

不同 Cd 质量分数处理下两玉米品种植株 Cd 分布、富集和转运特性

肖亚涛^{1,2}, 王德哲², 李世欣^{2*}, 王 龙³, 孙超祥², 郭 魏^{1*}

(1.中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业水资源高效安全利用重点实验室, 河南 新乡 453002;
2.河南农业大学 机电工程学院, 郑州 450002; 3.河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450046)

摘 要:【目的】明确不同质量分数镉(Cd)胁迫对玉米Cd积累过程的影响效应, 揭示玉米种植于Cd污染土壤的生产适用性。【方法】采用田间微区试验设置6个Cd质量分数处理(CK(0.16 mg/kg)、T1(1.70 mg/kg)、T2(4.35 mg/kg)、T3(6.71 mg/kg)、T4(9.78 mg/kg)、T5(15.76 mg/kg)), 分别测定郑单985(ZD)和先玉335(XY)玉米在不同质量分数Cd处理下玉米植株中Cd的组织分布特征及各器官含Cd量, 分析各组织器官对Cd的富集和转运能力, 并建立Cd处理质量分数梯度和玉米各组织器官含Cd量之间的相关性分析。【结果】在Cd污染处理下, Cd量的分布主要集中于根系、叶和苞叶之中, 其次为茎/穗轴, 籽粒中Cd量占比最少, 仅为0.08%~5.12%; ZD籽粒中Cd量随着Cd处理质量分数的增大而增大, XY籽粒中Cd量则在T3处理下达到最大值0.26 mg/kg。对比ZD和XY, ZD籽粒中Cd量均高于XY, 且在T4处理和T5处理下品种间差异显著($P<0.05$); 富集和转运分析显示, ZD和XY植株根系富集能力最强, 籽粒富集能力最弱, 茎、叶和苞叶富集能力受Cd胁迫质量分数和品种差异影响波动。同一Cd质量分数处理下, 根-叶和根-苞叶的转运能力最强, 但存在品种差异和质量分数效应; Cd质量分数梯度与植株根系、茎、叶、苞叶、穗轴和籽粒中Cd量均呈极显著相关关系($P<0.01$), 其中与根系、茎、叶的相关系数分别达到0.973、0.961和0.963。【结论】玉米植株中Cd的分布、富集和转运均受Cd胁迫的质量分数影响, 且存在品种差异。在1.70~15.76 mg/kg的Cd污染土壤上ZD和XY仅可作为饲料安全种植, 相比较于ZD仅适用于1.70~6.71 mg/kg的Cd污染质量分数范围, XY具有更好的生产适用性。

关 键 词: 玉米; 镉; 分布; 富集; 转运

中图分类号: S512.11; X173

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022407

OSID: 

肖亚涛, 王德哲, 李世欣, 等. 不同Cd质量分数处理下两玉米品种植株Cd分布、富集和转运特性[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 45-52.

XIAO Yatao, WANG Dezhe, LI Shixin, et al. Distribution, Enrichment and Transport of Cd in Two Maize Varieties Grown in Soils with Different Cd Contents[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 45-52.

0 引 言

【研究意义】镉(Cd)作为人体和植物非必须元素在自然界中广泛存在, 具有较强的生物毒性, 被动植物吸收后难以排出体外。长期取食富含Cd的食物, 可导致Cd在人体内过量累积, 给人体器官组织造成难以修复的损失。据《全国土壤污染状况调查公报》显示^[1], 土壤Cd污染点位超标率为7%, 且主要以轻微污染土壤为主, 分布从西北到东南、从东北到西南

方向逐渐升高的态势^[2]。土壤Cd污染给我国农业生产带来巨大潜在危害。土壤安全是农业生产安全的基本前提, 但鉴于我国耕地资源状况以及农业生产比重, 无法将Cd污染耕地全面有效的“退耕还林”或“休耕”。因此, 开展切实可行且能保证作物安全生产的修复措施, 实现中、低Cd污染土壤安全利用已成为当前研究热点。玉米(*Zea mays*)作为我国主要的粮食作物和饲料作物, 研究证实土壤Cd污染对玉米产量和品质存在显著负向效应。探明不同基因型玉米受Cd胁迫后植株体内Cd的分布和积累规律, 明确玉米受Cd胁迫下品种间差异及污染效应, 对缓解我国土壤Cd污染问题, 保障粮食安全和饲料安全具有重要的理论意义和应用价值。

【研究进展】在1955—1972年, 日本富山县神通川流域发生Cd污染造成的“骨痛病”公害事件。1974年, 联合国环境规划署和国际劳工卫生重金属委员会正式将Cd定为重点污染物^[3]。在此之后, 世界各

收稿日期: 2022-07-21 修回日期: 2023-01-15 网络出版日期: 2023-05-06

基金项目: 中国农科院农业水资源高效安全利用重点开放实验室项目(FIRI2021030201, FIRI202003-0101); 河南省高等学校重点科研项目(22A416008); 中国博士后科学基金资助项目(2021M701103); 河南农业大学博士启动基金项目(30500801)

作者简介: 肖亚涛(1989-), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事农业水土资源安全利用研究。E-mail: xiaoyatao@henau.edu.com

通信作者: 李世欣(1965-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土环境保护保护研究。E-mail: lishx2008@163.com

郭魏(1986-), 女, 助理研究员, 主要从事污染土壤修复及农业水资源安全利用研究。E-mail: guowei1124@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

国专家学者相继开展 Cd 污染的相关研究。随着我国工业快速发展、农业生产现代化和污水、污泥开发利用等人类活动, Cd 污染引起的环境污染问题日趋严重, 已成为制约我国农业可持续安全生产的“瓶颈”。2013 年 2 月 27 日,《南方日报》发表了题为“湖南问题大米流向广东餐桌”的报道,“镉大米”迅速发酵,引起社会广泛关注^[4]。2017 年河南某地区小麦 Cd 量超出国家食品安全限定值 1.7~12.8 倍,小麦 Cd 污染问题成为继“镉大米”之后另一关注焦点^[5]。

