

杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米(*Zea mays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 16-23.

DU Cai-yan, ZHANG Nai-ming, LEI Bao-kun, et al. Differences of cadmium and zinc accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 16-23.

不同玉米(*Zea mays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究

杜彩艳^{1,2}, 张乃明³, 雷宝坤¹, 胡万里¹, 付斌¹, 陈安强¹, 毛妍婷¹, 木霖⁴, 王红华⁴, 严婷婷⁴, 段宗颜^{1*}, 雷梅^{5*}

(1.云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 2.云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 3.云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 4.云南省农业环境保护监测站, 昆明 650201; 5.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 100101)

摘要: 选取 20 个玉米(*Zea mays*)品种作试验材料, 通过田间试验研究了镉-锌(Cd-Zn)复合胁迫下玉米的生长发育及其积累和转运 Cd、Zn 的差异, 以期筛选出 Cd、Zn 低积累的玉米品种。结果表明, Cd-Zn 复合胁迫下, 玉米的株高、叶面积、生物量、产量以及玉米根、茎叶和籽粒中 Cd、Zn 含量在品种间均表现出显著差异。有 2 个品种籽粒的 Cd 含量超过国家食品卫生标准($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 13 个品种茎叶的 Cd 含量超过国家饲料卫生标准($\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 所有品种籽粒和茎叶的 Zn 含量均符合国家食品卫生标准($\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 有 7 个品种的 Cd 富集系数 <1 , 13 个品种茎叶转运系数 <1 , 所有品种籽粒转运系数均 <1 ; 20 个玉米品种 Zn 的富集系数均 <1 , 有 18 个品种茎叶转运系数 <1 , 6 个品种籽粒转运系数 <1 。根据玉米生物量、产量、籽粒 Cd 和 Zn 含量、富集系数、转运系数等指标进行评价, 认为红单 6 号、红育 1 号、云优 78、平单 2 号、屏单 2 号 5 个品种可作为 Cd 低积累玉米品种, 雅玉 98 可作为 Zn 低积累玉米品种, 可分别在个旧地区 Cd、Zn 中、轻度污染土壤上推广种植。

关键词: 玉米; 镉; 锌; 积累与转运; 筛选

中图分类号: S513 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)01-0016-08 doi:10.11654/jaes.2016-0872

Differences of cadmium and zinc accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*

DU Cai-yan^{1,2}, ZHANG Nai-ming³, LEI Bao-kun¹, HU Wan-li¹, FU Bin¹, CHEN An-qiang¹, MAO Yan-ting¹, MU Lin³, WANG Hong-hua³, YAN Ting-ting³, DUAN Zong-yan^{1*}, LEI Mei^{5*}

(1. Institute of agricultural Environment & Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 2. Plant Protection College, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. Agricultural Environmental Protection Monitoring Station of Yunnan Province, Kunming 650201, China; 5. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10010, China)

Abstract: In the heavy metal contaminated soil of cadmium-zinc(Cd-Zn), the effects of Cd and Zn on the growth of 20 maize varieties along with differences of Cd and Zn accumulation and transfer between different maize varieties were studied in field experiments. The purpose of the field experiments was to screen out maize varieties with low accumulation ability of Cd and Zn. The results showed that there were significant differences among 20 maize varieties of plant height, leaf area, biomass as well as yield under combined stress of Cd and Zn. Meanwhile, there were significant differences among 20 maize varieties of Cd and Zn uptake by root, stem and leaf, kernels Cd and Zn accumulation and translocation ability($P < 0.05$). The seed Cd contents of 2 varieties were more than the food sanitation standards set by the state ($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The stem and leaf Cd contents of 13 varieties were more than the national feed hygiene standard ($\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The kernel stem and leaf Zn contents of 20 varieties conformed to the food sanitation standards ($\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The Cd enrichment coefficients of 7 maize species <1 , the stem and leaf transfer coefficient of 13 maize species <1 , and all the seed transport coefficients were less than 1. Data analysis results showed that there were still certain absorption capacity of the maize to soil Cd, but the transport capacity from root to

收稿日期: 2016-07-02

作者简介: 杜彩艳(1977—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养和环境生态方面研究。E-mail: caiyandu@126.com

* 通信作者: 段宗颜 E-mail: duanzongyan@163.com; 雷梅 E-mail: leim@igsnr.ac.cn

基金项目: 中科院国际合作项目(GJHZ201308)

Project supported: The International Joint Research Program of Chinese Academy of Sciences(GJHZ201308)

shoot and from stem and leaf to grain was weak——The Zn enrichment coefficients of 20 maize species < 1, the stem and leaf transfer coefficient of 18 maize species < 1, and the seed transport coefficients of 6 maize species < 1. Data analysis results showed that the absorption capacity of the maize to soil Zn and the transport capacity from shoot and stem to grain were strong. Evaluated by the index of maize biomass, grain yield, Cd and Zn content, Cd and Zn enrichment coefficient and transfer coefficient, 5 varieties of Hong Dan 6, Hong Yu 1, Yun You 78, Ping Dan 2 and Ping Dan 2 could be used as Cd low accumulation Maize Varieties, and Ya Yu 98 could be used as Zn low accumulation Maize Varieties, and were fit to be planted in Cd, Zn polluted soil in Gejiu lightly and moderately.

