

引用格式:

武清贵, 田丰, 郑冉, 吕丹, 刘松芹, 罗红兵. 不同品种玉米镉的积累特性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(4): 389–394.

WU Q G, TIAN F, ZHENG R, LYU D, LIU S Q, LUO H B. Cadmium accumulation characteristics in different maize varieties[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(4): 389–394.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同品种玉米镉的积累特性

武清贵^{1,2}, 田丰³, 郑冉^{1,2}, 吕丹^{1,2}, 刘松芹^{1,2}, 罗红兵^{1,2*}

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省玉米工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128; 3.浏阳市农业发展事务中心, 湖南 浏阳 410399)

摘 要: 以 8 个玉米品种为材料, 在 2 个地区开展田间试验, 研究在不同土壤镉浓度下成熟期玉米各器官(根、茎、叶及籽粒)吸收镉(Cd)的特性, 比较各器官的 Cd 含量差异, 并对各器官的 Cd 含量进行相关性分析。在浏阳基地, 不同品种玉米的根、茎、叶和籽粒 Cd 的富集系数分别为 0.85~1.09、0.44~0.86、0.64~1.36 和 0.04~0.25; 茎、叶、籽粒 Cd 的转运系数分别为 0.42~0.91、0.59~1.44 和 0.05~0.27; 相关性分析结果表明, 茎秆与叶片的 Cd 含量呈极显著正相关。在湖南农业大学耘园基地, 不同品种玉米的根、茎、叶、籽粒的富集系数分别为 3.00~4.12、1.93~3.20、2.18~3.96 和 0.16~0.94; 茎、叶和籽粒 Cd 的转运系数分别为 0.63~0.86、0.61~1.30 和 0.04~0.24; 相关性分析结果表明, 茎与叶、籽粒的 Cd 含量呈极显著正相关。各器官 Cd 积累情况分为 2 种, 一种为叶、根、茎、籽粒的 Cd 含量依次降低, 另一种是根、叶、茎、籽粒的 Cd 含量依次降低。在浏阳基地种植的湘农玉 22 号籽粒的 Cd 含量超过食品安全的国家标准, 而在耘园基地种植的湘农玉 22 号籽粒的 Cd 含量未超标, 其余 7 个品种在 2 个地区种植均未超过国家标准。

关 键 词: 玉米; 镉; 富集系数; 转运系数

中图分类号: S513.01

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)04-0389-06

Cadmium accumulation characteristics in different maize varieties

WU Qinggui^{1,2}, TIAN Feng³, ZHENG Ran^{1,2}, LYU Dan^{1,2}, LIU Songqin^{1,2}, LUO Hongbing^{1,2*}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Maize Engineering Technology Research Center of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Liuyang Agricultural Development Affairs Center, Liuyang, Hunan 410399, China)

Abstract: Field experiments were conducted to explore the characteristics of cadmium uptake in various organs (roots, stems, leaves and grains) of eight maize varieties exposed to varying cadmium concentrations across different regions. The study involved comparing cadmium (Cd) content across organs at maturity, and performing correlation analysis on Cd content in each organ. Results showed that in Liuyang, the enrichment coefficients of Cd in roots, stems, leaves and grains of different varieties ranged from 0.85 to 1.09, 0.44 to 0.86, 0.64 to 1.36 and 0.04 to 0.25, respectively. The transport coefficients of Cd in stems, leaves and grains ranged from 0.42 to 0.91, 0.59 to 1.44 and 0.05 to 0.27, respectively. Correlation analysis indicated a positive relationship between stems and leaves. In Yunyuan, the enrichment coefficients of Cd in roots, stems, leaves and grains of different varieties ranged from 3.00 to 4.12, 1.93 to 3.20, 2.18 to 3.96 and 0.16 to 0.94, respectively. The Cd transport coefficients of stems, leaves and grains varied from 0.63 to 0.86, 0.61 to 1.30 and 0.04 to 0.24, respectively. Correlation analysis showed an extremely significant positive correlation between Cd contents in stems and leaves, as well as stems and grains. Statistical analysis revealed two types of Cd accumulation distribution in organs: (1) Cd contents of leaf, root, stem and grain decreased successively; (2) Cd contents