为保证我国的粮食产量和质量安全,迫切需要解决现有耕地的 Cd 污染问题。当前针对土壤 Cd 污染问题,已有土壤修复技术达到上百种,可分为物理修复、化学修复和生物修复 3 类,相关修复原理可归为:①降低土壤中有害物质在环境中的可迁移性与生物可利用性;②降低土壤中有害物质的浓度^[6]。其中降低土壤中 Cd 的迁移能力及有效性,阻控植株对 Cd²⁺的吸收或在可食用器官的积累,已成为当前对中、低度污染耕地安全生产和利用切实可行的治理方法。大量关于土壤钝化剂、叶面喷施阻隔剂等相关研究火热开展,伴随着大量化学试剂或药剂的使用对土壤环境扰动较大,同时存在潜在风险。而借助作物品种对 Cd 的吸收差异特性,亦可实现对土壤 Cd²⁺的低吸收或低积累。张儒德等^[7]对不同基因型水稻研究结果显示,在中轻度污染土壤中选种 Cd 低积累品种可以实现稻米的安全生产。熊孜等^[8]通过对黄淮海平原 9 个小麦种植区 59 个小麦品种研究证实,筛选特定的小麦品种可以安全种植于不同 Cd 污染浓度土壤。杜彩艳等^[9]对 24 个玉米的研究也表明籽粒低积累玉米种可以用于污染土壤安全生产。

【切入点】当前关于不同基因型作物品种对 Cd 吸收积累特性和生产适用性的研究主要集中于水稻、小麦等作物,而关于玉米的相关研究相对薄弱。部分关于不同基因型玉米的研究又多为单一 Cd 污染浓度下品种筛选^[10]或吸收积累特性^[11]等研究,缺乏差异品种对不同 Cd 浓度的适应性认知。【拟解决的关键问题】因此本研究拟通过田间微区试验,探讨玉米品种的 Cd 胁迫浓度效应和 Cd 积累分布差异,明确 Cd 污染浓度对玉米积累特性的影响效应,为籽粒低积累玉米筛选工作和 Cd 污染土壤安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

本试验于 2020 年 6 月—2022 年 10 月在河南省新乡市红旗区中国农业科学院农田灌溉研究所农业水土环境野外科学观测试验站内进行。该试验区域多年平均气候条件为:气温 14.10℃,无霜期 210 d,

日照时间 2 398.80 h,降水量 588.80 mm,蒸发量 2 000 mm。为充分接近大田生产实际情况,同时兼顾不扩大农田污染的原则,试验采用汽油桶(内径 60 cm,高 90 cm)作为容器埋入大田之中,并将原位砂壤土逐层回填作为田间微区。

1.2 试验设计及测定方法

本试验田间微区 Cd 污染是依据多年污灌农田 Cd 垂直分布规律,于 2014 年采用水溶沁润方法对表层土壤(0~20 cm)进行 Cd 梯度处理获得。试验共设置 6 个 Cd 质量分数处理,每个处理 6 个重复。后经连续多年耕作和土壤取样,表层土壤 Cd 污染质量分数实测值为 CK(0.16 mg/kg)、T1(1.70 mg/kg)、T2(4.35 mg/kg)、T3(6.71 mg/kg)、T4(9.78 mg/kg)、T5(15.76 mg/kg),各处理土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 不同 Cd 质量分数处理的土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of soil treated with different Cd concentrations

处理	pH 值	电导率/ (dS m ⁻¹)	有机 质量/%	速效钾量/ (mg kg ⁻¹)	速效磷量/ (mg kg ⁻¹)	全氮量/ (g kg ⁻¹)
CK	8.68	0.32	1.59	112	57.79	0.63
T1	8.78	0.23	1.71	129	45.37	0.64
T2	8.69	0.38	1.67	122	31.30	0.64
T3	8.69	0.25	1.57	104	36.26	0.53
T4	8.64	0.21	1.09	88	42.06	0.58
T5	8.52	0.26	1.29	82	32.95	0.53

试验所选用的玉米品种为郑单 958(ZD)和先玉 335(XY),每微区保留 2 株玉米,在生育期内所有处理均采用统一的田间水肥管理模式。待玉米成熟后,将玉米植株整株取出带回实验室,用自来水冲洗根系,然后用 10 mmol/L 的 EDTA 浸泡根系 5 min,之后用去离子水冲洗 2~3 遍。将玉米植株按根、茎、叶、苞叶、穗轴、籽粒等组织器官进行处理,放置烘箱 75℃烘至恒质量。将烘干后的各组织器官进行粉碎,采用微波消解-原子吸收分光光度法,测定各器官中含 Cd 量。

1.3 数据处理与分析

用 Excel 2021 处理数据和绘图,用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并对不同处理间的差异进行 Duncan 多重比较,显著性水平为 $P \leq 0.05$ 。对 Cd 处理、各组织 Cd 量进行 Pearson 相关分析,显著水平为 $P \leq 0.05$ 。

富集系数(BCF)=植株地上部 Cd 量/土壤中 Cd 量;

转运系数(TF)=植株地上部 Cd 量/植株根系 Cd 量。

2 结果与分析

2.1 不同处理下玉米植株 Cd 量变化

图 1 为不同 Cd 质量分数处理下两玉米品种各组

织中含 Cd 量,如图 1(a)所示,随着 Cd 处理质量分数的增大,ZD 和 XY 根系中含 Cd 量均呈增大趋势。XY 品种各处理间 Cd 量差异均显著 ($P<0.05$);而 ZD 在 T1 处理和 T2 处理之间,以及 T3 处理和 T4 处理之间均无显著差异 ($P>0.05$)。在 CK、T1、T2 处理和 T4 处理下,XY 根系中的 Cd 量分别为 0.40、2.49、6.69、13.34 mg/kg,均高于 ZD,但仅在 T2 处理和 T4 处理下差异达到显著水平 ($P<0.05$);在 T3 处理和 T5 处理下,ZD 根系中 Cd 量则分别比 XY 根系中 Cd 量高 33.75%和 2.03%,T3 处理下品种差异显著 ($P<0.05$)。