Keywords: *Zea mays*; cadmium; zinc; accumulation and translocation; screening

由于工农业的迅猛发展及各种人类活动的干扰,农田土壤重金属污染日益严重,极大地影响着土壤环境质量、作物生长、产量、品质与安全性,严重制约着农业可持续发展,进而威胁着人类健康^[1-2]。云南是著名的“有色金属王国”,矿产资源十分丰富,而位于滇南的个旧矿区是云南省传统的超大型多金属矿区,是中外闻名的“锡都”。由于采、选、冶历史悠久,矿业活动频繁,在矿区繁荣发展的同时,个旧及周边地区的生态环境已经遭到严重破坏^[3-4],使得矿区周边农田土壤受到不同程度的重金属污染,严重影响当地的农产品品质。如何有效减少重金属在这一区域农作物中的富集和累积,从而保障农业安全生产,已成为当前农业和环境科学交叉领域的研究热点之一。

目前,对于控制重金属向食物链中转移主要从两方面着手:通过化学固定降低土壤中重金属的活性使其钝化^[5];通过筛选出对于重金属抗性强、累积量低的农作物品种进行种植^[6-8]。研究证实,植物吸收和累积重金属不仅存在显著的植物种间差异,同时存在种内差异^[9-10]。近年来,众多研究者已对不同作物品种的重金属低积累品种的筛选进行了相关研究。郭晓芳等^[11]通过田间试验,研究了8个玉米品种对重金属Cd、Pb、Zn和Cu累积与转运的品种差异,筛选出适合广东地区低温季节种植的重金属低累积玉米品种。刘维涛等^[12]已筛选出部分小麦Cd低积累品种,应用于生产并取得了理想效果。陈建军等^[13]通过外源添加氯化镉的田间试验,筛选出云瑞8号、会单4号、路单7号3个品种为Cd低累积玉米品种,可推荐在云南Cd重

度污染土壤上推广种植。然而以往有关玉米重金属低积累品种筛选的研究大多都是基于当地条件进行的,其研究结果具有很强的地区性,针对个旧开展重金属低积累玉米品种的筛选研究是十分必要的。

本文以云南个旧广泛种植的20个不同玉米品种为试验材料,在Cd-Zn复合污染条件下,通过大田试验,研究Cd-Zn胁迫对玉米不同品种生长的影响,以及玉米不同品种对Cd、Zn的吸收和积累差异,旨在筛选出适合个旧地区种植的具有Cd、Zn低积累潜力的玉米品种,既为培育Cd、Zn低积累玉米品种提供科学依据,也可为其他农作物的低积累品种筛选提供必要的参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地位于个旧市鸡街镇石榴坝村污染水旱轮作农田(103°9'26"E, 23°32'11"N, 海拔高度1125 m),其基本理化性状为:pH6.35,有机质含量42.01 g·kg⁻¹,碱解氮含量165.47 mg·kg⁻¹,有效磷含量79.38 mg·kg⁻¹,速效钾含量226.53 mg·kg⁻¹,全氮含量2.26 g·kg⁻¹,全磷含量2.08 g·kg⁻¹,全钾含量11.64 g·kg⁻¹,Cd含量0.46 mg·kg⁻¹,Zn含量368.31 mg·kg⁻¹。根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995),研究区域土壤中重金属Cd、Zn含量分别超出二级标准限值1.53、1.84倍。

供试玉米品种20个(表1),均为个旧市广泛种植的玉米品种,购自云南省农业科学院粮食作物研究所及个旧市当地种子销售点。

表1 供试玉米品种

Table 1 The cultivars of *Zea mays*

编号	品种	编号	品种	编号	品种	编号	品种
1	云瑞88	6	红单6号	11	路单3号	16	子玉2号
2	云瑞2号	7	兴黄单892	12	路单12号	17	子玉5号
3	云瑞10号	8	红育1号	13	平单2号	18	屏单2号
4	云瑞220	9	云优167	14	蒙玉2号	19	雅玉98
5	云瑞47	10	云优78	15	金粒1号	20	佛单5号

1.2 试验设计

以20个玉米品种为供试材料,采用随机播种的方法进行玉米种植,每个品种设3次重复,共60个小区,行间距60 cm×50 cm,小区面积30 m²(5 m×6 m);同时在试验地四周设置2行玉米作为保护行,以消除边际效应。

试验于2015年5月10日直接点播,5月29日定苗,2015年9月13日一次性收获。播种前施“肥力番”复合肥(15-15-15,总养分≥45%)做基肥,施用量600 kg·hm⁻²;拔节期追施尿素,施用量300 kg·hm⁻²。田间管理按大田常规操作进行。

1.3 样品采集与分析

玉米种植前(背景值)、收获后采用“梅花”形取样法采集表层(0~20 cm)土壤样品,风干后分别过20、60、100目筛备用。土壤有机质、pH值、N、P、K均采用《土壤农业化学分析方法》^[14]中的方法进行测定。土壤中Cd、Zn全量分析采用HCl-HNO₃-HF-HClO₄消解法(GB/T 17141—1997),消解液中Cd、Zn含量采用ICP-MS(Agilent 7500a)和原子荧光(AFS 2202E)进行测定。

