

孟媛,张亮,胡淑娟,等. 外源硒对叶菜镉砷富集和转运的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(18):165-172.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.18.023

## 外源硒对叶菜镉砷富集和转运的影响

孟媛<sup>1,2</sup>,张亮<sup>1</sup>,胡淑娟<sup>1</sup>,梁敏锐<sup>1</sup>,王懋<sup>1</sup>,王航航<sup>1</sup>,于乐<sup>1</sup>,程小清<sup>1</sup>,刘丹<sup>1</sup>,屈志昊<sup>1</sup>,王春林<sup>1</sup>  
(1. 陇东学院农业与生物工程学院,甘肃庆阳 745000; 2. 甘肃省陇东生物资源保护利用与生态修复重点实验室,甘肃庆阳 745000)

**摘要:**为系统探究外源硒(Se)添加对叶菜类作物在镉砷复合污染中重金属累积的调控作用,通过设计多种污染(对照、单一 Cd、单一 As、Cd & As 复合污染)与 Se 处理组合,探索 Se 对叶菜中 Cd、As 累积的影响。结果表明,在镉砷复合污染下,外源添加 Se 降低了四季无斑香、大麦草、白萝卜苗地上部的 Cd 含量,降幅分别为 75.9%、17.6%、96.9%,但增加了 As 污染下白萝卜苗、四季香甜尖油麦、小叶茼蒿、红萝卜苗、小麦草地上部的 As 含量。Se 降低了鸡毛菜、红萝卜苗和白萝卜苗的根向地上部转运 Cd 系数 TF-Cd(降幅分别是 41.9%、46.2%、96.2%),以及空心菜和大麦草的 TF-As(降幅分别为 51.8% 和 80.9%),但增强了小叶茼蒿和小麦草的 TF-Cd。对于多数叶菜品种,无论是单 As 污染还是复合污染,外源添加 Se 均能显著提高地上部 Se 含量,尤其在复合污染下效果更为显著。Cd & As-Se 处理显著促进了小麦草、甜脆结球生菜、小叶茼蒿和佳香油麦菜等对 Se 的转运。

**关键词:**硒(Se);叶菜;重金属复合污染;转运系数;累积特性

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)18-0165-08

随着工业化进程的加速和农业活动的广泛开展,土壤重金属污染已成为全球关注的环境问题之一,其中镉(Cd)和砷(As)作为典型的重金属和类金属污染物,因其高毒性和难降解性,对农产品安全和人类健康构成了严重威胁<sup>[1-2]</sup>。叶菜类植物作为人们日常饮食中不可或缺的组成部分,其重金属累积水平直接影响到食品安全和人类健康<sup>[3]</sup>。因此,探索有效策略以降低叶菜类植物在重金属污染土壤中的重金属累积,对于保障农产品安全具有重要意义。

硒(Se)作为一种对人体健康有益的微量元素,近年来在缓解植物重金属胁迫方面的潜力逐渐受到关注<sup>[4-5]</sup>。硒在植物体内能够参与多种抗氧化防御机制,减轻重金属诱导的氧化损伤,并通过影响重金属的吸收、转运和代谢过程,从而调控植物体内重金属的累积<sup>[6]</sup>。然而,硒对不同植物种类及不同重金属污染的作用效果存在差异<sup>[7-8]</sup>。目前关于硒对叶菜在镉砷复合污染条件下重金属积累及转

运影响的研究仍较为有限。

基于此,本研究聚焦于硒对多种叶菜类植物在镉和砷污染中重金属累积特性的影响,旨在揭示硒在缓解叶菜重金属污染中的作用,并探讨其品种特异性。通过设计一系列处理组合,包括无污染对照、单一及复合重金属污染条件下硒的添加处理,测定了不同叶菜类植物地上部和根部的 Cd、As、Se 含量,并进一步分析了硒对重金属转运系数的影响。本研究深入探索硒调控叶菜类植物重金属累积的机制及品种差异,可为理解硒生理生化作用提供新视角,并科学指导合理施硒以提升叶菜营养品质、降低重金属污染,对保障农产品安全及农业可持续发展具有一定的参考意义。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

自 2023 年 9 月至 2023 年 11 月,试验在陇东学院农业与生物工程学院躬耕楼 408 实验室进行。供试叶菜为四季无斑香(*Brassica campestris* ssp. *chinensis* var. *communis*)、大麦草(*Hordeum vulgare* var. *distichum*)、小麦草(*Triticum aestivum* var. *tenue*)、佳香油麦菜(*Lactuca sativa* var. *longifolia*)、空心菜(*Ipomoea aquatica*)、真好吃甜油麦(*Lactuca sativa* var. *capitata* f. *ramosa*)、四季香甜尖油麦(*Lactuca sativa* var. *asparagina*)、甜脆结球生菜

收稿日期:2024-10-23

基金项目:国家自然科学基金青年基金(编号:32001200);甘肃省青年科技基金计划(编号:22JR11RM171);甘肃省庆阳市科技计划(编号:QY-STK-2022A-009);陇东学院博士基金。

作者简介:孟媛(1991-),女,河南商丘人,博士,副教授,从事农作物与药用植物对重金属的响应及外源硒调控研究。E-mail: 971055042@qq.com。

(*Lactuca sativa* var. *capitata*)、九江玻璃生菜 (*Lactuca sativa* var. *longifolia* f. *crispa*)、鸡毛菜 (*Brassica rapa* var. *chinensis*)、小叶茼蒿 (*Chrysanthemum coronarium* var. *angustifolium*)、红萝卜 (*Daucus carota* subsp. *sativus*) 苗、白萝卜 (*Raphanus sativus* subsp. *sativus*) 苗。所有种子均购自甘肃省庆阳市陇东农资商城。