如图 1(b)所示,ZD 和 XY 茎中 Cd 量随着外界 Cd 处理质量分数的增大呈增长趋势,且除 T3 处理和 T4 处理之外,ZD 在处理间差异均达到显著水平 ($P<0.05$);而 XY 也仅在 T2 处理和 T3 处理间差异不显著 ($P>0.05$)。T2 处理和 T3 处理下 ZD 茎中 Cd 量均高于 XY,且在 T3 处理下差异显著 ($P<0.05$);而 CK、T1、T4 处理和 T5 处理下,ZD 茎中 Cd 量低于 XY,但仅 T4 处理下两玉米品种间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。

如图 1(c)所示,ZD 和 XY 叶中 Cd 量同根系和茎一致,均随着 Cd 处理质量分数的增大呈增长趋势,ZD 在除 CK 之外,各处理之间差异均达到显著水平 ($P<0.05$);在 T2、T3、T4 处理和 T5 处理下,XY 各处理之间差异均达到显著 ($P<0.05$)。对比 ZD 和 XY,在除 T1 之外的各处理下,ZD 叶中 Cd 量均

高于 XY,在 T4 处理下差异值 0.43 mg/kg,达到显著 ($P<0.05$)。

如图 1(d)所示,ZD 苞叶中 Cd 量随着 Cd 处理质量分数的增加呈增大趋势,但 CK 和 T1 处理、T1 处理和 T2 处理、T3 处理和 T4 处理间差异均未达到显著水平 ($P<0.05$);XY 苞叶中 Cd 量在 T3 处理下达到最大值 2.52 mg/kg,与 T2 处理和 T5 处理一致显著高于其他处理 ($P<0.05$)。在各个 Cd 质量分数处理下,XY 苞叶中 Cd 量均高于 ZD,且在 T2、T3、T4 处理下差异均达到显著 ($P<0.05$)。

如图 1(e)所示,在 CK、T1 处理和 T2 处理下,ZD 和 XY 穗轴中 Cd 量并无处理间和品种间的显著差异 ($P>0.05$);在 T3、T4、T5 处理下,ZD 穗轴中 Cd 量均显著增大 ($P<0.05$),而 XY 在 T3 处理和 T4 处理间无显著差异,但在 T5 处理下显著增大 ($P<0.05$),达到极值。对比 ZD 和 XY,在 T3、T4、T5 处理下 ZD 穗轴中 Cd 量比 XY 高 163.95%、443.53%、183.12%,差异显著 ($P<0.05$)。

如图 1(f)所示,ZD 籽粒中 Cd 量随着 Cd 处理质量分数的增大而增大,但在 T1、T2 处理和 T3 处理间无显著性差异 ($P>0.05$);XY 籽粒中 Cd 量则在 T3 处理下达到最大值 0.26 mg/kg,显著高于 CK、T1 处理和 T4 处理。对比 ZD 和 XY,在 CK、T1、T2、T4 处理和 T5 处理下,ZD 籽粒中 Cd 量均高于 XY,且在 T4 处理和 T5 处理下差异显著 ($P<0.05$)。

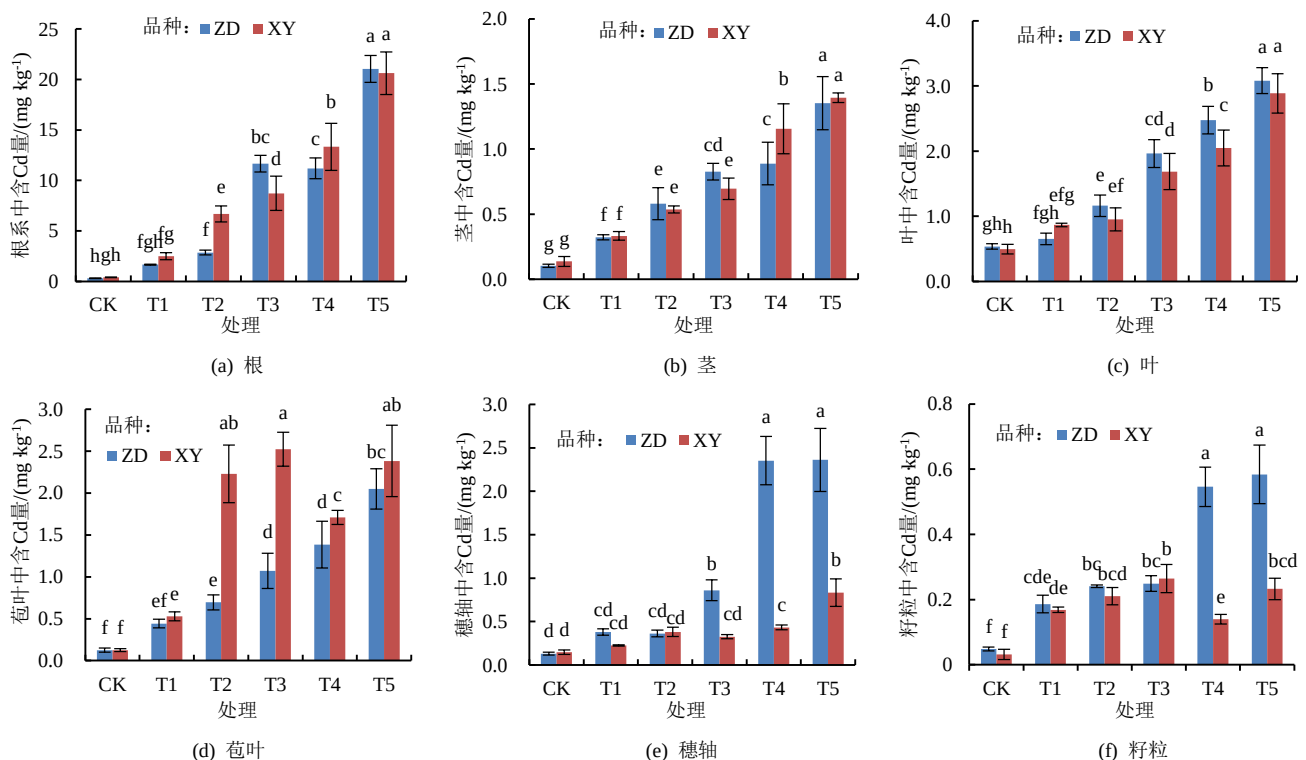


图 1 不同 Cd 质量分数处理下两玉米品种各组织中含 Cd 量

Fig.1 The Cd content in tissues of two maize varieties under different Cd mass fractions treatments