收稿日期: 2022-11-29

修回日期: 2023-07-10

基金项目: 湖南省现代农业产业体系(湘农发[2019]105号)

作者简介: 武清贵(1999—), 男, 湖南溆浦人, 硕士研究生, 主要从事农业农村工作, 736992131@qq.com; *通信作者, 罗红兵, 博士, 教授, 主要从事玉米新品种选育及配套栽培技术研究, hbluo68@hunau.edu.cn

of root, leaf, stem and grain decreased successively. Notably, Cd content of Xiangnongyu22 grains grown in Liuyang at this Cd concentration exceeded the “National Food Safety Standard Limits of Contaminants in Foods”. However, Xiangnongyu22 planted in Yunyuan met the standard, and the remaining seven varieties grown in both regions complied with the “National Food Safety Standard Limits of Contaminants in Foods”.

Keywords: maize; cadmium; enrichment coefficient; transport coefficient

Cd 是一种生物毒性高且易迁移的重金属元素^[1]。低浓度的 Cd 对植物的生长有一定的刺激作用^[2]，高浓度的 Cd 会抑制植物的生长^[3]。GILL 等^[4]和 NAGAJYOTI 等^[5]的研究表明，当 Cd 浓度大于 10 $\mu\text{g/g}$ 时，对植物产生危害。Cd 通过食物链的积累会对人体造成较大的危害，如引起肌肉酸痛、肌无力以及肠胃不适等^[6]。

根是植物吸收 Cd 的主要部位^[7]，但根系吸收 Cd 受土壤的 pH 值、氮源、根际微生物和根系分泌物等因素的影响^[8]。不同作物对重金属的吸收累积特性不同^[9]。玉米对重金属 Cd 离子的吸收方式包括主动吸收^[10]和被动吸收^[11]。环境中的 Cd 通过根部吸收、叶片吸收和表皮渗透 3 种途径进入玉米体内。玉米从环境中吸收 Cd 之后，经体内运输分布至根、茎、叶等各个器官^[12-13]。曹莹等^[14]研究表明，在 Pb、Cd 复合污染的土壤，Cd 离子在玉米根、下叶、茎、上叶、籽粒中的含量依次降低，玉米植株各部位的 Cd 含量随 Cd 浓度的升高而提升。邵华伟等^[15]研究表明，玉米根、茎、叶、籽粒对 Cd 的吸

收量依次降低，且不同品种玉米对 Cd 的累积特性不同。邱博等^[16]研究发现，不同玉米品种、不同器官之间的 Cd 含量存在明显的差异，叶、雄穗、根、茎秆、苞叶、籽粒对 Cd 的吸收量依次降低。李静等^[17]、杜彩艳等^[18]和张彪等^[19]研究表明，玉米成熟期叶、根、茎、籽粒的 Cd 浓度依次降低。本试验中，研究在 2 个地区种植的不同品种玉米各器官的 Cd 含量差异，探讨各器官 Cd 吸收的特性，以期筛选出符合国家粮食安全的玉米品种。

1 试验地土壤概况

试验地分别位于湖南农业大学耘园基地和湖南省浏阳市达浒镇。耘园基地土壤全 Cd 含量 0.18 mg/kg ，达浒镇地区土壤全 Cd 含量为 0.86 mg/kg 。根据《土壤环境质量：农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)，2 个基地土壤中 Cd 含量均高于农用地土壤污染风险筛选值，低于农用地土壤污染风险管制值。2 个基地的土壤理化性质见表 1。

表 1 2 个试验基地的土壤理化性质

Table 1 The soil physicochemical properties in the two test areas

基地	全氮/ (g kg^{-1})	全钾/ (g kg^{-1})	全磷/ (g kg^{-1})	有机质/ (g kg^{-1})	pH	速效磷/ (mg kg^{-1})	速效钾/ (mg kg^{-1})	碱解氮/ (mg kg^{-1})
浏阳达浒镇	1.56	19.49	0.57	28.10	4.88	7.63	254.17	395.62
湖南农业大学耘园	1.00	14.78	0.88	20.22	4.75	12.15	283.83	155.78