### 1.2 试验试剂

水培营养母液成分 (1/2 霍格兰营养液配方): 1 mol/L  $\text{KNO}_3$  溶液, 1 mol/L  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  溶液, 1 mol/L  $\text{MgSO}_4$  溶液, 1 mol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液, 20.06  $\mu\text{mol/L}$  EDTA-Fe 溶液, 阿农微量元素。

重金属溶液:  $\text{CdCl}_2$  溶液和  $\text{NaAsO}_2$  溶液, 用于提供 Cd 和 As 元素。

Se 溶液: 使用硒酸钠 ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) 作为 Se 源。

EDTA- $\text{Na}_2$  (乙二胺四乙酸二钠) 溶液 (浓度 20 mmol/L): 用于清洗根系以去除表面附着的金属离子。

### 1.3 试验方法

育苗与移苗: 将叶菜种子均匀播种于育苗盆中, 保持土壤湿润, 早晚各浇水 1 次, 促进种子萌发。种子生根后, 挑选健康幼苗移至水培箱中。水培箱规格为长 53.3 cm, 宽 34.3 cm, 深 5.1 cm, 容积 9 L, 内设定植板, 板上均匀分布 24 个小孔, 每孔中填充海绵块定植一棵幼苗。

水培管理: 水培箱水位控制在定植板下 3 ~ 5 cm, 确保幼苗根部能接触水面。使用 1/2 霍格兰配方营养液进行水培, 每 2 ~ 3 周更换 1 次营养液, 并根据需要补充蒸馏水。每天利用小型供氧机为水培营养液供氧, 保证根系呼吸需求。

金属胁迫处理: 叶菜生长至成熟阶段后, 将每棵植株分别移至 250 mL 黑色锥形瓶中进行下一步处理。设置 8 种处理组合 (表 1), 包括无污染对照、单一 Cd 污染、单一 As 污染、Cd & As 复合污染以及在这些基础上分别添加 Se 的处理。每种处理重复 5 ~ 6 次。使用精确量具按表添加 Cd、As、Se 元素, 处理时间持续 96 h。

供试 13 种叶菜, 每种叶菜均经过不同 Cd、As、Se 组合的 8 个试验处理 (表 1)。试验设计中的 Cd、Cd-Se、Cd & As、Cd & As-Se 处理用于分析外源添加 Se 对叶菜 Cd 含量及根向地上部转运 Cd 的影响; 处理 As、As-Se、Cd & As、Cd & As-Se 用于分析外源添加 Se 对 As 含量及 As 转运系数的影响; 处

理 CK-Se、Cd-Se、As-Se、Cd & As-Se 主要用于分析外源添加 Se 对 Se 含量及 Se 转运系数的影响。

表 1 试验处理的重金属和硒浓度 mg/L

编号	处理号	Cd	As	Se
1	CK-0	0	0	0
2	CK-Se	0	0	2
3	Cd	20	0	0
4	Cd-Se	20	0	2
5	As	0	100	0
6	As-Se	0	100	2
7	Cd & As	20	100	0
8	Cd & As-Se	20	100	2

收获与样品处理: 处理结束后, 收获植株并进行拍照记录, 根据处理组合分组拍照。对植株进行洗根处理, 依次用 EDTA- $\text{Na}_2$  溶液、清水浸泡, 去除根系表面附着的金属离子。擦干植株后, 分别称量地上部和地下部的鲜重, 并装入信封中。将所有信封放入烘箱中, 于 70  $^{\circ}\text{C}$  烘干 5 d, 称量干重并记录。

重金属含量测定: 将烘干后的样品送至专业检测机构。样品 Cd 测定采用  $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$  酸消煮-原子吸收分光光度法 (日立 Z2000 原子吸收分光光度计); 样品 As 测定采用  $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$  酸消解-原子荧光法 (AFS-930 型双道原子荧光光度计)。

### 1.4 数据分析

利用双因素方差分析和多重比较对测定的数据进行差异显著性比较, 计算重金属转运系数 (TF), 并分析 Se 对叶菜类植物 Cd、As 累积及转运的影响, 探讨其品种特异性。采用 GraphPad Prism 9.5.1 作图。

元素 Cd、As、Se 的根向地上部转运系数 (TF) 为地上部 Cd、As、Se 元素浓度与根部浓度的比值。

## 2 结果分析

### 2.1 外源添加 Se 对叶菜 Cd 含量的影响

Se 对地上部 Cd 含量的降低作用: 由图 1-A 可知, 四季无斑香、大麦草、白萝卜苗 (在单 Cd 或 Cd & As 复合污染处理下) 在添加 Se 后地上部 Cd 含量显著下降。

Se 对地上部 Cd 含量无明显影响: 由图 1-B 可知, 对于未显示显著差异的植物品种 (佳香油麦菜、真好吃甜油麦、甜脆结球生菜、九江玻璃生菜), 可以认为 Se 的添加对它们的 Cd 含量没有明显影响。

Se 对地上部 Cd 含量的升高作用:空心菜、红萝卜苗、鸡毛菜、小叶茼蒿、小麦草(在 Cd & As 复合污染处理下)添加 Se 后地上部 Cd 含量显著增加(图 1 - C)。