2.2 不同处理下玉米植株中 Cd 的分布规律

植株各组织器官中 Cd 量分布规律及各器官中 Cd 量所占比例如图 2 所示。CK 玉米植株中 Cd 量主要集中于叶组织器官内, ZD 和 XY 叶中 Cd 量占比分别达到 43.02% 和 37.03%。在 T1、T2、T3、T4、T5 处理下, 植株体各组织器官中 Cd 量主要集中于根系、叶和苞叶之中, 其次为茎/穗轴, 籽粒中 Cd 量占比最少, 仅为 0.08%~5.12%。植株根系中 Cd 量随着玉米

受到 Cd 质量分数的增大而增大, ZD 根系 Cd 量百分比为 45.50%~70.12%, XY 根系 Cd 量占比达到 53.99%~72.74%。Cd 处理质量分数的增大, 可以增加植株组织 Cd 量, 但并不会同比例增大其所占的百分比。对比 ZD 和 XY, 两玉米品种在 Cd 质量分数胁迫应对机制基本一致, 均为增加根系 Cd 量占比, 减少叶/苞叶分布比例。

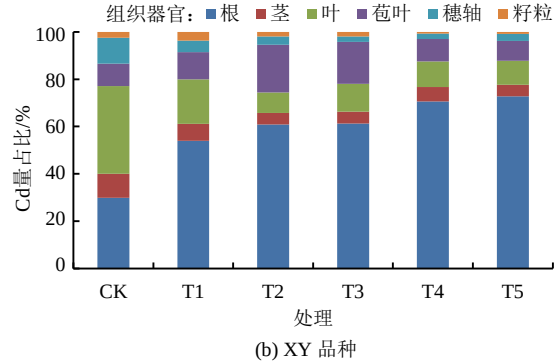
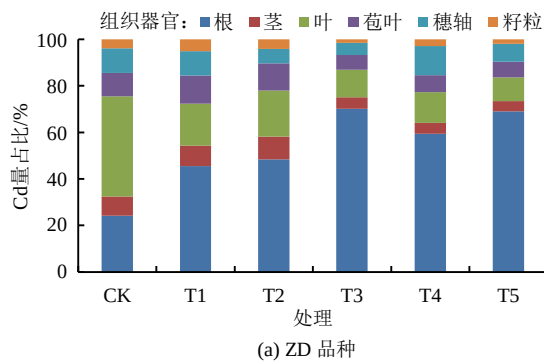


图 2 不同 Cd 质量分数处理下两玉米植株各组织器官 Cd 量占比

Fig.2 Proportion of Cd content in each tissue of two maize plants under different Cd mass fractions treatments

2.3 不同处理下玉米对土壤 Cd 的转运

以玉米植株各器官对 Cd 的富集系数来反映其对重金属 Cd 富集能力的强弱, 结果如表 2 所示。不同 Cd 质量分数下, 玉米根系、茎、叶、苞叶、穗轴和籽粒的 Cd 富集系数分别为 0.65~2.49、0.09~0.86、0.18~3.35、0.13~0.79、0.04~0.93 和 0.01~0.30。整体分析来看, CK 的 ZD 和 XY 植株的叶组织器官对土壤 Cd 的富集能力最强, 其次是根系、穗轴、苞叶、茎籽粒逐次递减。当受 Cd 胁迫后, ZD 和 XY 植株各器官对 Cd 富集能力发生变化, 以根系富集系数最大, 茎、叶和苞叶富集能力受 Cd 胁迫质量分数和品种差异影响波动, 但两玉米品种及不同处理下籽粒富集系数始终最低。

分析不同处理下 ZD 各组织器官的富集系数发现, 根系的富集系数与 CK 相比在 T1 处理和 T2 处理下均

显著降低 ($P < 0.05$)。而在 T3、T4、T5 处理下富集系数增大; 茎、叶、苞叶各组织富集系数整体随着 Cd 处理质量分数的增大而降低, 但茎或叶在不同处理间的差异均未达到显著水平 ($P > 0.05$); 籽粒随 Cd 处理质量分数变化规律与穗轴一致, 即低 Cd 质量分数 (CK、T1、T2) 下富集系数随着 Cd 处理质量分数的增大而降低, 而中高度 Cd 处理质量分数 (T3、T4、T5) 下富集系数在 T4 处理处有一较小峰值。就 XY 品种而言, 各组织 CK 的富集系数均显著高于其他处理 ($P < 0.05$); 在 T1、T2、T3、T4 处理和 T5 处理下, 根、茎、叶、苞叶、穗轴和籽粒的富集系数整体随着 Cd 处理质量分数增大而减小, 其中根系富集系数在 T2 处理和 T4 处理呈双峰转折, 而茎、叶和苞叶则分别在 T4、T3 处理和 T2 处理单峰转折。

表 2 不同 Cd 质量分数处理下两玉米植株各组织 Cd 富集系数

Table 2 The Cd enrichment coefficients in tissues of two maize plants under different Cd concentrations