玉米成熟后测定产量,选取具有代表性的1行玉米,以间隔式的方式选取4株,将果穗取下立即称鲜质量,放入网袋中带回实验室进行考种,最后再通过出籽率、籽粒含水量(按14%含水量折算)测算出实际产量,即玉米的经济产量(kg·hm⁻²)=单株干重(kg)×每公顷实有株数。同时采用“梅花”形取样法分别对各小区进行玉米植株(秸秆和籽实)的采集,分别用去离子水洗净,将植株根系、茎叶、籽粒分离,在105℃杀青30 min,70℃烘干至恒重,分别测定干重(DW)。玉米籽粒烘干样品粉碎过40目筛备用。采用硝酸-双氧水微波消解法(GB/T 5009—2010)测定玉米籽实和秸秆中Cd、Zn含量,测定方法同上。

玉米收获时,用卷尺测定其株高、叶片长和最大叶宽,叶面积=Σ(叶长×叶宽×0.75)。

1.4 数据处理

所有数据的平均值、标准差采用Microsoft Excel 2013软件处理,数据的方差分析、相关性分析及聚类分析采用SPSS 16.0软件。

富集系数(BCF)=玉米地上部重金属含量/土壤相应元素含量^[15]

籽粒转运系数(TF)=玉米籽粒重金属含量/茎叶重金属含量^[16]

茎叶转运系数=玉米茎叶重金属含量/根中相应

元素含量^[12,16]

富集系数用于表征植物对重金属元素的吸收积累能力,富集系数越大表明植物对重金属的吸收能力越强;转运系数用于表征重金属通过根部进入地上部转运及地上部不同器官转运的能力,转运系数越大表明重金属从根系向地上部器官转运能力越强,或在器官之间的转运能力越强。

2 结果与分析

2.1 玉米生长及产量差异分析

在Cd-Zn复合胁迫下,不同玉米品种的生长情况和产量存在显著差异(P<0.05)。由表2可知:20个玉米品种的平均株高为286.2 cm,最高的是9号品种,达到305.50 cm,其次是3号品种,且两者之间无显著差异,1号品种最低,为258.50 cm。20个不同玉米品种的叶面积范围为856.80~1 075.25 cm²,平均叶面积为941.59 cm²。叶面积最大的是20号品种,为1 075.30 cm²,其次是15号品种,但两者间差异不显著。参试玉米的平均地上部生物量为151.67 g,最高的是6号品种,达到184.92 kg,7号品种次之,但两者间无显著差异,最低的是12号品种,为129.05 g。参试玉米的平均地下部生物量为14.40 g,最高的是20号品种,达到21.92 g,19号品种次之,但两者间差异不显著,最低的是4号品种,为7.76 g。

就玉米产量而言,20个玉米品种的产量范围为7125~1076 kg·hm⁻²,平均产量9105 kg·hm⁻²,产量最高的是10号品种,达10 761 kg·hm⁻²,18号品种产量次之,为10 758 kg·hm⁻²,20号品种产量第三,为10 652 kg·hm⁻²,三者间无显著差异(表2)。

2.2 玉米根、茎叶和籽粒中Cd、Zn含量差异分析

由表3可见,20个玉米品种在相同Cd-Zn复合胁迫下,各器官Cd、Zn含量差异显著(P<0.05)。Cd在玉米体内的分配规律总体上为茎叶>根>籽粒。茎叶Cd含量范围和平均值分别为0.27~1.03 mg·kg⁻¹和0.59 mg·kg⁻¹,根部为0.45~0.78 mg·kg⁻¹和0.58 mg·kg⁻¹,籽粒为0.06~0.31 mg·kg⁻¹和0.12 mg·kg⁻¹。在Cd-Zn复合胁迫下,参试玉米中有2个品种籽粒的Cd含量超过了国家食品卫生标准(≤0.2 mg·kg⁻¹),占所有供试品种的10%。此外,20个参试品种中有7个品种茎叶的Cd含量达标,其余13个品种茎叶的Cd含量均超过了国家饲料卫生标准(≤0.5 mg·kg⁻¹),超标率65%。