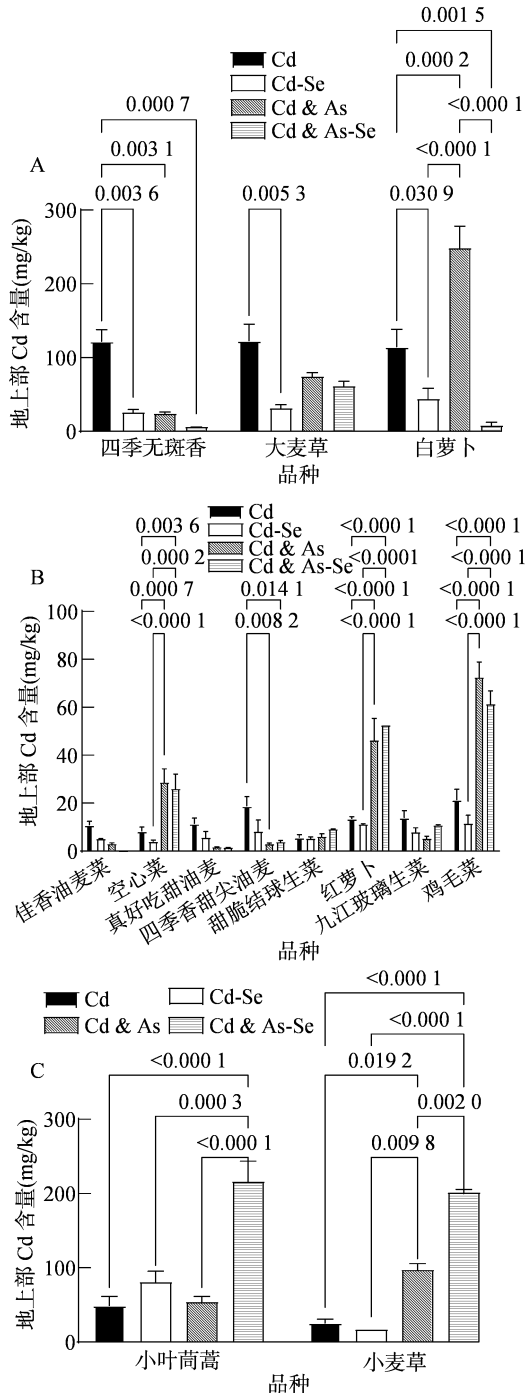


图 1 不同处理下叶菜地上部的 Cd 含量

Se 对根部 Cd 含量无明显影响:对于空心菜、四季无斑香、红萝卜苗、四季香甜尖油麦、鸡毛菜、小麦草,Se 对其根部 Cd 含量的影响不明显(图 2 - A)。

Se 对根部 Cd 含量的升高作用:由图 2 - B 可知,在 Cd - Se 处理下,白萝卜苗和大麦草的地下部 Cd 含量显著高于 Cd 处理或其他处理,这说明外源添加 Se 在单 Cd 处理下对这 2 种蔬菜的根部 Cd 含量有升高作用。甜脆结球生菜在 Cd - Se 处理下 Cd 含量与 Cd 处理有显著差异,且含量较高,隐含了 Se 可能对其根部 Cd 含量有升高作用。

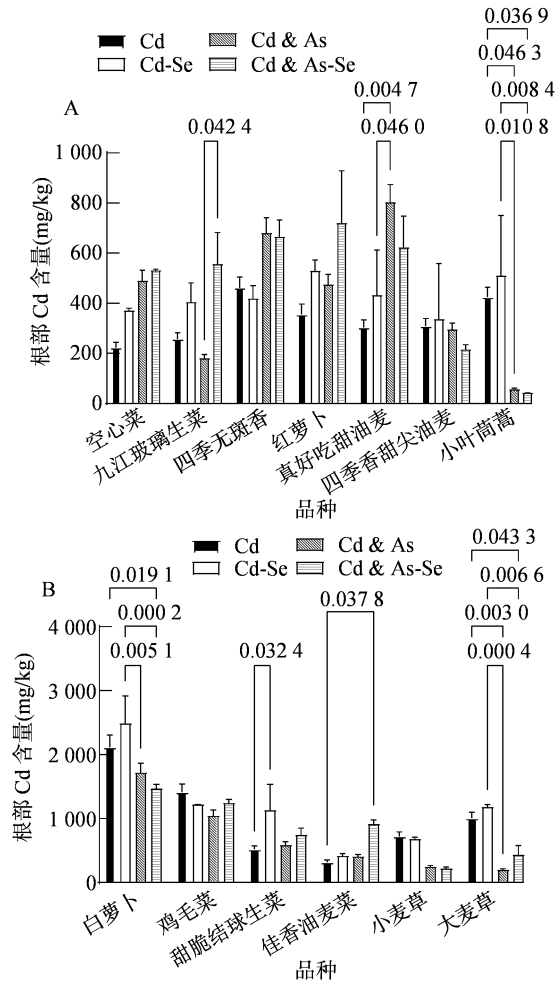


图 2 不同叶菜根部的 Cd 含量

### 2.2 外源添加 Se 对叶菜 As 含量的影响

Se 对地上部 As 含量无明显影响:对于佳香油麦菜、九江玻璃生菜、空心菜、四季无斑香、甜脆结球生菜、真好吃甜油麦、大麦草和鸡毛菜,Se 的添加并未导致地上部 As 含量发生显著变化(图 3 - A)。

Se 对地上部 As 含量的升高作用:由图 3 - B 可知,在 As - Se 处理下,白萝卜苗、四季香甜尖油麦的地上部 As 含量显著升高(图 3 - B)。与 Cd & As 处理相比较,Cd & As - Se 处理下,小叶茼蒿、红萝卜苗、小麦草的地上部 As 含量也显著升高。