品种	处理	富集系数 (BF)					
		根	茎	叶	苞叶	穗轴	籽粒
ZD	CK	1.88±0.18b	0.65±0.07b	3.35±0.25a	0.79±0.16a	0.82±0.1b	0.30±0.04a
	T1	0.97±0.02f	0.19±0.01c	0.38±0.05bc	0.26±0.03de	0.22±0.02cd	0.11±0.02c
	T2	0.65±0.06g	0.13±0.03c	0.27±0.04bc	0.16±0.02ef	0.08±0.01e	0.06±0.00cde
	T3	1.74±0.12bc	0.12±0.01c	0.29±0.03bc	0.16±0.03ef	0.13±0.02de	0.04±0.00e
	T4	1.14±0.11ef	0.09±0.02c	0.25±0.02bc	0.14±0.03ef	0.24±0.03c	0.06±0.01cde
	T5	1.34±0.08de	0.09±0.01c	0.20±0.01c	0.13±0.02f	0.15±0.02cde	0.04±0.01e
XY	CK	2.49±0.26a	0.86±0.23a	3.09±0.46a	0.78±0.10a	0.93±0.17a	0.20±0.10b
	T1	1.46±0.21cde	0.20±0.02c	0.51±0.02b	0.31±0.03cd	0.13±0.00de	0.10±0.00cd
	T2	1.54±0.18cd	0.12±0.01c	0.22±0.04bc	0.51±0.08b	0.09±0.01e	0.05±0.01de
	T3	1.30±0.25de	0.10±0.01c	0.25±0.04bc	0.38±0.03c	0.05±0.00e	0.04±0.01e
	T4	1.36±0.24de	0.12±0.02c	0.21±0.03c	0.18±0.01ef	0.04±0.00e	0.01±0.00e
	T5	1.31±0.13de	0.09±0.00c	0.18±0.02c	0.15±0.03ef	0.05±0.00e	0.01±0.00e

注 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

以玉米地上部组织对 Cd 的转运系数来表示植株对 Cd 的转运能力, 结果如表 3 所示。在不同 Cd 质量分数处理下, 玉米根-茎、根-叶、根-苞叶、根-穗轴、根-籽粒的转运系数变化范围分别为 0.06~0.35、0.14~1.79、0.10~0.42、0.04~0.44 和 0.01~0.16。CK 的 ZD 和 XY 根系向地上部各组织中转运规律具有一致性, 均以根-叶转运为主, 其次为根-穗轴、根-苞叶、根-茎和根-籽粒。不同 Cd 处理下, ZD 和 XY 植株根系向地上部转运能力整体随着 Cd 处理质量分数的增大而降低; 同一 Cd 胁迫处理水平下, 以根-叶或根-苞叶的转运为主, 但存在品种差异和质量分数效应。

分析不同处理下 ZD 各组织器官的转运系数发现,

根-茎、根-苞叶和根-籽粒转运系数在 T1 处理和 T2 处理间差异均未达到显著水平 ($P>0.05$), 但其转运系数均显著高于 T3、T4 处理和 T5 处理 ($P<0.05$)。XY 根-籽粒转运系数随着 Cd 处理质量分数增大而降低, 且 Cd 胁迫质量分数效应明显; 低质量分数 Cd 处理 (T1)、中质量分数 Cd 处理 (T2、T3) 和高质量分数 Cd 处理 (T4、T5) 间转运系数差异均达到显著水平 ($P<0.05$); 而根-茎和根-叶转运系数随着 Cd 质量分数增大而整体减少, 分别于 T4 处理和 T5 处理下呈单峰拐点, 但不同处理间差异均未达到显著水平 ($P>0.05$); 根-苞叶转运系数则在 T2 处理下达到最大值 0.34, 显著高于其他 Cd 质量分数处理 ($P<0.05$)。

表 3 不同 Cd 质量分数处理下玉米植株各组织 Cd 转运系数

Table 3 The Cd transport coefficients in tissues of two maize plants under different Cd concentrations

品种	处理	转运系数 (TF)				
		根-茎	根-叶	根-苞叶	根-穗轴	根-籽粒
ZD	CK	0.35 ± 0.06a	1.79 ± 0.20a	0.42 ± 0.13a	0.44 ± 0.10a	0.16 ± 0.03a
	T1	0.19 ± 0.01bc	0.39 ± 0.05c	0.27 ± 0.03bc	0.23 ± 0.02b	0.11 ± 0.02b
	T2	0.21 ± 0.06b	0.41 ± 0.08c	0.25 ± 0.04bc	0.13 ± 0.00c	0.09 ± 0.01bc
	T3	0.07 ± 0.12d	0.17 ± 0.01d	0.09 ± 0.02e	0.07 ± 0.01cd	0.02 ± 0.00ef
	T4	0.08 ± 0.01de	0.22 ± 0.00cd	0.13 ± 0.04de	0.21 ± 0.04b	0.05 ± 0.01de
	T5	0.06 ± 0.01d	0.15 ± 0.02d	0.10 ± 0.01e	0.11 ± 0.01cd	0.03 ± 0.01ef
XY	CK	0.34 ± 0.07a	1.26 ± 0.32b	0.32 ± 0.04bc	0.38 ± 0.11a	0.08 ± 0.05bc
	T1	0.14 ± 0.03cd	0.35 ± 0.05cd	0.22 ± 0.05cd	0.09 ± 0.01cd	0.07 ± 0.01cd
	T2	0.08 ± 0.01de	0.14 ± 0.02d	0.34 ± 0.09ab	0.06 ± 0.01cd	0.03 ± 0.00ef
	T3	0.08 ± 0.02de	0.20 ± 0.06cd	0.30 ± 0.08bc	0.04 ± 0.01d	0.03 ± 0.00ef
	T4	0.09 ± 0.03de	0.16 ± 0.04d	0.14 ± 0.03de	0.03 ± 0.01d	0.01 ± 0.00d
	T5	0.07 ± 0.01d	0.14 ± 0.02d	0.12 ± 0.02de	0.04 ± 0.00d	0.01 ± 0.00d

2.4 相关性分析

各处理和各组织器官中 Cd 量 Pearson 相关分析结果见表 4。Cd 处理质量分数与植株根系、茎、叶、苞叶、穗轴和籽粒中 Cd 量均呈极显著相关 ($P<0.01$), 其中与根系、茎、叶的相关系数分别达到 0.973、0.961 和 0.963; 根系与地上部组织 (茎、叶、苞叶、穗轴、籽粒) 中 Cd 量的相关性也均达到极显著水平 ($P<0.01$), 根系与茎、叶的相关系数分别为 0.941 和 0.943; 茎与叶、苞叶相关系数分别为 0.932 和 0.722, 与穗轴和籽