Zn在植株内的分配规律总体上为根>籽粒>茎

表2 不同玉米品种的生长和产量差异

Table 2 The differences in growth and yield of different varieties of maize

编号	株高/cm	叶面积/cm ²	生物量(DW)/g·株 ⁻¹		产量/kg·hm ⁻²
			地上部 Shoot	根部 Root	
1	258.50±2.12j	856.80±17.25hij	130.56±7.40gh	11.87±1.36fghi	8 577.90±135.30g
2	290.50±6.36abcdef	928.90±0.92defghi	155.20±9.51de	10.13±1.27ghi	8 278.80±274.95g
3	305.00±7.07a	954.10±19.94bcdefgh	159.99±13.98cd	18.00±3.61abcd	9 943.20±112.80b
4	283.50±2.12cdefgh	874.50±10.61fghij	150.48±0.71def	7.76±0.39i	8 354.10±230.40g
5	289.00±5.66bcdfeg	964.00±5.85bcdef	146.31±6.43defg	9.82±3.76hi	9 154.50±29.25de
6	297.00±9.90abc	903.00±80.61efghij	184.92±11.00a	13.21±0.80efgh	9 528.00±352.20bcd
7	279.50±4.95defghi	1 035.01±23.35abc	182.12±16.47ab	16.69±4.28bcde	9 357.90±103.95cde
8	287.00±9.90bcdefg	939.90±84.78cdefghi	160.80±2.67cd	18.80±1.05abc	9 912.60±370.80b
9	305.50±7.07a	907.30±8.06efghij	165.00±3.82bcd	13.85±0.84defg	9 486.30±173.55bcde
10	279.00±1.41efghi	860.00±42.00ghij	158.74±0.35cd	11.83±1.99fghi	10 760.70±177.75a
11	273.50±9.19ghi	961.00±36.77bcdefg	136.44±1.61efg	11.57±0.25fghi	8 452.50±30.15g
12	298.00±11.31abc	1 049.50±15.63ab	129.05±4.77gh	15.97±1.28cdef	9 785.40±78.00bc
13	275.00±7.07fghi	986.40±0.85abcde	159.04±6.30cd	15.12±0.47cdef	8 489.70±113.25g
14	266.50±4.95ij	839.30±105.01ij	139.89±11.04efg	18.02±2.90abcd	7 126.20±11.10h
15	290.00±1.41abcdef	1 071.00±14.85a	177.11±16.14abc	14.56±1.11cdefg	8 643.90±310.95fg
16	300.00±5.66ab	876.20±42.71fghij	135.20±4.68fg	10.33±0.28ghi	9 036.00±343.65ef
17	293.50±7.78abcde	1 020.20±42.71abcd	135.29±1.49f	13.95±0.77defg	7 450.50±303.30h
18	287.50±6.36bcdefg	809.80±33.59j	136.54±2.74e	13.76±0.28defgh	10 758.30±34.35a
19	295.00±7.07abc	919.70±23.12efgi	115.64±2.35h	20.92±0.40ab	8 196.90±138.75g
20	271.00±1.41dhij	1 075.30±8.13a	175.06±4.41abc	21.92±1.27a	10 652.10±62.4a
平均值	286.20	941.59	151.67	14.40	9 104.85

注:平均值±标准误(n=3),同一列不同字母表示各品种之间差异显著(P<0.05, Duncan法)。下同。

叶。根部 Zn 含量范围和平均值分别为 28.86~68.55 mg·kg⁻¹ 和 48.58 mg·kg⁻¹, 茎叶为 19.90~41.71 mg·kg⁻¹ 和 31.69 mg·kg⁻¹, 籽粒为 26.14~43.38 mg·kg⁻¹ 和 35.10 mg·kg⁻¹。在 Cd-Zn 复合胁迫下 20 个玉米品种中籽粒和茎叶的 Zn 含量均符合国家食品卫生标准 (≤50 mg·kg⁻¹)。

2.3 玉米 Cd、Zn 积累和转运的品种差异分析

富集系数通常能直观地表征植物对重金属的吸收积累能力。由表 4 可知, Cd-Zn 复合胁迫条件下 20 个玉米品种对土壤中 Cd、Zn 的吸收积累能力存在显著差异(P<0.05)。20 个玉米品种 Cd 的富集系数为 0.618~2.436, 其中 6、8、9、10、13、17、18 号 7 个品种的富集系数<1, 说明这 7 个玉米品种地上部对土壤 Cd 的吸收能力较弱, 其余 13 个品种较强。20 个玉米品种地上部 Zn 的富集系数为 0.056~0.131, 均小于 1, 说明所有参试玉米地上部对土壤 Zn 的吸收能力较弱。

玉米籽粒和茎叶中 Cd、Zn 含量的变化特征与玉米不同部位重金属的迁移能力有关。因此, 在初步了解各品种对 Cd、Zn 积累程度的基础上, 通过转运系

数进一步考查 Cd、Zn 由茎叶向籽粒转运的能力是否存在品种差异。从转运系数(表 4)来看, 参试玉米品种中 Cd 的茎叶转运系数、籽粒转运系数范围分别为 0.495~2.187、0.094~0.992, 且品种间差异显著(P<0.05), 其中 12 个品种茎叶转运系数<1, 而所有品种籽粒转运系数均<1, 说明这 12 个玉米品种对 Cd 由地下部向地上部转运能力较弱, 而且参试 20 个不同玉米品种对 Cd 由茎叶向籽粒的转运能力均较弱。20 个玉米品种 Zn 的茎叶转运系数、籽粒转运系数范围分别为 0.410~1.089、0.797~2.183, 各品种之间差异显著(P<0.05), 其中有 18 个品种的茎叶转运系数<1, 说明这 18 个玉米品种 Zn 茎叶转运能力均较弱; 参试玉米中 2、3、4、5、6、19 号 6 个品种籽粒转运系数<1, 说明这 6 个玉米品种对 Zn 从茎叶向籽粒的转运能力较弱, 其余 14 个品种转运系数均>1, 表明多数玉米品种对 Zn 从茎叶向籽粒的转运能力较强。

2.4 玉米籽粒中 Cd、Zn 含量的聚类分析

为了区分玉米不同品种籽粒对 Cd、Zn 的积累能力, 从而筛选出具有 Cd、Zn 低积累潜力的玉米品种,

表3 不同玉米品种根、茎叶和籽粒中重金属 Cd、Zn 含量

Table 3 Cd, Zn concentrations in root, stem leaf and grain of different varieties of maize