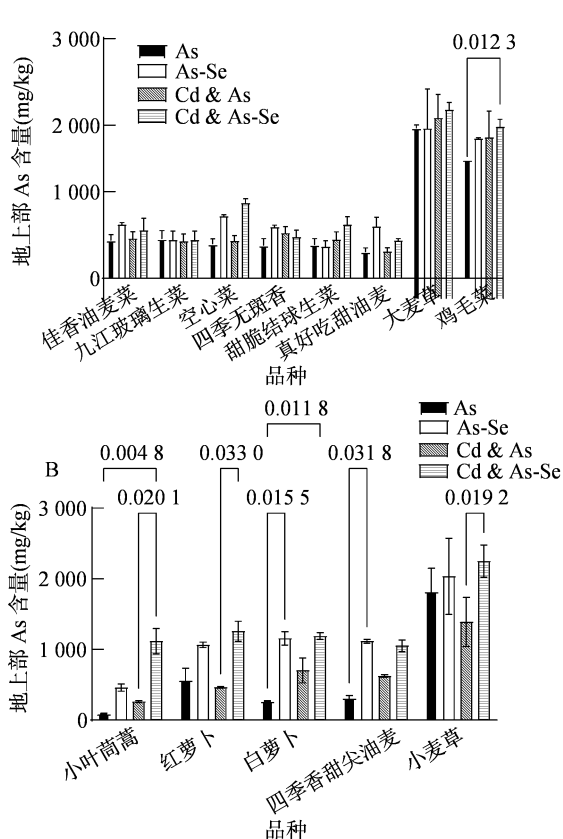


图3 不同处理下叶菜的地上部 As 含量

Se 对根部 As 含量的降低作用:由图 4 可知,在 Cd & As 和 Cd & As - Se 的处理下,空心菜的根部 As 含量差异显著,且 Cd & As - Se 处理下的 As 含量低于 Cd & As 处理。这表明外源添加 Se 对 Cd & As 复合污染处理下空心菜的根部 As 含量有降低效果。

Se 对根部 As 含量的升高作用:在 As - Se 的处理下,大麦草根部 As 含量显著高于仅 As 处理( $P < 0.05$ ),说明外源添加 Se 对 As 处理下大麦草的根部 As 含量有升高效果。九江玻璃生菜的根部 As 含量在 Cd & As - Se 处理下高于 Cd & As 处理( $P < 0.05$ ),表明外源添加 Se 对 Cd & As 复合污染处理下九江玻璃生菜的根部 As 含量也有升高效果。

Se 对根部 As 含量无明显影响:其他未提及显著差异的品种(四季无斑香、真好吃甜油麦、小麦草、四季香甜尖油麦、红萝卜苗、白萝卜苗、佳香油麦菜、小叶茼蒿、甜脆结球生菜)的根部 As 含量在 Se 的影响下无明显变化。

### 2.3 外源添加 Se 对叶菜 Se 含量的影响

地上部 Se 含量有升高作用:由图 5 可知,与不污染处理相比较,佳香油麦菜、小麦草、小叶茼蒿在

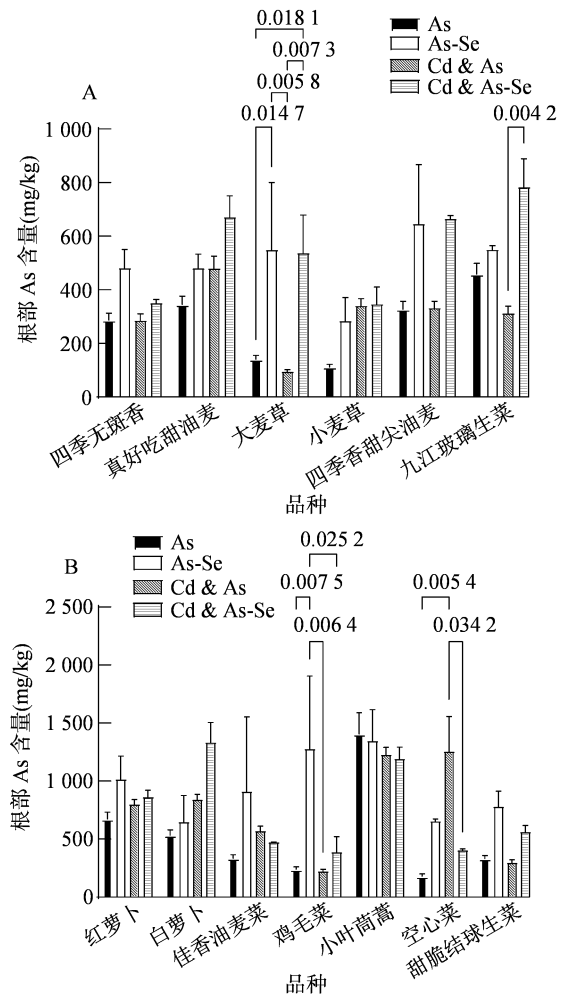


图4 不同叶菜根部的 As 含量

As - Se 处理下,地上部 Se 含量显著升高;小麦草、九江玻璃生菜、红萝卜苗在 Cd & As - Se 处理下,地上部 Se 含量显著升高。与单 Cd 污染处理相比较,佳香油麦菜、小麦草在 As - Se 处理下,地上部 Se 含量显著升高;九江玻璃生菜、红萝卜苗在 Cd & As - Se 处理下,地上部 Se 含量显著升高。与单 As 污染处理相比较,九江玻璃生菜、红萝卜苗在 Cd & As - Se 处理下,地上部 Se 含量显著升高;小叶茼蒿、四季无斑香在 Cd & As - Se 处理下,地上部 Se 含量显著升高。

地上部 Se 含量有降低作用:与单 As 污染处理相比较,佳香油麦菜在 Cd & As - Se 处理下,地上部 Se 含量显著降低。

地上部 Se 含量没有显著变化:由图 5 - B 可知,其他未特别提及显著差异的品种(空心菜、白萝卜苗、真好吃甜油麦、甜脆结球生菜、鸡毛菜、四季香甜尖油麦、大麦草)地上部 Se 含量未表现出显著性差异。

