

应用于受As、Cd污染碱性农田上的不同玉米和大豆品种低积累效应研究

张燕辉, 杨子彦*

华北水利水电大学环境与市政工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年2月4日; 录用日期: 2025年3月5日; 发布日期: 2025年3月14日

摘 要

通过在轻度污染耕地的田间试验, 试验选取9种不同玉米品种和6种不同大豆品种对重金属As、Cd的吸收差异进行分析, 并探讨玉米和大豆对As、Cd的转运规律, 以期筛选出对As、Cd低积累玉米和大豆品种。本研究评估了九种玉米品种和六种大豆品种籽粒中砷(As)和镉(Cd)浓度, 结果显示, 这些品种的污染物浓度均符合GB2762-2022《食品安全国家标准——食物中污染物限量》要求。通过分析各品种的转运系数, 发现As和Cd的根部到籽粒的平均转运系数分别为0.0011和0.0056, 均低于1, 表明污染物在作物中的积累较低。此外, 各品种的产量较高。试验初步推荐MC807、郑单952和郑豆1307为该区域受污染耕地的低累积农作物品种, 具有较好的安全利用前景。

关键词

田间试验, 吸收差异性, 低累积, 转运系数

Study on Low Accumulation Effects of Different Corn and Soybean Varieties on Alkaline Soils Contaminated with As and Cd

Yanhui Zhang, Ziyan Yang*

School of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Feb. 4th, 2025; accepted: Mar. 5th, 2025; published: Mar. 14th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张燕辉, 杨子彦. 应用于受 As、Cd 污染碱性农田上的不同玉米和大豆品种低积累效应研究[J]. 农业科学, 2025, 15(3): 209-217. DOI: 10.12677/hjas.2025.153025

Abstract

This study investigated the absorption and transport of arsenic (As) and cadmium (Cd) in nine maize and six soybean varieties through field trials on mildly contaminated soils. The aim was to identify maize and soybean varieties with low accumulation of As and Cd. Results showed that the concentrations of As and Cd in these varieties were within the limits set by GB2762-2022 “National Food Safety Standards—Limits of Contaminants in Food”. The transfer coefficients from root to grain for As and Cd were 0.0011 and 0.0056, respectively, both below 1, indicating low accumulation of these metals in the crops. Additionally, the varieties exhibited high yields. Based on these findings, MC807, Zhengdan 952, and Zhengdou 1307 are recommended as low-accumulation crop varieties for the safe utilization of contaminated lands in this region.

Keywords

Field Trial, Absorption Variability, Low Accumulation, Transport Coefficient

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工业经济的高速发展导致了土壤环境的污染, 其中多数来源于重金属产生的污染。重金属在土壤中不断累积, 通过作物根系吸收转运至籽粒, 造成可食用部分重金属超标, 对周边居民健康造成威胁。农业安全生产的问题是目前重点关注的问题, 但农业上重金属污染修复仍具有解决问题难度大、容易造成二次污染的特点。为了在修复受污染土地的同时确保农业生产安全, 植物与农艺相结合的修复策略已成为重金属污染生物修复技术的主要选择之一[1]。该技术具有较强的操作性和较好的修复效果, 且不会引发二次污染。然而, 当前这一技术尚未形成完善的操作模式和标准化流程。目前, 我国通过检测已经发现 500 多种超富集植物[2], 涉及到禾本科、廖科、菊科、豆科、十字花科、蔷薇科等多种科属[3]-[5]。

试验区选择在北方某市一块受 As、Cd 污染的碱性农田, 在试验区范围内种植 9 种不同的玉米品种和 6 种不同的大豆品种, 本研究旨在探讨重金属砷(As)和镉(Cd)在玉米和大豆中的积累与转运特征, 力图筛选出适合本地区种植的低累积农作物品种, 为安全利用受轻度重金属污染的耕地提供科学依据。

2. 材料和方法

2.1. 供试材料

玉米: 金诚 35、隆平 206、驻玉 216、峰玉 287、登海 605、MC807、联创 808、MC817、郑单 952。
大豆: 郑 1307、郑 1440、商豆 151、安豆 5240、周豆 33、毛豆。

2.2. 实验区域

选择北方某市一处受污染碱性农田, 其土壤基本理化性质: pH 值为 6.43~7.44, 有机质为 33.3~48.5, 速效磷为 16.5~26.6, 速效钾为 103~229, 土壤砷为 24.5~35.7, 土壤镉为 0.5~0.61, 属中轻度污染土壤。

