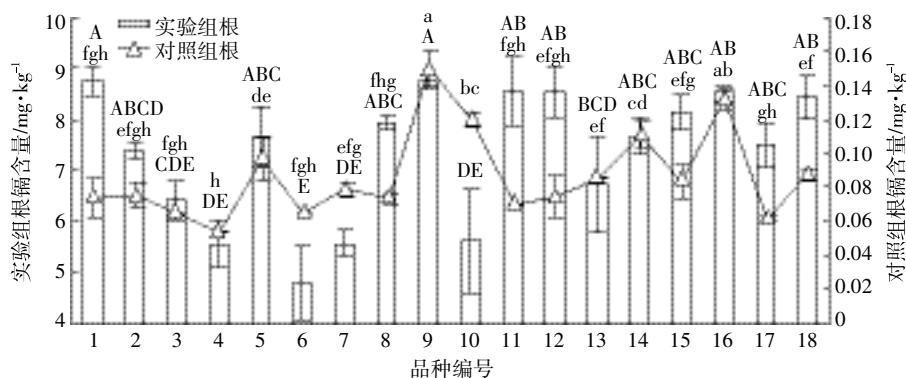


图3 不同玉米品种根镉含量

Figure 3 Cd content in roots of different maize cultivars

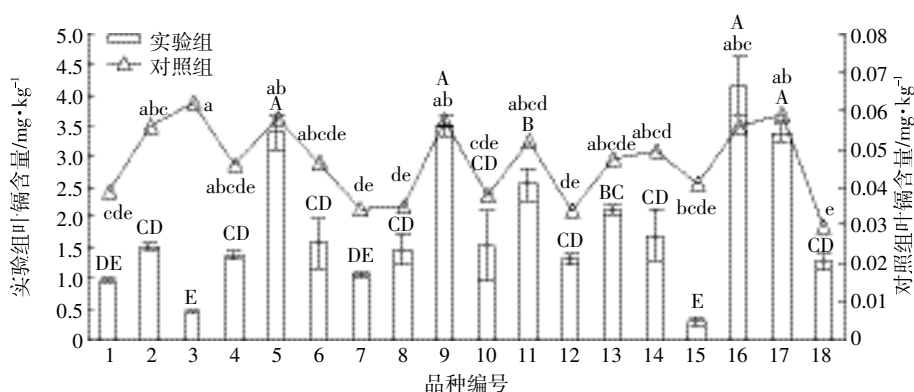


图4 不同玉米品种叶镉含量

Figure 4 Cd content in leaves of different maize cultivars

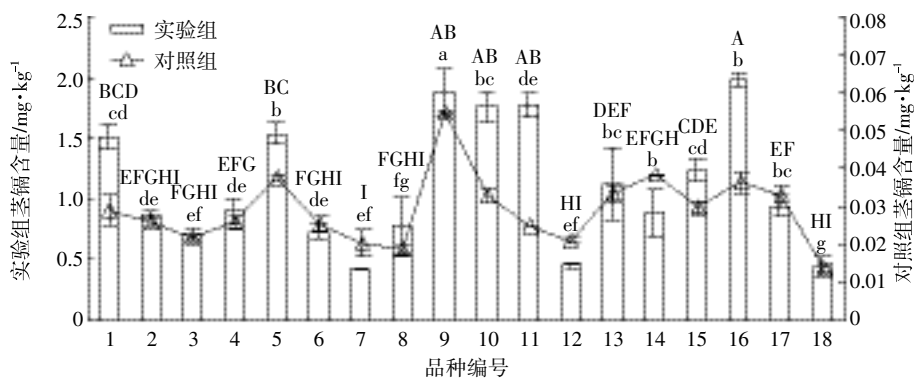


图5 不同玉米品种茎镉含量

Figure 5 Cd content in stem of different maize cultivars

未超过国家食品卫生标准($\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),而实验组的超标率达50%。

2.3 不同玉米品种籽粒镉含量的聚类分析

为了筛选镉低积累玉米品种,对实验组和对照组18个玉米品种籽粒镉含量进行聚类分析,结果见图7和图8。实验组和对照组的分析结果都将18个玉米品种籽粒对镉的富集量划分为3类:实验组第一类包