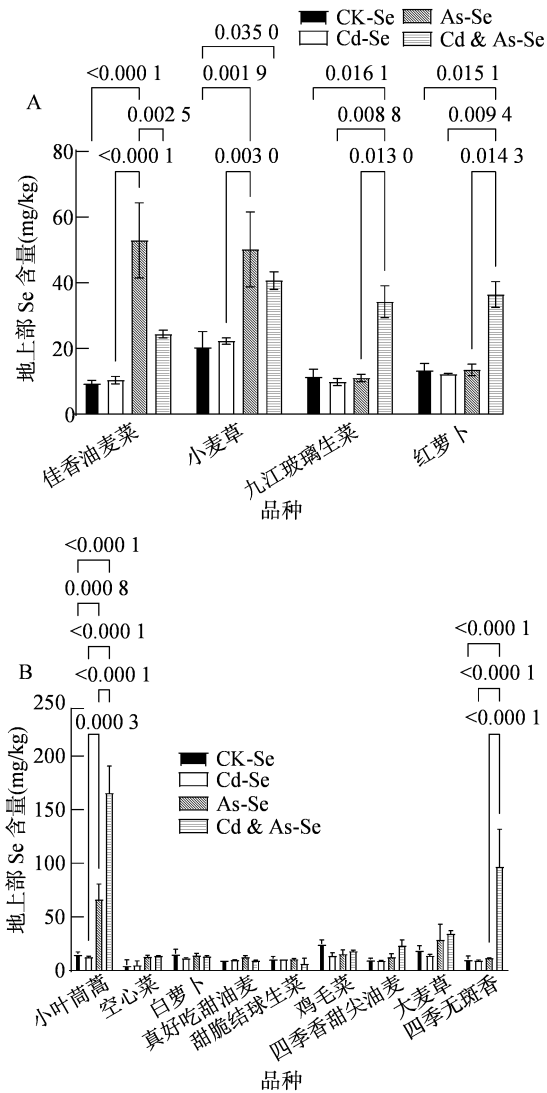


图5 不同处理下叶菜地上部 Se 含量

根部 Se 含量有升高作用:由图 6 - A 可知,在 Cd & As - Se 处理下,四季无斑香和空心菜的根部 Se 含量相较于其他处理(如 CK - Se)显著提高。这表明在 Cd 和 As 复合污染条件下,外源添加 Se 能有效提升这 2 种植物根部的 Se 积累。类似地,在 As - Se 处理下,佳香油麦菜和甜脆结球生菜的根部 Se 含量也显著增加,表明在单一 As 污染条件下,外源 Se 同样能促进这 2 种植物根部的 Se 吸收。

根部 Se 含量有降低作用:在 Cd & As - Se 处理下,小叶茼蒿的根部 Se 含量相较于其他植物(如四季无斑香和空心菜)明显降低。这表明虽然外源添加了 Se,但在 Cd 和 As 复合污染条件下,小叶茼蒿对 Se 的吸收可能受到了抑制。在 Cd & As - Se 处理与单 As 污染(As - Se)处理比较时,佳香油麦菜和甜脆结球生菜的根部 Se 含量也显示出下降趋势,

表明在复合污染下,这 2 种植物对 Se 的吸收效率可能不如单一 As 污染条件。

根部 Se 含量没有显著变化:由图 6 - B 可知,在 CK - Se、Cd - Se、As - Se、Cd & As - Se 处理下,红萝卜苗、白萝卜苗、真好吃甜油麦、大麦草、小麦草、四季香甜尖油麦、九江玻璃生菜和鸡毛菜的根部 Se 含量基本上没有显著差异( $P > 0.05$ )。

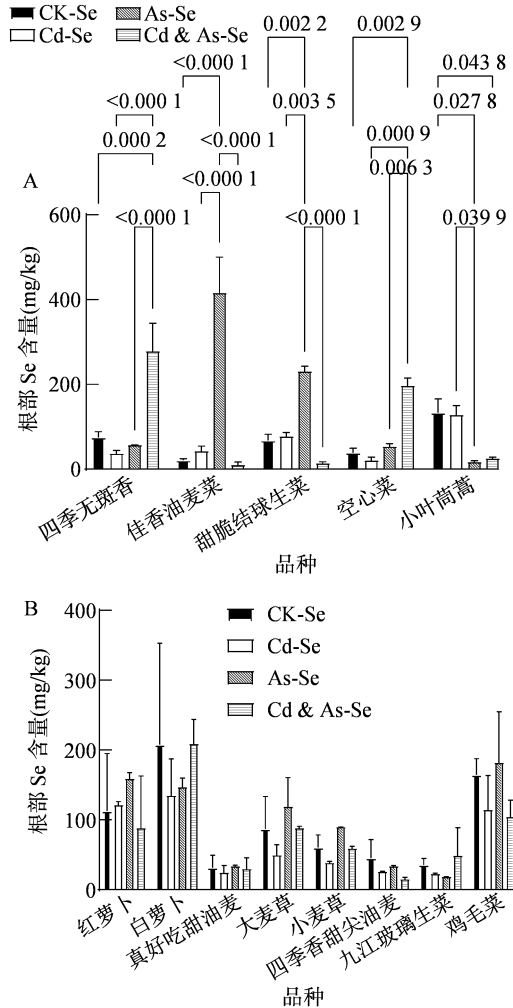


图6 不同处理下叶菜地下部 Se 含量

#### 2.4 外源添加 Se 对叶菜根向地上部转运 Cd、As、Se 系数的影响

Se 对 TF - Cd 的降低作用:由图 7 可知,在 Cd - Se 处理下,鸡毛菜、红萝卜苗、白萝卜苗的根向地上部 Cd 转运系数低于 Cd 处理,但不显著,说明外源添加 Se 对这 3 种蔬菜的 Cd 转运系数具有降低效果。

Se 对 TF - Cd 的升高作用:在 Cd & As - Se 处理下,小叶茼蒿的根向地上部 Cd 转运系数显著增加( $P < 0.05$ ),小麦草的根向地上部 Cd 转运系数有增