2.3. 实验方法

2020 年 7 月进行该项技术的田间中试试验, 田间实验区域分为两个区组, 分别为受污染耕地进行低累积玉米品种筛选区、受污染耕地进行低累积大豆品种筛选区。玉米筛选区在此基础上又分成 9 个小区, 小区规格为 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$, 小区内分别种植金诚 35、隆平 206、驻玉 216、峰玉 287、登海 605、MC807、联创 808、MC817 和郑单 952; 大豆筛选区在此基础上又分成 6 个小区, 小区规格为 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$, 小区内分别种植郑 1307、郑 1440、商豆 151、安豆 5240、周豆 33 和毛豆; 具体区域布设如图 1 所示, 田间管理按当地传统模式进行。

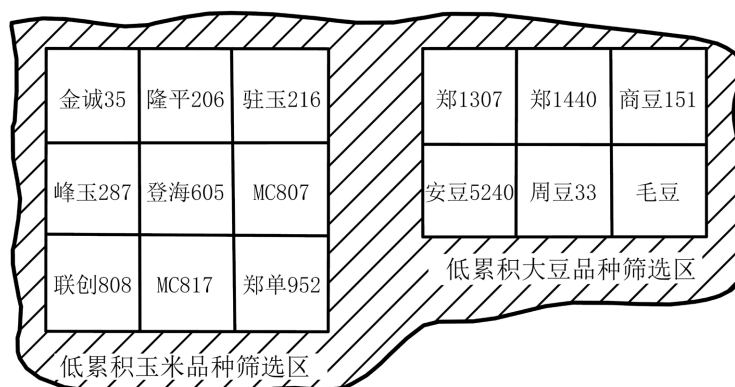


Figure 1. Pilot area layout
图 1. 中试区域布设图

2.4. 样品处理与分析

为了能够更好地了解试验区的污染情况, 试验在每个植物品种所在区域各布设一个点位, 待植物成熟之后, 按照五分法对各个点位的作物籽粒和土壤进行取样, 并将样品用自封袋封装。然后将装有样品的自封袋放入布袋中并对其进行编号。在采集样品时, 为了避免样品受到污染, 必须在整个取样过程中确保工具的清洁, 一共采集了 15 个植物样品。

植物 As、Cd 的测定: 随机选取 3 株成熟的玉米、大豆籽粒。100℃杀青后, 烘干至恒重, 粉碎, 混合均匀。用混合酸($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4 = 4:1$)进行消解, 采用 ICP-MS 进行测定。

2.5. 数据统计分析

各玉米和大豆转运系数计算公式如下:

$$F_{t1} \text{ 籽粒/土壤} = \frac{\text{As 含量(籽粒)}}{\text{As 含量(土壤)}}$$

$$F_{t2} \text{ 籽粒/土壤} = \frac{\text{Cd 含量(籽粒)}}{\text{Cd 含量(土壤)}}$$

实验数据通过 Microsoft Excel 软件进行处理, 处理后的结果使用 Origin 2019 软件进行绘图[6]。

3. 结果与分析

3.1. 不同玉米品种 As、Cd 含量分析

在试验区选择污染程度相近的区域进行低累积玉米品种筛选试验, 旋耕后播种前区域内采集 4 个

0~20 cm 表层土壤进行检测，数据如表 1 所示。9 个玉米品种砷(As)含量范围为 0.015 至 0.035 mg/kg，平均值为 0.022 mg/kg，均低于《食品安全国家标准——食物中污染物限量》(GB2762-2022)中规定的 0.5 mg/kg 限值。整体标准差为 0.006，且不同品种间 As 含量差异较小，所有品种均未超过标准限值。镉(Cd)含量在 0.004 至 0.011 mg/kg 之间，平均为 0.006 mg/kg，均低于《食品安全国家标准——食物中污染物限量》(GB2762-2022)中规定的 0.2 mg/kg 限值[7]，整体标准差为 0.002，品种间 Cd 含量变化不明显，9 个品种均不超标。

Table 1. Soil test results before treatment
表 1. 处理前土壤检测结果

检测项目	编号				平均值
	1	2	3	4	
PH	7.4	7.5	7.5	7.7	/
砷(mg/kg)	26.6	26.9	26.7	24.5	26.18
镉(mg/kg)	0.54	0.61	0.55	0.50	0.55