括1、3、4、9、12、13、14、15、18号品种,为镉低积累类群,籽粒平均镉含量为 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;实验组第二类包括2、5、7、10、11、16、17号品种,为镉中等积累类群,其籽粒平均镉含量为 $0.185 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;实验组第三类包括6、8号品种,为镉高积累类群,其籽粒平均镉含量为 $0.340 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对照组第一类为镉低积累群,包括3、4、13、14、15、18号品种,其籽粒平均镉含量为

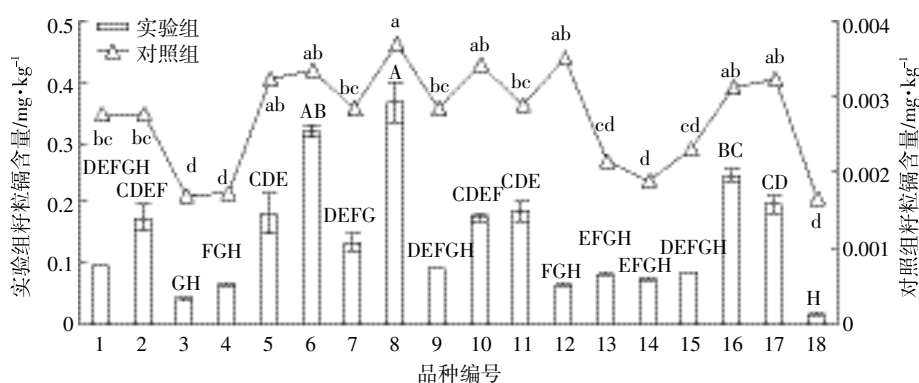


图 6 不同玉米品种籽粒镉含量

Figure 6 Cd content in grain of different maize cultivars

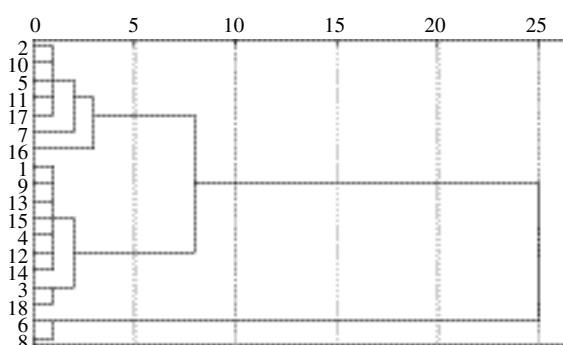


图 7 实验组籽粒镉含量聚类分析

Figure 7 The hierarchical cluster analysis of Cd content in grain of experimental group

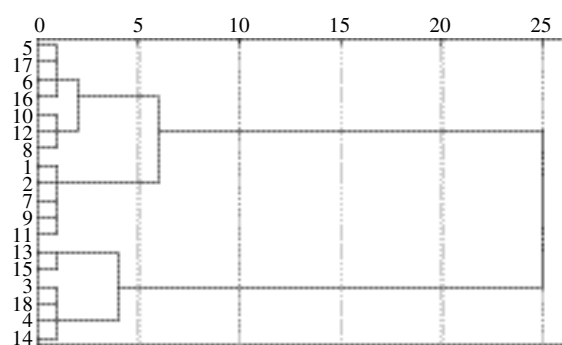


图 8 对照组籽粒镉含量聚类分析

Figure 8 The hierarchical cluster analysis of Cd content in grain of conditional control group

0.001 9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 第二类包括 1、2、7、9、11 号品种,为镉中等积累类群,其籽粒平均镉含量为 0.002 8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;第三类包括 5、6、8、10、12、16、17 号品种,其籽粒平均镉含量为 0.003 4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。通过图 7 和图 8 数据的比较还可以发现,聚类到实验组和对照组第一类镉低积累类群的玉米品种基本一致。这一现象说明当镉污染水平处于 0~5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,供试玉米品种对土壤镉的吸收品种差异不显著。