2 材料与方法

2.1 供试品种

试验选用湖南农业大学近年来培育(引进)的新品种，包括 4 个普通粒用玉米品种(湘农玉 22 号、湘农玉 27 号、湘农玉 1 号和湘农玉 36 号)和 4 个鲜食玉米品种(湘农甜玉 3 号、荟甜 192、湘农白糯 2 号和沪紫黑糯 1 号)。

2.2 试验设计

采用随机区组试验设计。种植密度为 3200 株/(667 m^2)。播种前划分小区，小区长 3 m，宽 1.2 m，每个品种 3 次重复，共 24 个小区。分别于 2021 年

4 月 9 日、4 月 11 日在湖南农业大学耘园基地和湖南省浏阳市达浒镇播种。人工穴播，普通玉米种子每穴 2 粒，鲜食玉米种子每穴 3 粒，施 N、P、K 三元复合肥(有效 N、P、K 含量均 $\geq 15\%$)50 $\text{kg}/(667 \text{ m}^2)$ 作基肥，二叶一心间苗，三叶一心定苗。玉米生长期间田间管理同普通栽培。

2.3 测定方法

按照 GB 5009.15—2014《食品安全国家标准食品中镉的测定》的方法测定成熟期玉米植株的 Cd 含量。

参考文献[20]的方法计算富集系数和转运系数。

2.4 数据统计与分析

运用 Office 2012 进行数据整理;采用 SPSS 20.0 进行方差分析;采用 Origin 2021 进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 供试玉米品种各器官的镉含量分析

3.1.1 浏阳基地不同玉米品种各器官的镉含量

由表 2 可知,成熟期浏阳基地 8 个玉米品种根的

Cd 含量最低,湘农玉 36 号的最高,较湘荟玉 1 号高 27.0%;茎的 Cd 含量范围为 0.37~0.74 mg/kg,其中湘农玉 27 的 Cd 含量最低,湘农玉 22 号的最高,较湘农玉 27 号高 100.0%;叶的 Cd 含量范围为 0.55~1.17 mg/kg,其中湘农玉 36 号的最低,湘农玉 22 号的最高,较湘农玉 36 号高 112.7%;籽粒的 Cd 含量范围为 0.04~0.22 mg/kg,湘农玉 22 号籽粒的 Cd 含量最高,湘荟玉 1 号、湘农玉 27 号的最低,湘农玉 22 号较湘荟玉 1 号、湘农玉 27 号高 450.0%。

表 2 浏阳基地不同品种玉米成熟期各器官的 Cd 含量

品种	Cd 含量/(mg kg ⁻¹)			
	根	茎	叶	籽粒
湘农玉 36 号	(0.94±0.03)a	(0.40±0.06)de	(0.55±0.07)c	(0.05±0.01)b
湘农玉 22 号	(0.81±0.03)bc	(0.74±0.04)a	(1.17±0.02)a	(0.22±0.02)a
湘农玉 27 号	(0.83±0.08)bc	(0.37±0.03)e	(0.70±0.15)b	(0.04±0.01)b
湘荟玉 1 号	(0.74±0.05)c	(0.46±0.03)cd	(0.68±0.08)bc	(0.04±0.01)b
荟甜 192	(0.93±0.04)a	(0.47±0.02)c	(0.71±0.07)b	(0.10±0.02)a
湘农甜玉 3 号	(0.85±0.06)ab	(0.55±0.06)b	(0.68±0.11)bc	(0.12±0.02)a
沪紫黑糯 1 号	(0.89±0.02)ab	(0.61±0.04)b	(1.08±0.02)a	(0.05±0.02)b
湘农白糯 2 号	(0.87±0.09)ab	(0.51±0.03)c	(0.65±0.12)bc	(0.05±0.01)b