如图 2、图 3 所示，依据《食品安全国家标准——食品中污染物限量》(GB2762-2022)的要求，低累积玉米品种筛选试验的所有供试品种收获后玉米籽粒中砷、镉的含量均不超标。郑单 952 和 MC807 砷含量最低为 0.015 mg/kg，其次为联创 808 和峰玉 287，砷含量分别为 0.019 mg/kg 和 0.020 mg/kg；金诚 35 镉含量最低为 0.004 mg/kg，其次为联创 808、MC817 和驻玉 216，镉含量为 0.005 mg/kg。综合检测结果，这九个供试玉米品种中 MC807、郑单 952 可作为该区域受污染耕地安全利用低累积玉米推广品种。

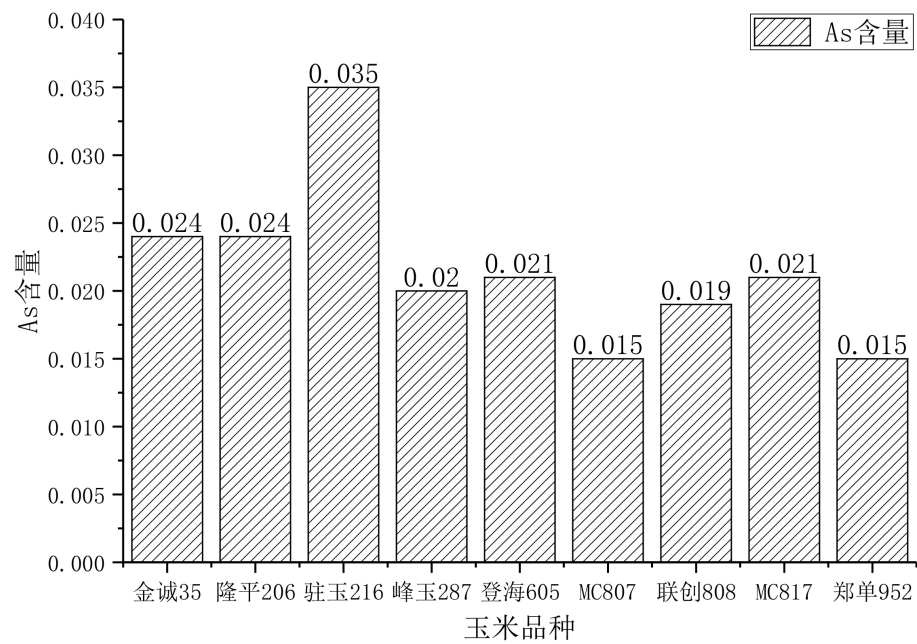


Figure 2. Arsenic (As) content in different maize varieties
图 2. 不同玉米品种 As 含量

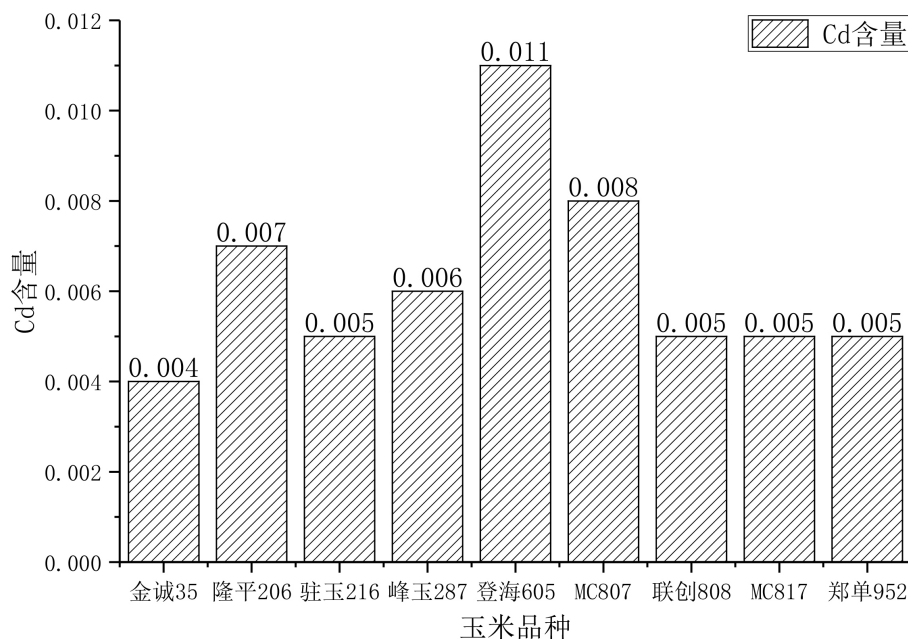


Figure 3. Cadmium (Cd) content in different maize varieties

图 3. 不同玉米品种 Cd 含量

3.2. 不同大豆品种 As、Cd 含量分析

在试验区选择污染程度相近的区域进行低累积大豆品种筛选试验, 旋耕后播种前区域内采集 4 个 0~20 cm 表层土壤进行检测, 数据如表 2 所示。