2.4 不同玉米品种的富集和转运规律分析

考虑到对照组土壤的全镉含量较低(0.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),玉米的镉含量较低,本文仅就实验组不同玉米品种不同器官的富集系数和转运系数进行分析。从表 2 看出,供试玉米品种根、茎、叶、籽粒的富集系数和茎叶、籽粒转运系数都有显著差异($P < 0.05$)。实验组根富集系数均 >1 ,茎富集系数范围 0.093~0.430,平均值为 0.246。叶富集系数范围 0.068~0.902,平均值为 0.414。籽粒富集系数均 <0.1 。玉米叶富集镉能力相对于茎略强,但低于根积累镉的能力,而籽粒富集镉的能力最低。实验组茎叶转运系数范围 0.19~0.83,平均

值为 0.38;茎叶转运系数最低和最高的品种分别为 18 号和 10 号。籽粒转运系数范围 0.03~0.44,平均值为 0.15;籽粒转运系数最低和最高的品种分别为 18 号和 8 号。

实验组籽粒镉含量未超过国家食品安全卫生标准的有 1、3、4、9、12、13、14、15 和 18 号品种,所有玉米品种根富集系数均 >1 ,同时 1、3、4、12、13、14、15 和 18 号品种的茎叶转运系数均小于 0.5,且籽粒转运系数均 <0.15 ,说明以上品种从根向茎叶、籽粒转运镉的能力较弱。9 号品种虽然茎叶转运系数为 0.58,但籽粒转运系数 <0.1 。说明镉从根向茎叶转运能力强而向籽粒转运能力弱。6、7 号玉米品种茎叶转运系数 <0.5 ,籽粒转运系数 >0.2 ,说明从茎叶向籽粒转运镉的能力较强。10 号品种茎叶转运系数最高,籽粒转运系数 <0.1 ,说明其从根向茎叶转运镉能力较强,但继续向籽粒转运镉的能力相对较弱。2、5、8、11、16、17 号玉米品种茎叶转运系数 >0.2 ,且籽粒转运系数均 >0.1 ,说明根向茎叶、籽粒转运镉的能力较强,这与其茎叶镉含量超过相关标准、籽粒镉含量超过相关标

表 2 实验组供试玉米品种的富集系数和转运系数

Table 2 The bioconcentration and translocation factors of maize cultivars in experimental group

编号	富集系数				转运系数	
	根	叶	茎	籽粒	籽粒	茎叶
1	1.922±0.050ab	0.212±0.005fg	0.332±0.024bcd	0.021±0defgh	0.10±0.01ef	0.33±0.06bcd
2	1.634±0.024abcd	0.337±0.020ef	0.191±0.003efghi	0.039±0.004cdef	0.29±0.04bc	0.28±0.03cd
3	1.529±0.100abcd	0.108±0.002g	0.169±0.009fghi	0.010±0gh	0.07±0.01ef	0.24±0.05cd
4	1.210±0.087cd	0.302±0.008ef	0.197±0.029efgh	0.015±0.001gh	0.08±0ef	0.33±0.04bcd
5	1.714±0.170ab	0.760±0.082abc	0.344±0.022abc	0.039±0.027cedf	0.13±0.10def	0.41±0.03bcd
6	1.076±0.161d	0.355±0.094ef	0.164±0.017fghi	0.071±0.003ab	0.36±0.03ab	0.49±0.12bc
7	1.227±0.032cd	0.237±0.009fg	0.093±0.003i	0.030±0.004efg	0.23±0.04cd	0.25±0.02cd
8	1.776±0.059ab	0.333±0.062ef	0.175±0.057fghi	0.081±0.006a	0.44±0.09a	0.24±0.03cd
9	1.991±0.061a	0.794±0.036ab	0.426±0.039ab	0.021±0defgh	0.04±0.01ef	0.58±0.05ab
10	1.211±0.221cd	0.330±0.114ef	0.379±0.031ab	0.038±0.002cdef	0.09±0.01ef	0.83±0.08a
11	1.970±0.126a	0.585±0.066cd	0.409±0.015ab	0.043±0.004cd	0.11±0.03def	0.39±0.02bcd
12	1.870±0.115ab	0.289±0.018ef	0.099±0.007hi	0.014±0gh	0.10±0.01ef	0.21±0.02cd
13	1.502±0.264bcd	0.467±0.020de	0.249±0.064def	0.018±0.001fgh	0.10±0.01ef	0.38±0.06bcd
14	1.626±0.048abcd	0.365±0.093ef	0.187±0.042efghi	0.016±0fgh	0.09±0.02ef	0.19±0.09cd
15	1.825±0.125ab	0.068±0.017g	0.277±0.029cde	0.020±0.001efgh	0.10±0.01ef	0.25±0cd
16	1.852±0.011ab	0.902±0.102a	0.430±0.017a	0.054±0.001bc	0.12±0.01def	0.82±0.05a
17	1.592±0.192abcd	0.715±0.022bc	0.200±0.019efg	0.042±0.004cde	0.17±0.03de	0.35±0.04bcd
18	1.954±0.228ab	0.294±0.034ef	0.102±0.020ghi	0.004±0.001h	0.03±0f	0.19±0.02d