加趋势,但不显著,表明外源添加 Se(在 As 和 Cd 同时存在时)增强了这 2 种蔬菜的 Cd 转运能力。

Se 对 TF - Cd 无明显影响:对于其他品种(佳香油麦菜、空心菜、真好吃甜油麦、四季香甜尖油麦、甜脆结球生菜、九江玻璃生菜、四季无斑香、大麦草),Se 的添加并未显著改变其根向地上部 Cd 转运系数,即 P 值未显示显著性差异。

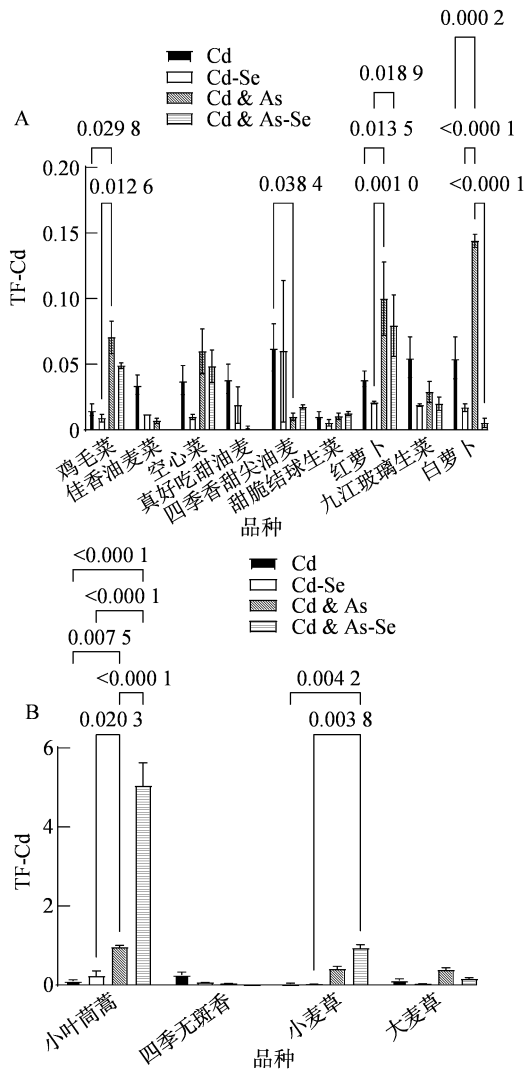


图7 不同叶菜的根向地上部 Cd 转运系数

Se 对 TF - As 的升高作用:相比于仅 As 处理,白萝卜苗在 As - Se 处理下的根向地上部的 As 转运系数显著升高(图 8 - A),说明外源添加 Se 对 As 处理下白萝卜苗的 As 转运有升高效果。空心菜在 Cd & As - Se 处理下的 TF - As 升高。

Se 对 TF - As 无明显影响:对于甜脆结球生菜、小叶茼蒿、红萝卜苗、佳香油麦菜、九江玻璃生菜、四季无斑香、真好吃甜油麦、四季香甜尖油麦和鸡毛菜,As 转运系数未显示出明显的因 Se 添加而产

生的变化。

Se 对 TF - As 的降低作用:对于空心菜,As - Se 处理下的 TF - As 显著性低于 As 处理(图 6 - A)。由图 8 - B 可知,相比于仅 As 或 Cd & As 处理,大麦草在 As - Se 和 Cd & As - Se 处理下的根向地上部的 As 转运系数均显著降低(图 8 - B),表明外源添加 Se 对 As 及 Cd & As 复合污染下大麦草的 As 转运有降低效果。

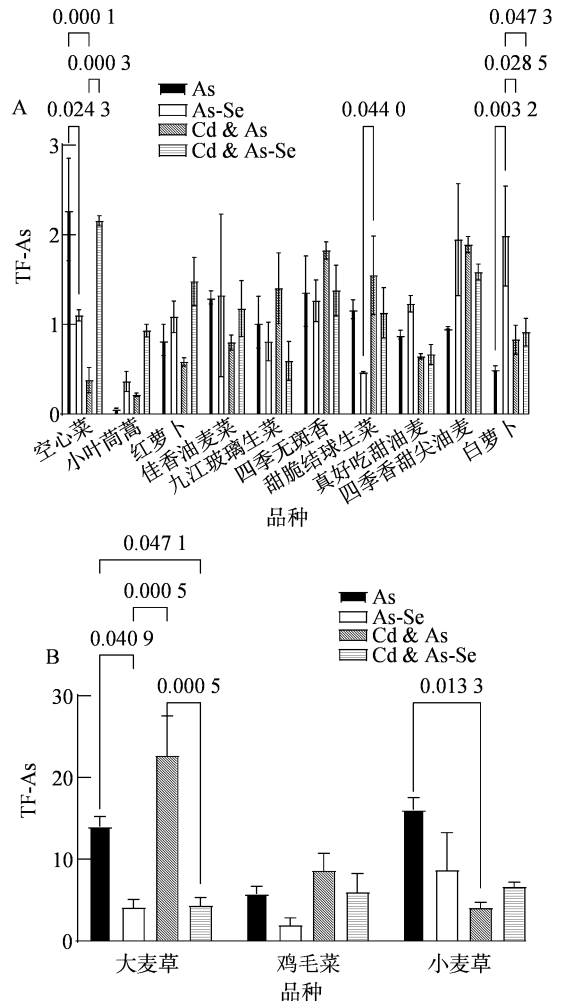


图8 不同叶菜的根向地上部As转运系数

TF - Se 显著升高:由图 9 可知,在 Cd & As - Se 联合处理下,小麦草根向地上部的 Se 转运系数相较于无污染的对照(CK - Se)处理展现出了显著的提升。在 Cd & As - Se 处理下,相较于 As - Se 处理,甜脆结球生菜 Se 转运系数有所上升,显示出 Cd 存在可能促进了生菜对 Se 的转运能力,即 TF - Se 显著升高。在 Cd & As - Se 处理下,小叶茼蒿 Se 转运系数显著高于无污染的 CK - Se、Cd - Se 处理( $P < 0.05$ ),显示出小叶茼蒿在复合污染条件下对 Se 的