编号	Cd/mg·kg ⁻¹			Zn/mg·kg ⁻¹		
	根	茎叶	籽粒	根	茎叶	籽粒
1	0.47±0.02cd	1.03±0.02a	0.31±0.01a	44.34±0.16hij	32.08±0.26bcd	35.08±0.55bcde
2	0.55±0.01bcd	0.97±0.00b	0.09±0.01efgh	47.36±0.91fgh	36.85±0.81abc	35.03±0.55bcde
3	0.45±0.03d	0.86±0.02c	0.07±0.00ghi	38.59±0.45k	41.71±0.93a	33.38±1.48def
4	0.55±0.01bcd	0.75±0.02e	0.09±0.01efgh	54.69±0.58bcd	37.17±0.47abc	34.69±1.21cde
5	0.64±0.01abcd	0.64±0.03g	0.09±0.01fgh	53.86±0.92bcde	36.54±1.05abc	31.22±1.73efg
6	0.53±0.04bcd	0.39±0.01j	0.06±0.01i	53.22±0.69bcde	39.13±2.49ab	31.08±1.47efg
7	0.55±0.01bcd	0.82±0.02d	0.08±0.01fghi	46.68±0.11ghi	34.24±2.65abcd	36.26±1.51bcd
8	0.55±0.01bcd	0.37±0.01j	0.08±0.01fghi	46.70±0.04ghi	28.56±0.40cde	37.16±0.58bcd
9	0.53±0.05bcd	0.27±0.04k	0.20±0.01bc	42.16±0.01ijk	19.90±1.72e	43.22±1.23a
10	0.48±0.06cd	0.39±0.03j	0.07±0.01ghi	40.72±1.55jk	28.66±0.56cde	35.05±1.71bcde
11	0.61±0.07abcd	0.60±0.00gh	0.12±0.01de	50.29±0.01defg	24.95±1.49de	38.90±1.63b
12	0.72±0.02bc	0.55±0.02i	0.22±0.01b	68.55±0.11a	28.02±1.30cde	30.68±1.17fg
13	0.64±0.17abc	0.39±0.00j	0.09±0.01efg	57.89±1.57b	26.65±1.24de	38.85±2.13b
14	0.52±0.11bcd	0.58±0.01hi	0.07±0.03ghi	28.86±1.12l	31.59±0.21bcd	36.28±2.11bcd
15	0.57±0.08bcd	0.70±0.00f	0.14±0.02d	50.36±0.62defg	38.66±0.78ab	43.38±2.21a
16	0.64±0.14abcd	0.54±0.00i	0.09±0.01efgh	44.26±1.62hij	30.39±1.81bcd	33.94±1.21def
17	0.56±0.04bcd	0.36±0.04j	0.11±0.01ef	56.17±0.81bc	28.40±0.33cde	34.76±1.18cde
18	0.53±0.01bcd	0.37±0.01j	0.07±0.01hi	51.87±0.52cdef	25.84±0.67de	28.38±2.44gh
19	0.78±0.01a	0.61±0.00gh	0.19±0.01c	46.00±0.19ghi	31.51±1.01bcd	26.14±1.62h
20	0.64±0.02abcd	0.70±0.03f	0.12±0.01de	49.02±0.24efgh	32.88±0.62abcd	38.56±1.67bc
平均值	0.58	0.59	0.118	48.58	31.69	35.10
饲料卫生标准			0.5			未颁布
食品卫生标准			0.2			50

注:食品卫生标准(GB 2762—2012);饲料卫生标准(GB 13078—2001)。

对 20 个玉米品种籽粒中的 Cd、Zn 含量分别进行聚类分析,结果见图 1、图 2。所有参试玉米的生长环境均一致,环境对玉米吸收 Cd、Zn 的影响也一致,因此玉米不同品种 Cd、Zn 含量差异来自其对 Cd、Zn 的吸收、转运及积累能力。

由图 1 可知,可将参试的 20 个玉米品种籽粒对 Cd 的积累差异划分为四类:2、3、4、5、6、7、8、10、13、14、16、18 号品种代表籽粒中 Cd 含量较低一类,为 Cd 低积累类群,其籽粒平均 Cd 含量为 0.066 mg·kg⁻¹,变化范围为 0.06~0.07 mg·kg⁻¹;1 号品种为一类,代表籽粒中 Cd 含量较高,为 Cd 高积累类群,其籽粒 Cd 含量为 0.31 mg·kg⁻¹,超过食品卫生标准(≤0.2 mg·kg⁻¹);其他两类代表籽粒中 Cd 含量处于中等水平,为 Cd 中等积累类群,变化范围为 0.08~0.22 mg·kg⁻¹,其中 12 号品种籽粒 Cd 含量超过食品卫生标准(≤0.2 mg·kg⁻¹)。

从图 2 可以看出,参试的 20 个玉米品种可以分

为三类:5、6、12、18、19 号 5 个品种代表籽粒中 Zn 含量较低一类,为 Zn 低积累类群,其籽粒平均含量为 29.50 mg·kg⁻¹,变化范围为 26.14~31.22 mg·kg⁻¹,均没有超过国家食品卫生标准(≤50 mg·kg⁻¹);9、15 号品种为一类,代表籽粒中 Zn 含量较高,为 Zn 高积累类群,其籽粒 Zn 含量分别为 43.22、43.38 mg·kg⁻¹;其他一类代表籽粒中 Zn 含量处于中等水平,为 Zn 中等积累类群。