同列不同字母表示品种间的差异有统计学意义(P<0.05)。

3.1.2 耘园基地不同玉米品种各器官的镉含量

由表 3 可知,耘园基地 8 个玉米品种根的 Cd 含量范围为 0.54~0.74 mg/kg,其中湘农甜玉 3 号的最高,湘农白糯 2 号的最低,较湘农甜玉 3 号低 27.0%;茎的 Cd 含量范围为 0.35~0.58 mg/kg,其中湘农玉 22 号的最高,湘农玉 36 号的最低,湘农玉 22 号较湘农玉 36 号高 65.7%;叶的 Cd 含量范围为

0.39~0.71 mg/kg,其中湘农玉 36 号的最低,湘农玉 22 号的最高,较湘农玉 36 号高 82.1%;籽粒的 Cd 含量范围为 0.03~0.17 mg/kg,其中湘农玉 22 号的最高,湘农玉 36 号、湘农玉 27 号及湘荟玉 1 号的较低,湘农玉 22 号较湘农玉 36 号、湘农玉 27 号及湘荟玉 1 号高出 466.7%。

表 3 耘园基地不同玉米品种成熟期各器官的 Cd 含量

品种	Cd 含量/(mg kg ⁻¹)			
	根	茎	叶	籽粒
湘农玉 36 号	(0.71±0.07)a	(0.35±0.07)c	(0.39±0.03)d	(0.03±0.01)c
湘农玉 22 号	(0.70±0.07)ab	(0.58±0.09)a	(0.71±0.01)a	(0.17±0.03)a
湘农玉 27 号	(0.57±0.06)c	(0.39±0.02)bc	(0.53±0.05)bc	(0.03±0.01)c
湘荟玉 1 号	(0.59±0.08)bc	(0.38±0.04)bc	(0.52±0.05)bc	(0.03±0.01)c
荟甜 192	(0.73±0.08)a	(0.44±0.06)abc	(0.45±0.09)cd	(0.07±0.01)b
湘农甜玉 3 号	(0.74±0.08)a	(0.52±0.11)ab	(0.60±0.07)b	(0.09±0.02)b
沪紫黑糯 1 号	(0.62±0.05)abc	(0.49±0.07)abc	(0.52±0.05)bc	(0.04±0.01)c
湘农白糯 2 号	(0.54±0.05)c	(0.38±0.10)bc	(0.45±0.07)cd	(0.04±0.01)c

同列不同字母表示品种间的差异有统计学意义(P<0.05)。

3.2 供试玉米品种镉富集和转运差异分析

3.2.1 浏阳基地供试玉米品种镉富集差异

玉米对重金属的积累能力可用富集系数表示。从表 4 可以看出,浏阳基地 8 个玉米品种根、茎、

叶、籽粒的富集系数存在差异。根部的富集系数为 0.85~1.09,其中湘农玉 36 号根的 Cd 富集系数最大,显著高于湘农玉 22 号、湘农玉 27 号、湘荟玉 1 号的,与其他 4 个品种的差异不显著;湘荟玉 1 号的最低,较湘农玉 36 号的低 22.0%。茎秆的富集系数

为 0.44~0.86, 其中湘农玉 22 号的最高, 显著高于其他品种; 湘农玉 27 号的最低, 较湘农玉 22 号的低 48.8%。叶片的富集系数为 0.64~1.36, 其中湘农玉 22 号的最高, 显著高于其他品种(除沪紫黑糯 1 号); 湘农玉 36 号的最低, 较湘农玉 22 号低 52.9%。籽粒的富集系数为 0.04~0.25, 其中湘农玉 22 号籽粒的最高, 显著高于其他品种; 湘农玉 1 号的最小, 较湘农玉 22 号的低 84.0%。

表 4 浏阳基地供试玉米品种植株的 Cd 富集系数
Table 4 Cadmium enrichment coefficient of different maize varieties in Liuyang site