6 个大豆品种的砷(As)含量呈现从 0.022 mg/kg 至 0.10 mg/kg 的波动, 平均含量为 0.054 mg/kg, 低于《食品安全国家标准——食品中污染物限量》(GB2762-2022)中 As 含量标准限制(0.5 mg·kg⁻¹), 整体标准差为 0.027, 品种间 As 含量变化不明显, 6 个品种均不超标。6 个大豆品种的镉(Cd)含量呈现从 0.027 至 0.061 mg/kg 的波动, 平均含量为 0.040 mg/kg, 低于《食品安全国家标准——食品中污染物限量》(GB2762-2022)中 Cd 含量标准限制(0.2mg·kg⁻¹), 整体标准差为 0.012, 品种间 Cd 含量变化不明显, 6 个品种均不超标。

Table 2. Soil test results before treatment

表 2. 处理前土壤检测结果

检测项目	编号			平均值
	1	2	3	
PH	7.8	7.7	7.9	/
砷(mg/kg)	27.1	31.5	35.7	31.43
镉(mg/kg)	0.60	0.50	0.51	0.54

如图 4、图 5 所示, 依据《食品安全国家标准——食品中污染物限量》(GB2762-2022)的要求, 低累积大豆品种筛选试验的所有供试品种收获后玉米籽粒中砷、镉的含量均不超标。其中商豆 151 累积砷的含量最低为 0.022 mg/kg, 其次为郑豆 1307 砷含量为 0.029 mg/kg; 郑豆 1440 镉含量最低为 0.027 mg/kg, 其次为郑豆 1307, 镉含量为 0.029 mg/kg。综合检测结果, 这七个供试大豆品种中郑豆 1307 可作为该区域受污染耕地安全利用低累积大豆推广品种。