注: 同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different letters indicated significant difference between varities at 0.05 level in the same column. The same below.

准结论一致。

2.5 土壤镉形态与生物有效性关系

植物吸收重金属的量与重金属的某一种形态而非全量有关^[10]。Tessier 等^[11]将土壤镉分为水溶及可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态、残渣态(表 3)。研究表明,红壤、棕壤中可交换态含量较高,铁锰氧化物结合态和有机结合态含量很少,碳酸盐结合态和残渣态含量居中^[12-13]。实验组土壤镉形态主要以可交换态和残渣态为主,碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态含量居中,有机结合态含量最低。王新^[14]通过对沈阳生态站草甸棕壤土进行田间盆栽试验,发现镉污染土壤的镉生物有效性提高,植物积累镉含量增加。实验组土壤镉形态与植物吸收镉含量的相关性见表 4。将玉米根、茎、叶、籽粒镉含量、地上部镉总量以及茎叶转运系数作为因变量 Y,土壤可交换态镉含量(X₁)、残渣态镉含量(X₂)为自变量 X,通过逐步线性回归分析来探讨土壤镉形态与玉米吸收镉之间的相关性,统计显著回归方程见表 5。镉交换态含量与玉米茎镉含量、叶镉含量、地上部镉总量、茎叶转运系数的相关系数分别为 0.699、0.814、0.703、0.622,且都在 0.01 水平上显著正相关。残渣态镉含量与叶镉含量、籽粒镉

表 4 土壤镉形态与玉米吸收镉含量相关性

Table 4 The relationship between Cd form and different index of maize's uptake

相关系数	交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态
根镉含量	0.061	0.068	0.095	-0.114	-0.110
茎镉含量	0.699**	0.224	0.034	-0.277	-0.431
叶镉含量	0.814**	0.140	0.135	0.255	-0.606*
籽粒镉含量	0.245	0.367	0.45	-0.083	-0.557*
地上部镉总量	0.703**	0.096	0.171	-0.208	-0.518*
植株镉总量	0.405	0.118	0.199	-0.149	-0.385
茎叶转运系数	0.622**	0.132	0.064	-0.147	-0.403
籽粒转运系数	-0.174	0.163	0.161	-0.129	-0.054

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

Note: * indicates the significant correlation at 0.05 level; ** indicates the significant correlation at 0.01 level.