品种	Cd 的富集系数			
	根	茎	叶	籽粒
湘农玉 36 号	(1.09±0.03)a	(0.46±0.06)ef	(0.64±0.08)b	(0.06±0.01)de
湘农玉 22 号	(0.95±0.02)bc	(0.86±0.05)a	(1.36±0.02)a	(0.25±0.03)a
湘农玉 27 号	(0.97±0.09)b	(0.44±0.04)f	(0.81±0.17)b	(0.05±0.01)de
湘农玉 1 号	(0.85±0.06)c	(0.53±0.04)de	(0.78±0.10)b	(0.04±0.01)e
荟甜 192	(1.08±0.04)a	(0.55±0.02)d	(0.82±0.08)b	(0.12±0.02)c
湘农甜玉 3 号	(0.99±0.07)ab	(0.64±0.07)bc	(0.79±0.12)b	(0.15±0.02)b
沪紫黑糯 1 号	(1.03±0.03)ab	(0.70±0.04)b	(1.26±0.02)a	(0.06±0.02)de
湘农白糯 2 号	(1.01±0.11)ab	(0.60±0.03)cd	(0.75±0.14)b	(0.07±0.01)d

同列不同字母示品种间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.2.2 浏阳基地供试玉米品种对镉的转运差异

从表 5 可以看出, 不同玉米品种茎、叶、籽粒对 Cd 的转运系数存在差异。8 个品种的茎对 Cd 的转运系数为 0.42~0.91, 其中湘农玉 22 号茎对 Cd

表 5 浏阳基地供试玉米品种植株的 Cd 转运系数
Table 5 Cadmium transport coefficients of various organs of different maize varieties in Liuyang site

品种	Cd 的转运系数		
	茎	叶	籽粒
湘农玉 36 号	(0.42±0.05)d	(0.59±0.07)d	(0.06±0.01)d
湘农玉 22 号	(0.91±0.08)a	(1.44±0.05)a	(0.27±0.04)a
湘农玉 27 号	(0.46±0.08)d	(0.86±0.24)c	(0.05±0.01)d
湘农玉 1 号	(0.63±0.09)b	(0.92±0.15)c	(0.05±0.01)d
荟甜 192	(0.50±0.03)cd	(0.76±0.10)cd	(0.11±0.02)c
湘农甜玉 3 号	(0.65±0.11)b	(0.80±0.07)c	(0.15±0.03)b
沪紫黑糯 1 号	(0.68±0.05)b	(1.22±0.01)b	(0.06±0.01)d
湘农白糯 2 号	(0.60±0.04)bc	(0.75±0.11)cd	(0.07±0.01)d

同列不同字母示品种间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

的转运系数最大, 显著高于其他品种; 湘农玉 36 号的最低, 较湘农玉 22 号低 53.8%。叶的转运系数为 0.59~1.44, 其中湘农玉 22 号的最高, 显著高于其他品种的, 较湘农玉 36 号高出 144.1%。籽粒的转运系数为 0.05~0.27, 其中湘农玉 22 号的最高, 显著高于其他品种, 较湘农玉 27 号和湘农玉 1 号的高 440%。

3.2.3 耘园基地供试玉米品种镉富集差异

从表 6 可以看出, 不同玉米品种根、茎、叶、籽粒的富集系数存在差异。根部的富集系数为 3.00~4.12, 其中湘农甜玉 3 号的最高, 显著高于湘农白糯 2 号的, 与其他品种的差异不显著, 较湘农白糯 2 号的高 37.3%。茎的富集系数为 1.93~3.20, 其中湘农玉 22 号的最高, 显著高于湘农玉 36 号, 与其他品种的差异不显著, 较湘农玉 36 号的高 65.8%。叶的富集系数为 2.18~3.96, 其中湘农玉

表 6 耘园基地供试玉米品种植株的 Cd 富集系数

Table 6 Cadmium enrichment coefficients of various organs of different maize varieties in Yunyuan site