3 讨论

作物吸收重金属,主要取决于作物本身的遗传因素及外界的环境条件^[17-18]。土壤 Cd-Zn 复合胁迫下,20 个玉米品种生物量、产量差异显著,该研究结果与以往的研究结果一致^[13,19-20]。不同玉米品种产量差异大的原因主要在于玉米品种间本身的遗传差异,以及不同品种玉米对 Cd、Zn 胁迫的耐性差异。

本试验条件下 20 个玉米品种中只有 7 个品种的

表4 不同玉米品种 Cd、Zn 的富集系数与转运系数

Table 4 The bioconcentration factors and translocation factors of Cd, Zn of different varieties of maize

编号	Cd			Zn		
	BCF	茎叶 TF	籽粒 TF	BCF	茎叶 TF	籽粒 TF
1	2.436a	2.187a	0.401bc	0.099bcd	0.723bcd	1.105cd
2	2.267a	1.749bc	0.107c	0.109abc	0.779b	0.958d
3	1.980b	1.929ab	0.094c	0.131a	1.086a	0.801d
4	1.796bc	1.368de	0.099c	0.115ab	0.680bcdef	0.934d
5	1.429de	0.991fghi	0.189c	0.107abc	0.679bcdef	0.855d
6	0.941f	0.727hij	0.153c	0.113abc	0.735bc	0.797d
7	1.919bc	1.480cd	0.099c	0.104def	0.735bc	1.061cd
8	0.806fg	0.670ij	0.222c	0.081abcd	0.605bcdefg	1.420bc
9	0.618g	0.495j	0.992a	0.056f	0.472efg	2.183a
10	0.885fg	0.810ghij	0.181c	0.082def	0.705bcde	1.222bcd
11	1.440de	0.989fghi	0.185c	0.069ef	0.496defg	1.559b
12	1.320d	0.761hij	0.547b	0.082cdef	0.410g	1.096cd
13	0.921f	0.632ij	0.272bc	0.080def	0.461fg	1.461bc
14	1.312d	1.159defg	0.126c	0.092bcde	1.089a	1.193bcd
15	1.648cd	1.340def	0.235c	0.108abc	0.769b	1.123bcd
16	1.226d	0.878ghi	0.203c	0.083cdef	0.688bcdef	1.120bcd
17	0.881fg	0.653ij	0.362bc	0.083cdef	0.505cdefg	1.235bcd
18	0.907f	0.695ij	0.179c	0.078def	0.498defg	1.100cd
19	1.398de	0.778hij	0.181c	0.090bcde	0.685bcdef	0.829d
20	1.646cd	1.096efgh	0.135c	0.095bcde	0.671bcdef	1.174bcd

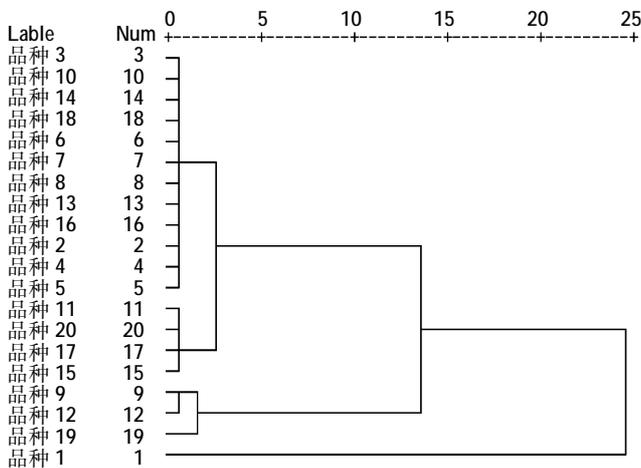


图1 不同玉米品种籽粒中 Cd 含量聚类分析

Figure 1 The hierarchical clustering analysis diagram of Cd concentrations in grain of different varieties of maize

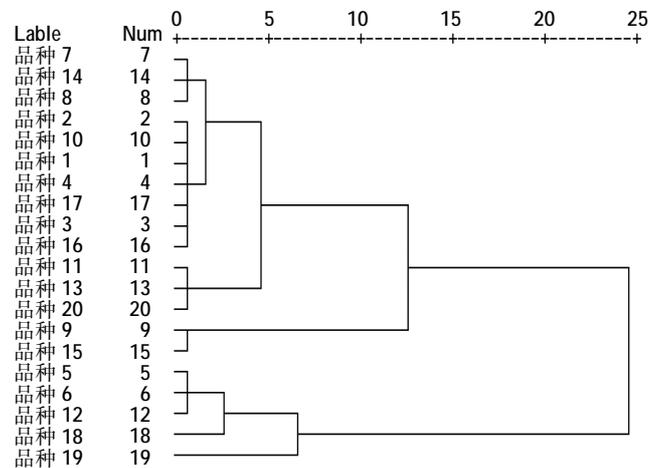


图2 不同玉米品种籽粒中 Zn 含量聚类分析

Figure 2 The hierarchical clustering analysis diagram of Zn concentrations in grain of different varieties of maize

Cd 的富集系数 < 1, 表明玉米对 Cd 的吸收能力较强, 玉米茎叶 Cd 含量远高于根部, 与陈建军等^[13]的研究结果不一致; 参试玉米中有 12 个品种 Cd 的茎叶转运系数 < 1, 表明玉米对 Cd 通过地下部向地上部的转运能力较弱, 与李凡等^[21]和陈建军等^[13]研究结果一致。本