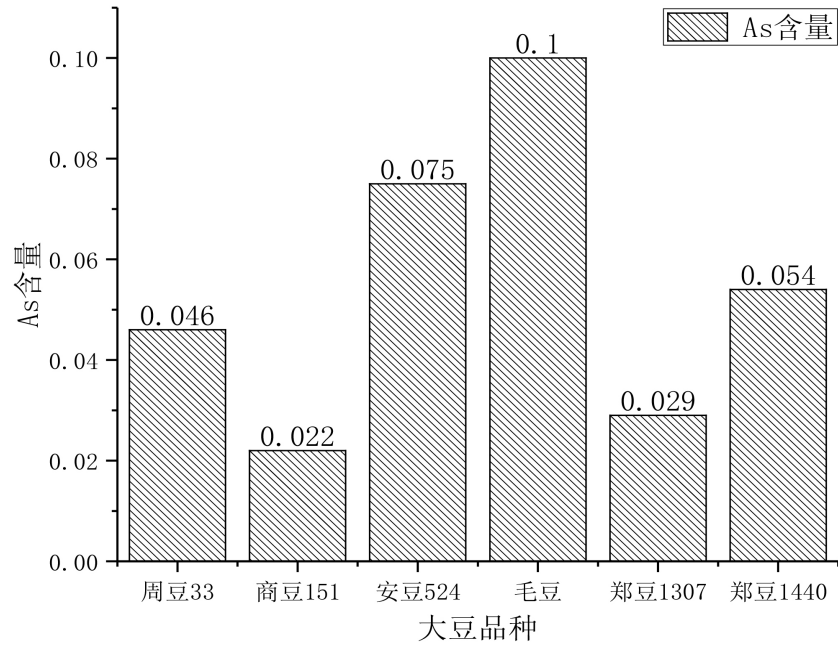


Figure 4. Arsenic (As) content in different soybean varieties
图 4. 不同大豆品种 As 含量

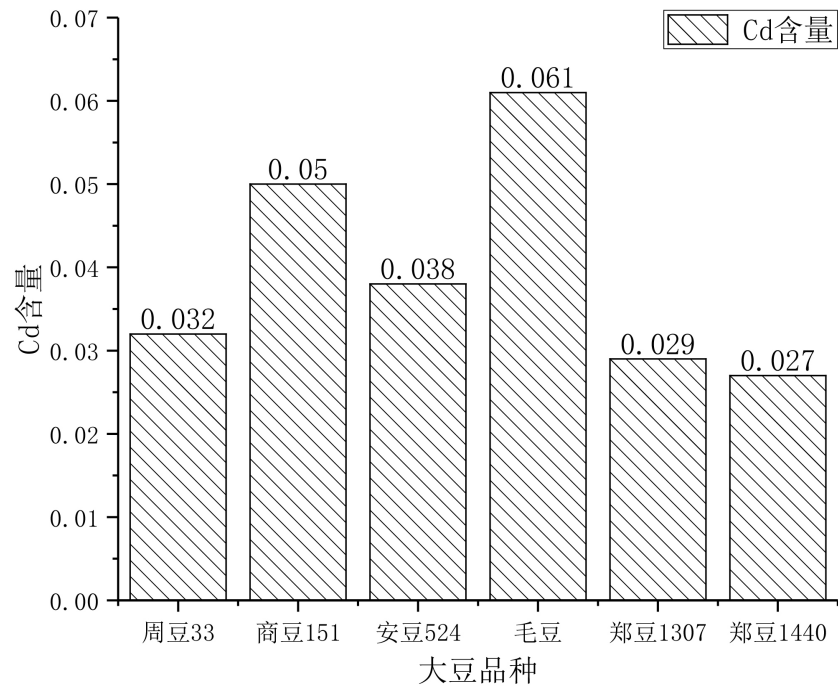


Figure 5. Cadmium (Cd) content in different soybean varieties
图 5. 不同大豆品种 Cd 含量

3.3. 玉米和大豆转运系数

Ft (籽粒/土壤)比值反映了重金属从土壤向籽粒的转运程度。数值较小表示转运较难,表明重金属积累较低;而数值较大则意味着转运较易,积累效果较差[8]。

如表 3 所示, As 积累作用较弱品种 F_{tl} (玉米籽粒/土壤)平均值为 0.0007, As 积累作用较强品种 F_{tl} (玉米籽粒/土壤)平均值为 0.0011, 较强品种 F_{tl} (玉米籽粒/土壤)平均值为较弱品种平均值的 1.57 倍。As 积累作用较弱品种 F_{tl} (大豆籽粒/土壤)平均值为 0.0012, As 积累作用较强品种 F_{tl} (大豆籽粒/土壤)平均值为 0.0056, 较强品种 F_{tl} (大豆籽粒/土壤)平均值为较弱品种平均值的 4.67 倍。说明不同植物对重金属的转运能力不同, 农作物的类别也是土壤中重金属 As 向植物籽粒转移的重要因素。驻玉 216、毛豆的 F_{tl} (籽粒/土壤)最大, 分别为 0.001337、0.003182, MC807、商豆 151 的 F_{tl} (籽粒/土壤)最小, 分别为 0.000573、0.0007。

Table 3. Translocation factors of arsenic (As) in various plant varieties

表 3. 各植物品种对 As 的转运系数

As 积累作用类型	玉米品种	F_{tl} , 玉米籽粒/土壤	大豆品种	F_{tl} , 大豆籽粒/土壤
较弱	MC807	0.000573	商豆 151	0.0007
	郑单 952	0.000573	郑豆 1307	0.000923
	联创 808	0.000726	周豆 33	0.001464
	峰玉 287	0.000764	郑豆 1440	0.001718
	登海 605	0.000802		
	MC817	0.000802		
	平均值	0.0007		0.0012
较强	金诚 35	0.000917	安豆 524	0.002386
	隆平 206	0.000917	毛豆	0.003182
	驻玉 216	0.001337		
	平均值	0.0011		0.0056