品种	Cd 的富集系数			
	根	茎	叶	籽粒
湘农玉 36 号	(3.96±0.37)ab	(1.93±0.18)b	(2.18±0.17)c	(0.17±0.04)c
湘农玉 22 号	(3.87±0.39)ab	(3.20±0.51)a	(3.96±0.08)a	(0.94±0.15)a
湘农玉 27 号	(3.17±0.25)ab	(2.15±0.21)ab	(2.94±0.19)bc	(0.17±0.06)c
湘农玉 1 号	(3.30±0.21)ab	(2.13±0.40)ab	(2.89±0.28)bc	(0.16±0.05)c
荟甜 192	(4.07±0.44)a	(2.46±0.36)ab	(2.48±0.39)bc	(0.36±0.07)bc
湘农甜玉 3 号	(4.12±0.44)a	(2.91±0.58)ab	(3.36±0.40)ab	(0.49±0.09)b
沪紫黑糯 1 号	(3.46±0.28)ab	(2.72±0.40)ab	(2.87±0.82)bc	(0.22±0.06)c
湘农白糯 2 号	(3.00±0.53)b	(2.11±0.54)ab	(2.50±0.29)bc	(0.20±0.02)c

同列不同字母示品种间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

22 号的^{最大}，显著高于其他品种，较湘农玉 36 号的高 81.7%。籽粒的富集系数为 0.16~0.94，其中湘农玉 22 号的^{最大}，显著高于其他品种的，较湘荟玉 1 号的高 487.5%。

3.2.4 耘园基地供试玉米品种对镉的转运差异

从表 7 可以看出，不同玉米品种茎、叶、籽粒 Cd 的转运系数存在差异。茎对 Cd 的转运系数为 0.63~0.86，各品种间差异不显著，其中湘荟玉 1 号的^{最大}。叶对 Cd 的转运系数为 0.61~1.30，其中沪紫黑糯 1 号的^{最大}，显著高于湘农玉 36 号、湘荟玉 1 号、荟甜 192、湘农甜玉 3 号以及湘农白糯 2 号，与其他品种的差异不显著。籽粒 Cd 的转运系数为 0.04~0.24，其中湘农玉 22 号的^{最大}，显著高于其他品种，较湘农玉 36 号的高出 500%。

表 7 耘园基地不同玉米品种植株 Cd 的转运系数

Table 7 Cadmium transport coefficients of various organs of different maize varieties in Yunyuan site			
品种	Cd 的转运系数		
	茎	叶	籽粒
湘农玉 36 号	0.78±0.10	(0.97±0.18)b	(0.04±0.01)d
湘农玉 22 号	0.83±0.16	(1.03±0.09)ab	(0.24±0.02)a
湘农玉 27 号	0.73±0.23	(1.09±0.30)ab	(0.06±0.02)d
湘荟玉 1 号	0.86±0.33	(0.84±0.12)bc	(0.08±0.02)cd
荟甜 192	0.63±0.06	(0.61±0.07)c	(0.10±0.04)bc
湘农甜玉 3 号	0.70±0.07	(0.82±0.12)bc	(0.12±0.03)b
沪紫黑糯 1 号	0.80±0.16	(1.30±0.04)a	(0.07±0.01)cd
湘农白糯 2 号	0.63±0.08	(0.64±0.20)c	(0.06±0.01)d

同列不同字母示品种间的差异有统计学意义(P<0.05)。

3.3 玉米各器官间镉含量的相关性分析

3.3.1 浏阳基地玉米各器官间 Cd 含量的相关性分析

从表 8 可以看出：根的 Cd 含量与茎、叶、籽粒中的 Cd 含量呈负相关,说明根中的 Cd 含量越高，茎、叶以及籽粒中的 Cd 含量越少；其他器官间 Cd 含量均呈正相关,其中茎的 Cd 含量与叶的 Cd 含量呈极显著正相关，与籽粒的 Cd 含量呈显著正相关。

表 8 浏阳基地供试玉米各器官间 Cd 含量的相关系数

Table 8 The correlation coefficients of the cadmium contents in different parts of maize in Liuyang site