研究中 Cd 的籽粒转运系数为 0.082~0.400, 与郭晓芳等^[11]的研究结果类似, 但远高于陈建军等^[13] 0~0.111 的结果。另外, 本试验条件下, 不同玉米品种 Zn 富集系数为 0.056~0.131, 均 < 1, 说明参试玉米地上部对土壤 Zn 的吸收能力较弱。参试玉米中有 14 个品种的

Zn 籽粒转运系数 >1 , 说明这 14 个玉米品种对 Zn 从茎叶向籽粒的转运能力较强, 多数参试玉米品种 Zn 籽粒转运系数大于茎的转运系数, 原因可能是: Cd-Zn 复合污染条件下, Cd、Zn 之间的协同作用导致 Zn 的溶解性增强, 促使 Zn 从根部向顶部转移^[2]。Zn 是一种比较活泼的元素, 不仅向上转移系数高而且向籽粒的迁移率也很高。这些研究结果之间存在一些差异或矛盾, 可能是由于不同区域、不同生长环境以及不同品种的玉米对重金属的积累能力存在极其显著的差异所致。由此可以推测以上研究中明显的差异主要来自于生长环境与玉米品种的遗传因素不同, 特别是不同的土壤 pH 值。本研究土壤 pH 为 6.35, 陈建军等^[3]的研究土壤 pH 值为 6.95, 中性或碱性土壤条件能降低土壤重金属的生物有效性, 有效降低玉米对重金属的吸收、转运与积累。

参试的 20 个玉米品种 Cd 在玉米体内的分配规律一般为茎叶 $>$ 根 $>$ 籽粒, Zn 在玉米体内的分配规律一般为根 $>$ 籽粒 $>$ 茎叶。这与以往研究基本一致^[23]。但有研究发现, 参试的 20 个玉米品种各器官 Cd 质量分数差异显著($P<0.05$), 大小顺序为根 $>$ 茎叶 $>$ 籽粒^[3]。可见, 不同玉米品种不同器官重金属含量的分配规律有所差异, 其原因可能与供试品种、重金属类型和种植土壤等不同有关。此外, 本试验条件下玉米籽粒 Zn 含量高于茎叶含量, 原因可能在于 Zn 是一种移动性很强的元素, 当植物不缺 Zn 时, 有大量的 Zn 从老叶向新生组织转移, 从而导致籽粒 Zn 含量较高。

目前, 对于重金属低积累作物还没有明确的定义。刘维涛等^[12]认为理想的重金属低积累作物应该同时具备以下特征: ①该植物的地上部和地下部重金属含量均很低或者其可食部位重金属含量低于国家相关标准; 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。

本研究中, 受 Cd-Zn 复合胁迫的 20 个玉米品种生物量、产量, 根、茎叶和籽粒中 Cd 含量, 富集系数和转运系数均存在显著差异。结合籽粒 Cd 含量以及聚类分析结果来看, 云瑞 2 号(2 号)、云瑞 10 号(3 号)、云瑞 220(4 号)、云瑞 47(5 号)、红单 6 号(6 号)、兴黄单 892(7 号)、红育 1 号(8 号)、云优 78(10 号)、平单 2 号(13 号)、蒙玉 2 号(14)、子玉 2 号(16 号)、屏单 2 号(18 号)12 个品种籽粒 Cd 含量为

0.07~0.09 mg·kg⁻¹, 没有超过国家食品卫生标准(≤ 0.2 mg·kg⁻¹), 12 个品种均属于 Cd 低积累类群。同时, 12 个品种的茎叶富集系数和籽粒转运系数范围分别为 0.806~2.267、0.096~0.241, 其中只有 6、8、10、13、18 号 5 个品种的富集系数小于 1, 12 个品种的籽粒转运系数均小于 1。从玉米生长情况、生物量和产量来看, 6、8、10、13、18 号 5 个品种对 Cd 的耐性较强, 生物量和产量没有明显降低。因此, 红单 6 号(6 号)、红育 1 号(8 号)、云优 78(10 号)、平单 2 号(13 号)、屏单 2 号(18 号)5 个品种可作为 Cd 低积累玉米品种。受 Cd-Zn 复合胁迫的 20 个玉米品种生物量、产量, 根、茎叶和籽粒中 Zn 含量, 富集系数和转运系数均存在明显差异。结合籽粒中 Zn 含量以及聚类分析结果来看, 云瑞 47(5 号)、红单 6 号(6 号)、路单 12 号(12 号)、屏单 2 号(18 号)、雅玉 98(19 号)5 个品种籽粒 Zn 含量为 26.14~31.22 mg·kg⁻¹, 均没有超过国家食品卫生标准(≤ 50 mg·kg⁻¹), 属于 Zn 低积累类群。另外, 其茎叶富集系数和籽粒转运系数范围分别为 0.078~0.113、0.797~1.100, 其中 5、6 号品种的茎叶富集系数 >1 , 12、18 号品种籽粒富集系数 >1 。从玉米生长情况、生物量和产量来看, 19 号品种对 Zn 的耐性较强, 生物量和产量没有明显降低。因此, 雅玉 98(19 号)可作为 Zn 低积累玉米品种。