Table 4. Translocation factors of cadmium (Cd) in various plant varieties

表 4. 各植物品种对 Cd 的转运系数

Cd 积累作用类型	玉米品种	F_{t2} , 玉米籽粒/土壤	大豆品种	F_{t2} , 大豆籽粒/土壤
较弱	金诚 35	0.007273	郑豆 1440	0.05
	郑单 952	0.009091	郑豆 1307	0.053704
	联创 808	0.009091	周豆 33	0.059259
	MC817	0.009091	安豆 524	0.07037
	驻玉 216	0.009091		
	平均值	0.0087		0.0583
较强	峰玉 287	0.010909	商豆 151	0.092593
	隆平 206	0.012727	毛豆	0.112963
	MC807	0.014545		
	登海 605	0.02		
	平均值	0.0145		0.1028

如表 4 所示, Cd 积累作用较弱品种 F_{12} (玉米籽粒/土壤)平均值为 0.0087, Cd 积累作用较强品种 F_{12} (玉米籽粒/土壤)平均值为 0.0145, 较强品种 F_{12} (玉米籽粒/土壤)平均值为较弱品种平均值的 1.67 倍。Cd 积累作用较弱品种 F_{12} (大豆籽粒/土壤)平均值为 0.0583, Cd 积累作用较强品种 F_{12} (大豆籽粒/土壤)平均值为 0.1028, 较强品种 F_{12} (玉米籽粒/土壤)平均值为较弱品种平均值的 1.76 倍。说明不同植物对重金属的转运能力不同, 农作物的类别也是土壤中重金属 Cd 向植物籽粒转移的重要因素。登海 605、毛豆的 F_{11} (籽粒/土壤)最大, 分别为 0.02、0.112963, 金诚 35、郑豆 1440 的 F_{12} (籽粒/土壤)最小, 分别为 0.007273、0.05。

4. 讨论

4.1. 玉米和大豆品种分析

通过试验, 在中轻度受污染农田条件下, 试验选取的几种不同的玉米和大豆品种籽粒中砷(As)和镉(Cd)的含量均符合《食品安全国家标准—食物中污染物限量》(GB2762-2022)。上述玉米和大豆品种中 As、Cd 含量, 玉米明显低于大豆。据此分析玉米更适合于试验区种植, 而且搭配钝化剂具有很大的潜力。

目前, 种植低积累农作物是应对土壤污染以及保障食品安全的一种非常有效且绿色安全的手段。但是目前还没有相关的法律法规来确定作物筛选的标准, 对于低累积作物也没有清晰的定义和相关标准, 关于重金属胁迫下作物生长和产量变化的研究较少。当种植在污染土壤的农作物作为食物时, 其可食用部分的重金属含量能够显著低于国家食品或者饲料卫生标准, 并且在种植过程中符合农业安全生产要求, 这类农作物被视为符合低累积作物的特征[9]。

聂发辉指出[10], 低积累植物需先通过盆栽实验和污染土壤筛选, 其可食部分的重金属含量应低于地下部分的 1/100。然而, 该观点未对可食部分的重金属限量提供具体建议。在实验中, 9 种玉米和 6 种大豆品种的转运系数均小于 1, 这表明刘维涛[11]等提出的标准较为宽松。低累积作物应具备以下条件: 1) 农作物在收获后籽粒中的重金属含量应满足 GB2715-2005 中的要求。2) 农作物在中轻度污染农田中种植, 收获后的农作物产量不应该有明显的下降。3) 低积累的农作物由土壤向籽粒中的转运系数原则上是越低越好, 最好低于 0.1。

4.2. 不同玉米和大豆品种对重金属 Cd 吸收和运输差异性

土壤重金属在不同种农作物体内的转运及聚集存在很大差别。当前, 筛选出具有低累积能力的农作物品种是保障食品安全以及应对重金属污染土壤的有效方法。农作物对土壤重金属高低积累的特征与许多因素相关, 不同重金属在农作物体内的转运途径不同, 根际有机质分泌与根梢运输在重金属转运及聚集上发挥着重大作用[12]-[14]。

重金属在从土壤向农作物籽粒转运过程中有诸多阻隔环节, 农作物的根部会截留大部分的重金属。植物根际分泌物中含有多种有机和无机配体, 它们与重金属形成螯合物, 从而抑制重金属的吸收。根细胞壁上存在多个结合位点, 只有当这些位点饱和时, 多余的金属离子才会进入细胞[15]-[17]。