粒相关系数仅为 0.597 和 0.585; 籽粒中 Cd 量与各组织 Cd 量均显著相关 ($P<0.01$), 其中与穗轴相关系数最大 0.915, 其次为叶 0.729, 与处理质量分数相关系数为 0.679。由此可知, Cd 处理质量分数对两玉米品种各组织器官均有极强的质量分数效应, 对根、茎、叶的作用效应可能大于对苞叶、穗轴和籽粒的作用; 籽粒中 Cd 的积累可能存在除根系之外的其他组织器官中 Cd 的二次分配。

表 4 不同 Cd 质量分数处理下两玉米植株各组织 Cd 量相关性

Table 4 Correlation of Cd content in tissues of two maize plants under different Cd concentration treatments

相关变量	Cd 质量分数	根系	茎	叶	苞叶	穗轴	籽粒
Cd 质量分数	1	0.973**	0.961**	0.963**	0.746**	0.695**	0.679**
根系	0.973**	1	0.941**	0.943**	0.748**	0.656**	0.621**
茎	0.961**	0.941**	1	0.932**	0.722**	0.597**	0.585**
叶	0.963**	0.943**	0.932**	1	0.671**	0.751**	0.729**
苞叶	0.746**	0.748**	0.722**	0.671**	1	0.360*	0.469**
穗轴	0.695**	0.656**	0.597**	0.751**	0.360*	1	0.915**
籽粒	0.679**	0.621**	0.585**	0.729**	0.469**	0.915**	1

注 *表示在 $\alpha<0.05$ 级别 (双尾), 相关性显著; **表示在 $\alpha<0.01$ 级别 (双尾), 相关性显著。

3 讨论

3.1 不同 Cd 处理质量分数下两玉米品种 Cd 分布特征

玉米作为我国重要的粮饲两用作物, 探明不同玉米品种的 Cd 积累特征与植株分布, 对中度、轻度 Cd 污染土壤的安全种植和畜牧业的安全均具有重要的理论和实践意义。Cd 在玉米植株中的分布规律为根系 Cd 量大于茎叶^[12]。在 Cd 胁迫条件下, 玉米各器官中 Cd 量分布顺序为根>茎>叶>籽粒^[13-15], 但邓婷等^[16]研究表明, 华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米茎叶 Cd 量大于根, 而其他玉米茎叶 Cd 量均小于根系。本研究中 CK 两玉米植株中 Cd 量分布呈现为叶>根>穗轴>苞叶/茎>籽粒规律, 随着土壤 Cd 量的增加, 两玉米品种植株根、茎、叶及籽粒中的 Cd 量均逐渐上升, 且主要分布于根系、叶和苞叶之中, 其次为茎/穗轴, 籽粒占比最少, 茎、叶、苞叶及穗轴中 Cd 量与分布比例显现出极大的品种间差异和 Cd 胁迫质量分数效应。分析 CK 组和处理间 Cd 的根、叶分布巨大差异, 主要在于 Cd 量较低时并不能造成植株损伤, Cd 如同其他养分离子一样被根系吸收并运输至地上部组织, 因此导致以叶中 Cd 分布为主; 而在土壤 Cd 质量分数高于土壤质量三级标准(1.0 mg/kg Cd)时, 过量的 Cd 进入植株体内可引起植株损伤和品质安全问题, 同时也激发了植株的自我保护机制。通过限制 Cd 由根系向地上部的转运(表 3)和“区室化”等反应机制来降低 Cd 的毒害作用, 根系中 Cd 的大量积累和分布很好的印证了这一点。但由于不同作物间品种遗传特性决定其对 Cd 的耐受阈值、响应机制和自我保护能力不同, 这是导致不同品种在 Cd 的器官分布、组织转运和积累特性上存在差异的重要原因^[17-18]。另外, 考虑本试验与以往研究在试验容器、Cd 质量分数梯度、玉米品种、耕作方式、气象环境均有所不同, 导致对玉米植株 Cd 的分布问题研究结果有所出入, 有待进一步研究验证。

3.2 不同 Cd 质量分数处理下两玉米品种 Cd 积累机制

根部吸收是 Cd^{2+} 进入植株体内的主要途径, 而 Cd 进入植株根部途径与其他矿质元素一样, 可以分为 2 种: 一种是通过根表皮细胞间隙, 自由扩散进入; 另一种则是通过根表皮细胞(主要为根毛细胞)膜上运输蛋白的转运进入细胞内^[19]。Cd 进入到根毛区后, 先通过横向运输到达维管柱之后, 经木质部装载、运输和卸载过程由根部转移到地上部茎、叶、花等各个器官组织中。

根系中的 Cd 经木质部运输到地上部的过程被认为是决定地上部 Cd 量的关键。Cd 在木质部转运的过程中会在茎节点处的分散维管束内进行 Cd^{2+} 由木质

部到韧皮部的转运过程, 且在植株的生长发育过程中, 地上部茎、叶等器官组织间会经过韧皮部组织对地上部 Cd^{2+} 进行二次分配^[20]。水稻籽粒中过量的 Cd 积累与幼苗根系的吸收或 Cd^{2+} 由根系向地上部转移的能力无关, 而与韧皮部向籽粒转运 Cd^{2+} 能力有关^[21]。籽粒中 91% 的 Cd 主要是通过韧皮部的运输进入到籽粒中^[20]。而小麦研究则认为籽粒中 Cd 积累的调控机制不取决于地上部组织, 而是在于根部或者根系吸收 Cd 的能力^[22]。灌浆期没有发生 Cd^{2+} 从叶到籽粒的韧皮部转运, 籽粒内的 Cd^{2+} 来自于土壤中的根系吸收, 而且籽粒内 Cd^{2+} 积累与籽粒生物量的积累正相关^[23]。 Cd^{2+} 通过根木质部的转运是茎和籽粒中 Cd 积累的主要途径^[24]。但在本研究相关性分析显示(表 4), 玉米籽粒与根系、茎、叶、苞叶、穗轴等器官中 Cd 量均极显著相关, 且根系与苞叶、穗轴和籽粒的相关系数远低于茎、叶。由此推断, 在不同 Cd 质量分数处理下两玉米植株后续器官(苞叶、穗轴、籽粒)中 Cd 量可能存在根系之外的其他组织中 Cd 的二次分配。这与文献[20-21]的再分配理论相一致。但在本研究中没有区分 Cd 的短距离运输过程和长距离运输, 未对 Cd 转运积累过程诱发植株的生理响应(激素水平、光合作用、水分吸收和矿质元素吸收等方面)进行分析, 有待下一步深入研究。