4 结论

(1) Cd-Zn 复合污染条件下 20 个玉米品种的生物量及产量存在显著的品种差异。

(2) 不同玉米品种各器官吸收、积累 Cd、Zn 的能力存在明显的差异。Cd 在玉米体内的分配规律总体上为茎叶 $>$ 根 $>$ 籽粒, Zn 在玉米体内的分配规律总体上为根 $>$ 籽粒 $>$ 茎叶。

(3) 不同玉米品种各器官转运 Cd、Zn 的能力存在明显差异, 其中 7 个品种的 Cd 富集系数 <1 , 13 个品种茎叶转运系数 <1 , 所有品种籽粒转运系数均 <1 ; 所有品种 Zn 的富集系数均 <1 , 其中 18 个品种茎叶转运系数 <1 , 6 个品种籽粒转运系数 <1 。

最终认为: 红单 6 号、红育 1 号、云优 78、平单 2 号、屏单 2 号 5 个品种可作为 Cd 低累积玉米品种, 雅玉 98 可作为 Zn 低积累玉米品种, 可分别在个旧的 Cd、Zn 中、轻度污染土壤上推广种植。

参考文献:

[1] 丁竹红, 尹大强, 胡 忻, 等. 矿区附近农田土壤中重金属和矿质元

- 素浸提研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1774-1778.
- DING Zhu-hong, YIN Da-qiang, HU Xin, et al. Extraction of heavy metals and mineral elements in agricultural soils around mine area using biodegradable and non-biodegradable Chelators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1774-1778.
- [2] 朱宇恩, 赵 焯, 李 强, 等. 北京城郊污灌土壤-小麦(*Triticum aestivum*)体系重金属潜在健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 263-270.
- ZHU Yu-en, ZHAO Ye, LI Qiang, et al. Potential influences of heavy metal in "soil-wheat (*Triticum aestivum*)" system on human health: A case study of sewage irrigation area in Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 263-270.
- [3] 谭 刚. 个旧锡业开发与生态环境变迁(1890—1949)[J]. 中国历史地理理论丛, 2010, 25(1): 16-25.
- TAN Gang. On the connection between tin industry development and changes of ecological environment in Gejiu an surrounding areas(1890—1949)[J]. *Journal of Chinese Historical Geography*, 2010, 25(1): 16-25.
- [4] 宋雁辉, 钟正燕, 李红梅, 等. 云南个旧多金属矿区农田土壤-作物系统重金属污染现状: 以乍甸镇为例[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(1): 138-145.
- SONG Yan-hui, ZHONG Zheng-yan, LI Hong-mei, et al. Heavy metal pollution in-situ in farming soil-crop system in multi metal mining area: A case study of Zhadian Town, Gejiu City, Yunnan[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(1): 138-145.
- [5] 杜彩艳, 木 霖, 王红华, 等. 不同钝化剂及其组合对玉米(*Zea mays*)生长和吸收 Pb、Cd、As、Zn 影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1515-1522.
- DU Cai-yan, MU Lin, WANG Hong-hua, et al. Effects of different amendments on growth and Pb, Cd, As, Zn uptake by *Zea mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1515-1522.
- [6] Zhang G, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seeding stage[J]. *Field Crops Research*, 2002, 77(2): 93-98
- [7] Liu W T, Zhou Q X, An J, et al. Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173: 737-743.
- [8] Liu W T, Zhou Q X, Zhang Y L, et al. Lead accumulation in different Chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91: 781-788.
- [9] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390: 301-310.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈建军, 于 蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)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.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 12-15, 211-214.
- LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 1999: 12-15, 211-214.
- [15] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. Principles and methods of contaminated soil remediation[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [16] Fayiga A O, Ma L Q, Cao X D, et al. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 13(2): 289-296.
- [17] Gareth J H, Guilan D, Tapash D, et al. Environmental and genetic control of common cultivars grown in contaminated sites across bangladesh, China and India[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(21): 8381-8386.
- [18] 段桂兰, 张红梅, 刘云霞, 等. 水稻基因类型与生长环境对精米中砷积累的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(2): 156-162.
- DUAN Gui-lan, ZHANG Hong-mei, LIU Yun-xia, et al. Impact of rice genotype and growing environment on arsenic accumulation in rice polished grains[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 8(2): 156-162.
- [19] 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.
- [20] 谈宇荣, 徐晓燕, 丁永祯, 等. 旱稻吸收砷镉的基因型差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1436-1443.
- TAN Yu-rong, XU Xiao-yan, DING Yong-zhen, et al. Genotypic variation of arsenic and cadmium uptake by upland rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1436-1443.
- [21] 李 凡, 张义贤. 单一及复合污染下铅镉在玉米幼苗体内积累与迁移的动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 19-24.
- LI Fan, ZHANG Yi-xian. Dynamics of accumulation and distribution of Cu, Pb in *Zea mays* L. seedlings under single or combined pollution of Cu and Pb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1): 19-24.
- [22] Ding G A, Yu S Q. Air, water and soil environmental pollution and regulation mechanisms in Beijing and its ambient area: Observational experiment conducted[J]. *Annual Report of CAMS*, 2001: 20-21.
- [23] 吴传星. 不同玉米品种对重金属吸收累积特性研究[D]. 四川农业大学, 2010.
- WU Chuan-xing. Study on characteristics of heavy metal absorption and accumulation in the different maize varieties[D]. Sichuan Agricultural University, 2010.