器官	相关系数		
	根	茎	叶
茎	-0.18		
叶	-0.17	0.86**	
籽粒	-0.05	0.79*	0.58

、*、* 分别示相关性显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)。

3.3.2 耘园基地玉米各器官间 Cd 含量的相关性分析

从表 9 可以看出：根的 Cd 含量与茎、叶以及籽粒的 Cd 含量呈正相关；茎的 Cd 含量与叶、籽粒的 Cd 含量呈极显著正相关,说明茎的 Cd 含量增加，叶和籽粒的 Cd 含量会极显著上升；叶的 Cd 含量与籽粒的 Cd 含量呈显著正相关,说明叶的 Cd 含量增加，籽粒中的 Cd 含量也会显著上升。

表 9 耘园基地供试玉米各器官间 Cd 含量的相关系数

Table 9 The correlation coefficients of the cadmium contents in different parts of maize in Yunyuan site

器官	相关系数		
	根	茎	叶
茎	0.48		
叶	0.19	0.85**	
籽粒	0.53	0.87**	0.81*

、*、* 分别示相关性显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)。

4 结论与讨论

玉米植株各部位 Cd 含量的差异因组织器官的功能不同、机构与代谢能力的不同或重金属对器官亲和性的不同而存在差异^[21]。众多研究表明，根为玉米吸收 Cd 的主要器官，从土壤中吸收 Cd 之后，再通过体内运输输送到其他部位^[22-24]。梁彦秋等^[25]的研究结果表明，玉米中根、叶、茎、籽粒的 Cd 含量依次降低。本试验结果表明，不同玉米品种各器官的 Cd 含量的变化趋势分为 2 种：一种是叶、根、茎、籽粒的 Cd 含量依次降低，这与李静等^[17]的研究结果类似；另一种是根、叶、茎、籽粒的 Cd 含量依次降低，这与曹莹等^[14]的研究结果类似。导致这 2 种情况的原因可能是土壤类型、生长发育的条件不同，具体原因有待作进一步研究。

富集系数在一定程度上反映了植物吸收重金属的能力。植物各部位富集系数越高，植物体内积累重金属的能力就越强；Cd 转运系数越高，则重金属 Cd 由根系转运到地上部分的能力越强。本研究中，除湘农玉 22 号、沪紫黑糯 1 号外，其余品种根、叶、茎、籽粒的 Cd 富集系数依次降低。由此可以看出，根积累 Cd 的能力较强，茎、叶和籽粒的积累能力较弱，其原因可能是根向茎、叶与籽粒转运的 Cd 较少，这与孙姣辉等^[26]的研究结果类似。转运系数是评价重金属在植物体内的分配情况以及植物对重金属转运能力的重要依据^[20]。不同玉米品种对 Cd 的转运系数存在差异，低积累品种将 Cd

从根部向地上部转移的能力较弱^[27-28]。本研究发
现,浏阳基地8个玉米品种籽粒Cd的转运系数均
小于1,转运系数为0.05~0.27,其中有7个玉米品
种(湘农玉27号、湘农玉36号、湘荟玉1号、沪紫
黑糯1号、湘农甜玉3号、荟甜192、湘农白糯2
号)籽粒中的Cd含量低于国家标准(≤ 0.2 mg/kg);
在耘园基地8个玉米品种籽粒中的Cd含量均低于
国家标准,且8个玉米品种籽粒Cd的转运系数均
小于1,转运系数为0.04~0.24。

参考文献:

- [1] 马骄阳, 保欣晨, 王坤, 等. 土壤镉污染的人体健康
风险评价研究: 生物有效性及毒性效应[J]. 生态毒理
学报, 2021, 16(6): 120-132.
- [2] SUN Y B, ZHOU Q X, DIAO C Y. Effects of cadmium
and arsenic on growth and metal accumulation of
Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L.[J]. Bioresource
Technology, 2008, 99(5): 1103-1110.
- [3] 张璐, 何录秋, 杨学乐. 不同镉背景值农田中荞麦镉
积累转运特性研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(23):
77-83.
- [4] GILL S S, TUTEJA N. Cadmium stress tolerance in crop
plants: probing the role of sulfur[J]. Plant Signaling &
Behavior, 2011, 6(2): 215-222.
- [5] NAGAJYOTI P C, LEE K D, SREEKANTH T V M. Heavy
metals, occurrence and toxicity for plants: a
review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2010, 8(3):
199-216.
- [6] 方利平, 章明奎, 符娟林. 外源铅铜镉在长三角和珠
三角农业土壤中的转化[J]. 生态环境, 2005, 14(6):
843-846.
- [7] 方波, 肖腾伟, 苏娜娜, 等. 水稻镉吸收及其在各器
官间转运积累的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2021,
35(3): 225-237.
- [8] BONDADA B R, TU S X, MA L Q. Absorption of
foliar-applied arsenic by the arsenic hyperaccumulating
fern(*Pteris vittata* L.)[J]. Science of the Total Environ-
ment, 2004, 332(1/2/3): 61-70.
- [9] STINGU A, STANESCU I, VOLFI, et al. Hyperaccu-
mulation of cadmium in maize plant(*Zea mays*)[J]. Cellulose
Chemistry and Technology, 2011, 45(3/4): 287-290.
- [10] FUJIMAKI S, SUZUI N, ISHIOKA N S, et al. Tracing
cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging
and quantitative characterization of absorption, transport,
and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J].
Plant Physiology, 2010, 152(4): 1796-1806.
- [11] 吴慧丽, 田薇, 纪燕玲, 等. 促进镉吸收积累的植物
根际促生菌的筛选及其对一年生黑麦草的影响[J]. 草
业学报, 2021, 30(7): 53-61.
- [12] CATALDO D A, GARLAND T R, WILDUNG R E. Cadmium
uptake kinetics in intact soybean plants[J].
Plant Physiology, 1983, 73(3): 844-848.
- [13] CLEMENS S. Molecular mechanisms of plant metal
tolerance and homeostasis[J]. Planta, 2001, 212(4):
475-486.
- [14] 曹莹, 王嘉, 刘玉莲, 等. 高产玉米物质积累与分配
的研究[J]. 西南农业学报, 2011, 24(3): 850-853.
- [15] 邵华伟, 葛春辉, 马彦茹, 等. 施入城市生活垃圾堆
肥对玉米植株重金属分布及土壤养分的影响[J]. 农业
资源与环境学报, 2013, 30(6): 58-63.
- [16] 邱博. 镉污染稻田低镉累积玉米品种筛选及植株镉分
布规律的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 张彪, 段恩忠, 师振亚, 等. 不同玉米品种镉积累及
运移差异性研究[J]. 河南农业科学, 2017, 46(9): 25-29.
- [20] 朱妙馨, 张灵巧, 巫丽华, 等. 北京11种宿根地被植
物对镍的耐性和富集转运特征[J]. 西北林学院学报,
2021, 36(5): 69-75.
- [21] 樊金娟, 刘宇, 曹樱迪, 等. 玉米对镉胁迫的响应及
其耐镉机制研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2018,
49(5): 633-640.
- [22] 张宁, 陶荣浩, 张慧敏, 等. 不同玉米品种对镉积累
和转运差异研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6):
1208-1216.
- [23] 李梦然, 许学慧, 赵萌莉. 不同形态氮肥对苗期玉米
镉富集的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 289-294.
- [24] 于子昊, 李胜宝, 赵晓玲, 等. 玉米根系、根鞘性状
与镉吸收的品种差异研究[J]. 农业环境科学学报,
2021, 40(4): 747-755.
- [25] 梁彦秋, 关杨, 张显龙. 玉米对镉的累积特性及镉的
存在形态研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(30):
18569-18570.
- [26] 孙姣辉, 陈婷婷, 邱博, 等. 几种重金属(Cd、Cr、As)
在玉米植株中的分布研究[J]. 作物研究, 2016, 30(4):
402-405.
- [27] 李勇进, 匡政成, 陈浩东, 等. 长株潭地区低镉积累
玉米品种的筛选[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),
2022, 48(2): 125-131.
- [28] 张上都, 伍祥, 彭菊, 等. 贵州省水稻耕种区主栽品
种镉积累特征分析及低镉积累品种的筛选[J]. 种子,
2021, 40(11): 15-21.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正