3.3 不同 Cd 处理质量分数下两玉米品种生产实用性

依据食品安全国家标准中食品中重金属 Cd 限量标准(GB 2762—2017)^[25]和国家饲料卫生标准(GB 13078—2017)^[26], 以及 Cd 富集系数和转运系数小于 1 等方面对玉米生产适用性进行综合评价。王艳芳等^[27]利用盆栽模式设置 1 mg/kg 和 3 mg/kg 的 Cd 污染梯度, 对 6 个玉米基因型品种 Cd 吸收分配研究结果显示, 玉米郑单 958 对 Cd 的富集和转运能力最小, 在 1 mg/kg 的 Cd 处理下满足食品安全国家标准中重金属 $\text{Cd}<0.1\text{ mg/kg}$ 限量标准, 可在轻度 Cd 污染条件下用于安全生产; 而在 3 mg/kg 的 Cd 下, 其籽粒中 Cd 量远超 0.1 mg/kg, 但符合饲料卫生标准($\text{Cd}<0.5\text{ mg/kg}$), 因此, 认为该品种可作为饲料在中轻度 Cd 污染土壤下种植。孙洪欣等^[28]研究华北地区 1.03 mg/kg 的 Cd 和 56 mg/kg 的 Pb 复合污染下适宜种植的 9 个夏玉米品种对土壤 Cd、Pb 的积累和转运的潜力差异, 郑单 958 和先玉 335 籽粒中 Cd 量均符合食品安全国家标准, 且先玉 335 籽粒和秸秆富集系数均低于郑单 958。而在本研究 Cd 质量分数梯度下, 两玉米品种籽粒中 Cd 量均高于 0.1 mg/kg(食品安全国家标准), 均不适用于在 Cd 污染土壤下种植; 而作为饲料 ZD 仅适用于 1.70~6.71 mg/kg 的 Cd 污染质量分数范围; XY 籽粒转运系数和富集系数低于 ZD,

更适合作为饲料在 1.70~15.76 mg/kg 的 Cd 污染土壤上安全种植。这与王艳芳等^[27]和孙洪欣等^[28]研究结果不一致,其原因应为污染土壤 Cd 的质量分数以及土壤类型不同所致。这也表明玉米应用于 Cd 污染土壤种植有着敏感的质量分数界限和适种范围。

4 结 论

1) CK 玉米植株中 Cd 量分布主要集中于叶组织器官内。随着 Cd 质量分数增大, ZD 和 XY 植株各组织器官中 Cd 量的分布主要集中于根系、叶和苞叶之中,其次为茎/穗轴,籽粒中 Cd 量占比最少。

2) 当受 Cd 胁迫后, ZD 和 XY 根系对 Cd 富集能力最大,茎、叶和苞叶富集能力受 Cd 质量分数和品种差异影响波动,籽粒富集能力始终最低。籽粒中 Cd 量与各组织 Cd 量均显著相关 ($P < 0.01$),其中与穗轴相关系数最大 0.915。