高效转运潜力,即 TF-Se 显著升高。在 Cd & As-Se 处理下,相较于 CK-Se 和 Cd-Se 处理,佳香油麦菜 Se 转运系数显著提升( $P < 0.05$ ),进一步证实了复合污染对特定叶菜品种 Se 转运能力的积极影响,即 TF-Se 显著升高。

TF-Se 没有显著性变化:研究中的其他叶菜品种(空心菜、白萝卜苗、鸡毛菜、大麦草、四季无斑香、真好吃甜油麦、九江玻璃生菜、红萝卜苗、四季香甜尖油麦)在 Cd & As 复合污染背景下,其根向地上部的 Se 转运系数并未表现出显著的变化。

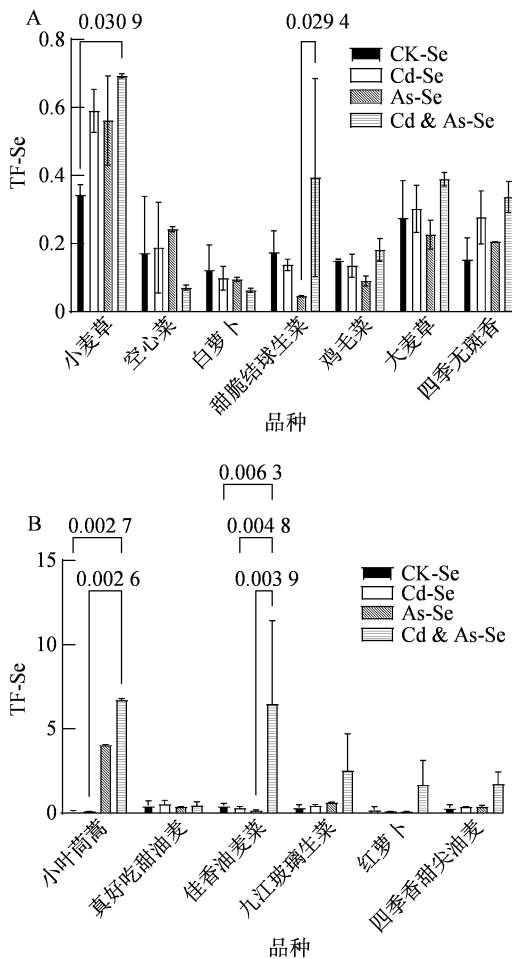


图9 不同叶菜的根向地上部 Se 转运系数

### 3 讨论与结论

#### 3.1 外源添加 Se 对叶菜重金属富集和转运的影响

本研究探究了外源 Se(硒)对复合污染与单一污染条件下植物体内重金属行为的影响,揭示了 Se 调控效应的多样性和作物品种依赖性。针对 Cd 单一污染,Se 的介入重塑了叶菜类作物(如小叶茼蒿与空心菜)对 Cd 的累积模式。具体而言,Se 有效降低了这些作物地上部或根部的 Cd 含量,其机制可

能涉及金属硒化物的形成或与 Cd、As 等重金属竞争植物体内的转运蛋白位点,彰显了 Se 作为重金属解毒剂的强大潜力<sup>[9-10]</sup>。然而,值得注意的是,在白萝卜苗与大麦草中,Se 的添加却意外地加剧了根部 Cd 的累积,这可能归因于 Se 促进了 Cd 的吸收或形成了在根部更易滞留的复合物,提示了 Se 效应的植物特异性。

当 As(砷)单独存在或与 Cd 共存时,Se 的调控作用展现出更为错综复杂的面貌。对于小麦草等叶菜,Se 显著促进了自身在植物体内的转运,增强了作物的营养价值;然而,在调控 As 累积方面,其效果却随作物种类而异,如白萝卜苗和小叶茼蒿 As 含量上升,而鸡毛菜则下降,凸显了 Se 在 As 累积管理中的双向调节作用。此外,As 的存在还干预了 Se 对 Cd 累积的调控路径,进一步揭示了复合污染条件下重金属间相互作用的复杂性<sup>[11-13]</sup>。在 Cd & As 复合污染环境中,Se 的调控效果尤为显著且多变。对于特定叶菜(如小叶茼蒿地上部和空心菜根部),Se 展现出了强大的解毒能力,降低了 Cd 和 As 的含量。然而,在白萝卜苗和大麦草中,Se 却导致了 Cd 累积的增加,这强调了在制定修复策略时需充分考虑污染类型、作物种类及 Se 的施用条件<sup>[14]</sup>。

通过对叶菜类植物 Cd 和 As 转运系数(TF)的分析,发现 Se 对这些系数的影响同样具有高度的品种特异性。例如,Se 降低了鸡毛菜、红萝卜苗及白萝卜苗的 Cd 转运系数,却提升了小叶茼蒿和小麦草的相应系数,这暗示了植物对 Se 的独特吸收与转运机制<sup>[1,15]</sup>。而对于 As 转运,白萝卜苗在单一 As-Se 处理下 TF 上升,但在 Cd & As-Se 复合处理下却下降,这一现象再次验证了 Se 在复合污染条件下对重金属转运的双重且复杂的调控机制,反映了重金属间以及重金属与 Se 间相互作用的微妙平衡。

#### 3.2 外源添加 Se 对叶菜 Se 含量的影响

在探讨重金属污染背景下富硒叶菜的生产策略时,研究揭示了外源硒添加对多数叶菜在砷(As)及镉(Cd)单独或复合污染(Cd & As)环境中硒含量提升的显著正面效应,这对于开发高附加值富硒农产品具有意义<sup>[16-17]</sup>。然而,值得注意的是,在特定品种如佳香油麦菜和小叶茼蒿中,硒的添加并未能显著促进地上部硒含量的增加,甚至在某些情况下表现出抑制趋势,这可能与这些植物独特的生理机制和硒代谢路径相关<sup>[18]</sup>,反映出其较低的硒转运效