5. 结论

1) 不同品种农作物籽粒中重金属积累量差异性主要是由于土壤向农作物中的转移能力不同, 即转运系数不同, 9 种玉米和 6 种大豆的转运系数均小于 1。

1) 郑单 952 和 MC807 砷含量最低为 0.015 mg/kg, 其次为联创 808 和峰玉 287, 砷含量分别为 0.019 mg/kg 和 0.020 mg/kg; 金诚 35 镉含量最低为 0.004 mg/kg, 其次为联创 808、MC817 和驻玉 216, 镉含量为 0.005 mg/kg。对于砷, MC807 的 F_{11} (籽粒/土壤)最小为 0.000573。对于镉, 金诚 35 的 F_{12} (籽粒/土壤)

最小为 0.007273。综合考虑九个供试玉米品种中 MC807、郑单 952 可作为该区域受污染耕地安全利用低累积玉米推广品种。

3) 商豆 151 累积砷的含量最低为 0.022 mg/kg, 其次为郑豆 1307 砷含量为 0.029 mg/kg; 郑豆 1440 镉含量最低为 0.027 mg/kg, 其次为郑豆 1307, 镉含量为 0.029 mg/kg。对于砷, 商豆 151 的 F_{t1} (籽粒/土壤) 最小为 0.0007。对于镉, 郑豆 1440 的 F_{t2} (籽粒/土壤) 最小为 0.05。综合考虑六个供试大豆品种中郑豆 1307 可作为该区域受污染耕地安全利用低累积大豆推广品种。

参考文献

- [1] 王小平, 马延龙, 姚一铭, 刘晶晶. 应用于碱性土壤上重金属污染的超积累植物种植研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(11): 107-112.
- [2] 李江龙, 郭丽琢, 王月萍, 刘宏胜, 夏张祥. 有机无机氮肥配施与地膜互作对旱地胡麻水分利用、籽粒产量的影响[J]. 肥料与健康, 2021, 48(4): 29-36, 40.
- [3] 孙向辉, 蔡寒玉, 赵京, 田莹莹, 杜臻杰, 牛得草. 黏土矿物与磷肥复配对潮土中镉钝化效果及麦苗 Cd 吸收的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 20-25.
- [4] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 毛妍婷, 段宗颜, 包立, 张乃明, 陈军. 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): 1867-1875.
- [5] 张静静, 赵永芹, 许亮, 化党领, 杨秋云. 膨润土、褐煤及其混合添加对土壤镉污染钝化修复效应[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 85-92.
- [6] 李乐乐, 刘源, 李宝贵, 胡超, 樊涛, 赵志娟, 吴大付, 王迪, 李中阳. 镉低积累小麦品种的筛选研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 53-58, 72.
- [7] 《食品安全国家标准食品中污染物限量》实施[J]. 标准生活, 2023(4): 7.
- [8] 黑泽文, 向慧敏, 章家恩, 梁开明. 豆科植物修复土壤重金属污染研究进展[J]. 生态科学, 2019, 38(3): 218-224.
- [9] 杨姝, 贾乐, 毕玉芬, 湛方栋, 陈建军, 李博, 祖艳群, 李元. 7 种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤镉铅的累积特征及品种差异[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 222-228.
- [10] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 136-138.
- [11] 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.
- [12] 张彪, 段恩忠, 师振亚, 程海宽, 周志云, 周振, 孙晓雪, 苗丽娟, 杨素勤. 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.
- [13] Grant, C.A., Clarke, J.M., Duguid, S. and Chaney, R.L. (2008) Selection and Breeding of Plant Cultivars to Minimize Cadmium Accumulation. *Science of the Total Environment*, **390**, 301-310.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.038>
- [14] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 陈安强, 毛妍婷, 胡万里, 付斌, 袁正湘, 陈军. 砷、铅、镉低积累玉米品种筛选研[J]. 西南农业学报, 2017, 30(1): 5-10.
- [15] 陈惠君, 谭玲, 李取生, 罗涛, 方皓, 余丹萍, 胡妮, 杨耀帅. Cr/Pb 低积累菜心品种筛选及其根际机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1249-1256.
- [16] 杨启良, 武振中, 陈金陵, 刘小刚, 王卫华, 刘艳伟. 植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1075-1084.
- [17] 胡鹏杰, 李柱, 钟道旭, 郑蕾娜, 居述云, 吴龙华, 骆永明. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J]. 植物生理学学报, 2014, 50(5): 577-584.