3) 在各 Cd 质量分数下, ZD 和 XY 籽粒中 Cd 量均高于 0.1 mg/kg 食品安全国家标准,仅可作为饲料作物于特定的污染质量分数范围内 (ZD: 1.70~6.71 mg/kg, XY: 1.70~15.76 mg/kg) 安全种植。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报, 2014
- [2] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 477-483.
ZHUANG Guotai. Current situation of national soil pollution and strategies on prevention and control[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(4): 477-483.
- [3] 丁鸿, 杨杏芬. 环境镉危害早期健康效应风险评估的研究进展[J]. 国外医学(卫生学分册), 2007(5): 279-282.
- [4] 毛雪飞, 汤晓艳, 王艳, 等. 从“镉大米”事件谈我国种植业产品重金属污染的来源与防控对策[J]. 农产品质量与安全, 2013(4): 57-59, 73.
- [5] 沈凤斌. 含镉小麦再敲土壤污染警钟[J]. 生态经济, 2017, 33(9): 10-13.
- [6] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 409-417.
HUANG Yizong, HAO Xiaowei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 409-417.
- [7] 张儒德, 李军, 秦利, 等. 辽宁省5种不同基因型水稻对镉吸收差异的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5): 842-849.
ZHANG Rude, LI Jun, QIN Li, et al. Study on the difference of cadmium absorption in five rice genotypes of Liaoning Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(5): 842-849.
- [8] 熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 等. 不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 36-44.
XIONG Zi, LI Jumei, ZHAO Huiwei, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(1): 36-44.
- [9] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对Cd、Pb、As积累与转运的差异研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1 867-1 875.
DU Caiyan, YU Xiaofen, DU Jianlei, et al. Variety difference of Cd, Pb and As accumulation and translocation in different varieties of zea mays[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(9): 1 867-1 875.
- [10] WANG A Y, WANG M Y, LIAO Q, et al. Characterization of Cd translocation and accumulation in 19 maize cultivars grown on Cd-contaminated soil: Implication of maize cultivar selection for minimal risk to human health and for phytoremediation[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(6): 5 410-5 419.
- [11] 袁林, 刘颖, 兰玉书, 等. 不同玉米品种对镉吸收累积特性研究[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(1): 22-27.
YUAN Lin, LIU Ying, LAN Yushu, et al. Variations of cadmium absorption and accumulation among corn cultivars of metal pollution in soil from lead-zinc mining area[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, 36(1): 22-27.
- [12] 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.
SUN Jiaohui, CHEN Tingting, QIU Bo, et al. Research on the distribution of heavy metal in corn plants[J]. Crop Research, 2016, 30(4): 402-405.
- [13] 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 Weiwei, LIU Min, CAO Meizhu, 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.
- [14] 霍文敏, 赵中秋, 王丽, 等. 不同超富集、富集植物-玉米间作模式对玉米中镉吸收、转运的影响研究[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 118-127.
HUO Wenmin, ZHAO Zhongqiu, WANG Li, et al. Study of the effects of intercropping different hyperaccumulator and accumulator plants on Cd uptake and transportation by maize[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 118-127.
- [15] 张彪, 段恩忠, 师振亚, 等. 不同玉米品种镉积累及转移差异性研究[J]. 河南农业科学, 2017, 46(9): 25-29.
ZHANG Biao, DUAN Enzhong, SHI Zhenya, et al. Study on the differences in cadmium accumulation and transport among maize cultivars[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(9): 25-29.
- [16] 邓婷, 卢维盛, 吴家龙, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异研究[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 33-39.
DENG Ting, LU Weisheng, WU Jialong, et al. Differences of soil cadmium accumulation and translocation in different maize varieties[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 33-39.
- [17] 孙齐状, 王龙, 黄绍敏, 等. 不同磷效率小麦品种对镉、铅吸收和积累的差异分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 49-57.
SUN Qizhuang, WANG Long, HUANG Shaomin, et al. Differential analysis in the uptake and accumulation of cadmium and lead by wheat varieties with different phosphorus efficiencies[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 49-57.
- [18] XIAO Y T, DU Z J, BUSO C A, et al. Differences in root surface adsorption, root uptake, subcellular distribution, and chemical forms of Cd between low-and high-Cd-accumulating wheat cultivars[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(2): 1 417-1 427.
- [19] 刘利, 郝小花, 田连福, 等. 植物吸收、转运和积累镉的机理研究进展[J]. 生命科学研究, 2015, 19(2): 176-184.
LIU Li, HAO Xiaohua, TIAN Lianfu, et al. Research progresses on the mechanism of Cd absorption, transport and accumulation in plant[J]. Life Science Research, 2015, 19(2): 176-184.
- [20] TANAKA K, FUJIMAKI S, FUJIWARA T, et al. Quantitative estimation of the contribution of the phloem in cadmium transport to grains in rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(1): 72-77.
- [21] YAN Y F, CHOI D H, KIM D S, et al. Absorption, translocation, and remobilization of cadmium supplied at different growth stages of rice[J].

- Journal of Crop Science and Biotechnology, 2010, 13(2): 113-119.
- [22] STOLT P, ASP H, HULTIN S. Genetic variation in wheat cadmium accumulation on soils with different cadmium concentrations[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2006, 192(3): 201-208.
- [23] HARRIS N S, TAYLOR G J. Cadmium uptake and partitioning in durum wheat during grain filling[J]. BMC Plant Biology, 2013, 13: 103.
- [24] URAGUCHI S, MORI S, KURAMATA M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(9): 2 677-2 688.
- [25] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [26] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料卫生标准: GB 13078—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [27] 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 等. 镉胁迫对不同基因型玉米生长和镉吸收分配的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(7): 1 440-1 447.
- WANG Yanfang, YUE Feixue, LI Dong, et al. Effects of cadmium stress on plant growth, cadmium absorption and distribution of different genotypes of maize[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(7): 1 440-1 447.
- [28] 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化田间研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2 068-2 074.
- SUN Hongxin, ZHAO Quanli, XUE Peiying, et al. Variety difference of cadmium and lead accumulation and translocation in summer maize[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(12): 2 068-2 074.

Distribution, Enrichment and Transport of Cd in Two Maize Varieties Grown in Soils with Different Cd Contents

XIAO Yatao^{1,2}, WANG Dezhe², LI Shixin^{2*}, WANG Long³, SUN Chaoxiang², GUO Wei^{1*}

(1. Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources,

Institute of Farmland Irrigation of CAAS, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

3. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: 【Objective】Cadmium is a heavy metal commonly seen in contaminated soils. Its uptake and translocation in plants depends on many factors. In this paper, we investigated the effect of soil Cd content on Cd uptake and its subsequent translocation and accumulation in two maize varieties. 【Method】The experiment was conducted in a field, with Zhengdan 985 (ZD) and Xiangyu 335 (XY) varieties used as the model plants. Cd content in the soil varied from 0.16 mg/kg (CK) to 15.76 mg/kg. In each treatment, we measured the enrichment and translocation of Cd to each tissue organ and analyzed the correlation between soil Cd content and Cd content in different tissues and organs of the two varieties. 【Result】In all treatments, Cd was mainly accumulated in the roots, leaves and bracts, followed by stalk and ear axis. Cd content in the seeds was 0.08%~5.12%, the lowest compared with that in other organs. Cd content in the seeds of ZD increased with the increase in soil Cd content, while the maximum Cd content in the seeds of XY was 0.26 mg/kg when the soil Cd content was 6.71 mg/kg. Analysis showed that the strongest enriching organ of ZD and XY was roots and the weakest was seeds. The enrichment of Cd in stems, leaves and bracts varied with soil Cd content, though there was a varietal difference. When soil Cd content was the same, the translocation of Cd in root-to-leaf and root-to-bud was the strongest, though there were a varietal difference and soil Cd effect. Cd content in the roots, stem, leaves, bract, rachis and seeds were significantly correlated with soil Cd content, with the correlation coefficient for the root, stem and leaf being 0.973, 0.961 and 0.963, respectively. 【Conclusion】Distribution, enrichment and translocation of Cd in maize were affected by soil Cd content and the maize variety. Both ZD and XY grew healthily; there was only a limited Cd accumulation in their seeds when soil Cd content was 1.70~15.76 mg/kg, though the XY was more productive when soil Cd content was 1.70~6.71 mg/kg.

Key words: maize; cadmium; distribution; enrichment; transport

责任编辑: 赵宇龙