率或对硒的高敏感性。这一发现凸显了针对不同植物品种进行精准选择,在优化富硒叶菜生产策略中的核心地位。

在 Cd & As 复合污染条件下,多数叶菜的地上部与根部硒含量均显著攀升,暗示重金属污染可能通过某种机制促进了植物对硒的积极吸收与累积。外源硒的引入不仅为植物提供了额外的硒源,更可能在重金属胁迫下触发了植物体内硒吸收的应激反应,增强了硒的亲合力与转运效率。这种协同效应可能源于重金属与硒在吸收途径上的相互作用,或是植物为应对不利环境而主动调整硒吸收策略的结果<sup>[19-20]</sup>。尤为值得关注的是,小麦草和甜脆结球生菜等叶菜品种中硒转运系数的显著提升,不仅验证了硒在增强植物重金属胁迫耐受性方面的关键作用,也预示着硒在提升叶菜整体营养品质上的潜力<sup>[21-23]</sup>。然而,不同品种间硒吸收与累积能力的显著差异提醒我们,在实际应用中需细致考量作物特异性,以最大化硒肥的施用效益。

本研究主要结论指出,外源硒(Se)的添加在镉砷复合污染环境下显著降低了多种叶菜地上部的镉(Cd)含量,但对砷(As)的累积效果因叶菜种类而异,部分品种 As 含量增加。此外,Se 显著减少了多数叶菜根部向地上部转运 Cd 的系数以及空心菜和大麦草的 TF - As。同时,Se 的添加普遍提高了叶菜地上部的 Se 含量,特别是在复合污染条件下效果更为显著,并促进了部分叶菜对 Se 的转运。该研究不仅深化了对 Se 缓解重金属污染机制的理解,还为通过科学施用硒肥改善叶菜生产、提升 Se 含量及降低重金属污染风险提供了理论支持和实践指导。

参考文献:

[1] 向旭敏,肖春梅,熊雨舟,等. 硒降低稻米主要重金属污染的研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(7):23-30.

[2] 田欣,孙淇,陈瑶,等. 富硅磁改性生物质炭的制备及其对 Cd(II)和 As(III)复合污染水体的吸附机制[J]. 环境科学,2025,46(1):282-295.

[3] 查燕,汤婕,牛天新. 叶菜类蔬菜对重金属富集特征研究[J]. 江西农业大学学报,2022,44(3):773-782.

[4] 王裔娜,魏新娜,吴国良,等. 农作物和园艺作物富硒效应研究进展[J]. 河南农业科学,2015,44(5):7-12.

[5] 孔凡丽,张恩萍,曹庆军,等. 硒的生理功能及在主要作物中的吸收富集[J]. 东北农业科学,2020,45(6):115-118.

[6] 吴洁,付求来,李婧婧,等. 外源硒对番茄采后成熟衰老的生理调控机制[J]. 安徽农业大学学报,2020,47(1):155-160.

[7] 谭周磁,陈嘉勤,薛海霞. 硒(Se)对降低水稻重金属 Pb、Cd、Cr 污染的研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2000,23(3):80-83.

[8] 安立进,赵礼鹏,魏奥,等. 硒阻控作物吸收重金属机制研究进展[J]. 华中农业大学学报,2024,43(4):112-120.

[9] Meng Y, Zhang L, Wang L Q, et al. Antioxidative enzymes activity and thiol metabolism in three leafy vegetables under Cd stress[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2019,173:214-224.

[10] 刘达,涂路遥,赵小虎,等. 镉污染土壤施硒对植物生长及根际镉化学行为的影响[J]. 环境科学学报,2016,36(3):999-1005.

[11] Meng Y, Zhang L, Yao Z L, et al. Arsenic accumulation and physiological response of three leafy vegetable varieties to As stress[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19(5):2501.

[12] 张亮,李玲玲,孟媛,等. 镉砷复合污染下叶菜的重金属富集和转运[J]. 北方园艺,2023(7):1-8.

[13] 赵秀峰,程滨,霍晓兰,等. 硒对铅、砷单一污染下小白菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(23):51-58.

[14] 张婷. 纳米硒对青稞品质影响研究和产品开发[D]. 成都:成都大学,2024:3-4.

[15] 张妮. 不同价态外源硒对小麦硒吸收与转运的影响[D]. 石河子:石河子大学,2016:5-16.

[16] 刘力,张传华,张凤太,等. 重金属地质高背景区土壤 Se 的地球化学特征及富 Se 耕地综合评价[J]. 生态与农村环境学报,2024,40(8):996-1005.

[17] 丁浩男,潘荣庆,吕浩能,等. 叶面施用有机硒、有机硅对水稻累积镉、砷的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(14):215-220.

[18] 徐萌萌. 灵芝对硒的代谢转化及其耐受机制研究[D]. 无锡:江南大学,2023:2-26.

[19] 史广宇,余志强,施维林. 植物修复土壤重金属污染中外源物质的影响机制和应用研究进展[J]. 生态环境学报,2021,30(3):655-666.

[20] 刘晓飞. 硒纳米颗粒提升叶菜类作物产量和品质的机制研究[D]. 无锡:江南大学,2022.

[21] 余涛,杨忠芳,王锐,等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. 土壤,2018,50(6):1119-1125.

[22] 刘晓飞,刘晶,王传洗,等. 硒纳米颗粒对两种叶菜作物肥料效应的田间试验研究[J]. 环境科学研究,2022,35(12):2785-2791.

[23] 韩承华,潘瑞瑞,刘野,等. Cu、Zn 对水蕹菜生长的影响及 Se 的缓解作用[J]. 生态学杂志,2016,35(2):470-477.