含量、地上部镉总量在 0.05 水平上显著负相关,相关系数分别为-0.606、-0.557、-0.518。

3 讨论

土壤镉交换态含量与玉米茎镉含量、叶镉含量、地上部镉总量、茎叶转运系数显著正相关,这可能与

表 3 不同形态镉含量
Table 3 Different form of Cd content

品种编号	可交换态镉含量/ mg·kg ⁻¹	碳酸盐结合态镉含量/ mg·kg ⁻¹	铁锰氧化物结合态镉含量/ mg·kg ⁻¹	有机结合态镉含量/ mg·kg ⁻¹	残渣态镉含量/ mg·kg ⁻¹
1	1.990±0.057cde	0.820±0.017a	0.863±0.007bc	0.091±0.001a	1.236±0.011bc
2	2.150±0.023abcde	0.953±0.023a	0.256±0.015g	0.180±0.011a	1.457±0.011b
3	1.950±0.023cde	0.823±0.008a	0.549±0.017ef	0.150±0.006a	1.531±0.011a
4	2.190±0.040abcde	0.725±0.006a	0.568±0.012def	0.240±0.017a	1.277±0.034bc
5	2.382±0.028ab	0.980±0.050a	0.702±0.029cdef	0.213±0.003a	0.726±0.006de
6	1.991±0.028cde	0.894±0.001a	0.551±0.023ef	0.150±0.017a	1.417±0.003b
7	1.907±0.113e	0.850±0.023a	1.176±0.006a	0.170±0.035a	0.894±0.011d
8	2.015±0.173cde	0.900±0.058a	1.332±0.003a	0.163±0.001a	0.590±0.0ef
9	2.219±0.012abc	0.730±0.011a	0.615±0.002def	0.137±0.001a	1.299±0.0abc
10	2.235±0.058abc	0.970±0.011a	0.766±0.017bcde	0.154±0.011a	0.875±0.034d
11	2.214±0.058abcd	0.980±0.040a	0.812±0.058bcd	0.175±0.011a	0.819±0.006d
12	1.910±0.017de	0.850±0.023a	0.649±0.058cdef	0.193±0.023a	1.398±0.173abc
13	2.356±0.115ab	0.977±0.040a	0.566±0.024ef	0.187±0.100a	0.919±0.001d
14	2.135±0.015bcde	0.840±0.015a	0.702±0.002cdef	0.163±0.002a	1.160±0.058c
15	1.930±0.015cde	0.930±0.010a	0.512±0.003f	0.175±0.003a	1.453±0.058b
16	2.452±0.208a	0.950±0.153a	0.952±0.01b	0.182±0.001a	0.464±0.002f
17	2.236±0.100abc	0.850±0.153a	0.772±0.252bcde	0.230±0.200a	0.912±0.010d
18	1.890±0.153e	0.910±0.252a	0.658±0.153cdef	0.213±0.013a	1.332±0.252abc

表 5 土壤镉形态与植物吸收回归模拟方程
Table 5 Regression equation of soil Cd form and uptake of maize

因变量 Y	拟合方程	R ²	F	P
茎镉含量	Y=2.302X ₁ -3.202	0.456	15.259	0.001
叶镉含量	Y=5X ₁ -8.728	0.642	31.512	<0.001
地上部镉总量	Y=0.364X ₁ -5.40	0.462	15.627	0.001
茎转运系数	Y=0.264X ₁ -0.406	0.425	13.569	0.002
叶转运系数	Y=0.636X ₁ -1.088	0.684	37.829	<0.001
籽粒镉含量	Y=-0.161X ₂ +0.322	0.267	7.178	0.016
叶镉含量	Y=-0.202X ₂ +4.088	0.328	9.294	0.008
叶转运系数	Y=-0.248X ₂ +0.532	0.324	9.14	0.008

注:X₁为土壤可交换态镉含量;X₂为土壤残渣态镉含量。
Note:X₁-exchangeable cadmium;X₂-residual cadmium.

可交换态活性高,易被植物吸收有关。残渣态镉含量与叶镉含量、籽粒镉含量、地上部镉总量显著负相关,这可能与残渣态活性不高不易被植物利用,而且镉各形态处于动态平衡中有关。就已有的研究报道看,玉米品种之间在吸收和富集重金属方面确实存在较大差异。刘锐龙等^[5]的研究发现,在土壤中镉的浓度为0.271~0.337 mg·kg⁻¹时,京玉 11 号玉米对镉的弱吸收特性最明显,且玉米对镉的吸收能力与籽实生物量和玉米总生物量之间没有显著相关性;孙洪欣等^[6]的研究发现华北地区的 9 个夏玉米品种在吸收土壤镉

和铅方面存在显著差异。本研究发现不同玉米品种根、茎、叶、籽粒积累镉都存在显著的种间差异,这可能与实验选取的 18 个玉米品种遗传背景差异较大,基因型不同有关。聚类分析显示实验组和对照组第 1 类镉低积累类群的玉米品种基本一致,这说明供试玉米在中轻度镉污染(≤5.0 mg·kg⁻¹)土壤吸收和积累镉无显著的种间差异,可能是因为实验设置的镉污染浓度未达到玉米承受镉能力的阈值,因此未对玉米的正常生长产生太大的影响,具体的作用机制有待进一步研究。就目前的研究来看,还不能从玉米遗传学角度筛选低累积玉米品种。

从玉米可食部位重金属含量是否满足相关标准、镉富集系数和转运系数小于 1 以及产量等方面综合评价,选取新东单 16、东单 60、沈禾 118 和富友 9 作为轻度和中度镉污染耕地上种植的推荐品种。然而,目前有关低积累重金属作物品种的筛选方面还没有统一的标准^[2],玉米低积累重金属的作用机制方面研究也比较薄弱,这些工作都待进一步加强。

4 结论

(1)在外源添加镉条件下,供试的 18 个玉米品种不同部位镉含量都有明显差异,总体呈现根>叶>茎>

籽粒的规律。

(2)玉米吸收的镉与土壤可交换态镉含量有一定的正相关关系,与残渣态镉含量有一定的负相关关系。

(3)综合考虑玉米籽粒和茎叶的镉含量、富集系数以及转运系数等因素,筛选出新东单16、东单60、沈禾118和富友9为优选低积累玉米品种,说明在中轻度镉污染耕地筛选和培育玉米籽粒中镉含量较低且不超标的低积累玉米品种的方式是可行的。

参考文献:

- [1] 王丽香, 范仲学, 张欣, 等. 不同品种燕麦对镉胁迫响应的差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 14-20.
WANG Li-Xiang, FAN Zhong-xue, ZHANG Xin, et al. Response of oat cultivars to cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(1): 14-20.
- [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.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Variety difference of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1): 63-67.
- [3] Grant A C, Clarke J A, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2/3): 301-310.
- [4] 郭晓芳, 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): 367-371.
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): 367-371.
- [5] Zhang Z H, Rengel Z, Meney K. Cadmium accumulation and translocation in four emergent wetland species[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 212(1): 239-249.
- [6] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1671-1676.
CHEN Jian-jun, YU Wei, ZU Yan-qun, et al. Variety difference of Cd accumulation and translocation in zea mays[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10): 1671-1676.
- [7] 李晔, 李玉双, 孙丽娜, 等. 重金属Cd胁迫对不同玉米品种生理生化指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(5): 2627-2628.
LI Ye, LI Yu-shuang, SUN Li-na, et al. Effects of cadmium stress on physiological and biochemical indexes in different maize cultivars[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(5): 2627-2628.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 370-375.
BAO Shi-dan. *Soil agricultural chemistry analysis*[M]. Third Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 370-375.
- [9] 吴传星, 伍钧, 杨刚, 等. 重金属低积累玉米品种的筛选[C]//第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 天津: 中国农业生态环境保护协会, 2009: 363-370.
WU Chuan-xing, WU Jun, YANG Gang, et al. Screening *Zea mays* cultivars with high tolerance and low grain accumulation of heavy metals[C]//the Third National Agricultural Environmental Science Symposium. Tianjin: Chinese Association of Agricultural Ecological Environment Protection, 2009: 363-370.
- [10] 王凯荣. 农田生态系统镉污染研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2004: 15-17.
WANG Kai-rong. *Study on cadmium pollution in farming ecosystems*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2004: 15-17.
- [11] 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.
- [12] 宋菲, 郭玉文, 刘孝义, 等. 镉、锌、铅复合污染对菠菜的影响[J]. 农业环境保护, 1996, 15(1): 9-14.
SONG Fei, GUO Yu-wen, LIU Xiao-yi, et al. Effect of compound pollution of cadmium, zinc and lead on spinach in brown earth[J]. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(1): 9-14.
- [13] 林琦, 郑春荣, 陈怀满, 等. 根际环境中镉的形态转化[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 461-467.
LIN Qi, ZHENG Chun-rong, CHEN Huai-man, et al. Transformation of cadmium species in rhizosphere[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 461-467.
- [14] 王新, 周启星. 外源镉铅铜锌在土壤中形态分布特性及改性剂的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 541-545.
WANG Xin, ZHOU Qi-xing. Distribution of forms for cadmium, lead, copper and zinc in soil and its influences by modifier[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(5): 541-545.
- [15] 刘锐龙, 刘翔, 马伟芳, 等. 4种玉米对镉的弱吸收特性研究[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(7): 35-39.
LIU Rui-long, LIU Xiang, MA Wei-fang, et al. Study on cadmium absorption by four kinds of *Zea mays*[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2012, 18(7): 35-39.
- [16] 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 difference of cadmium and lead accumulation and translocation in summer maize[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12): 2068-2074.