

土壤-植物体系中施硒方式影响作物吸收转运镉的研究进展

张秀锦¹, 柴冠群², 刘桂华², 张容慧³, 黄承玲^{1*}, 范成五²

(1. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵州贵阳 550006; 3. 贵州大学, 贵州贵阳 550025)

摘要 镉是一种毒性较强的重金属, 镉污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点。硒是人体不可缺少的微量元素之一, 利用硒与镉在植物体内的拮抗作用, 在土壤或植物中施外源硒可以降低作物的重金属镉含量, 并提高作物中硒含量。前人研究表明不同的施硒方式影响植物中镉吸收转运的效果, 总结了土壤施硒和叶面施硒2种施硒方式下对不同农作物镉吸收和转运的影响, 发现以果实或叶片作为食用对象的作物, 可以用叶面喷施外源硒的方式降低镉在食用部位的累积, 而土壤施加外源硒可降低植物根部对土壤中镉的吸收及镉在植物体内转运至可食用部位的含量, 同时转运至可食用部位的硒含量增加, 以期为今后更加深入研究施硒对镉污染土壤安全利用提供参考依据, 对镉污染土壤中实现农产品安全生产具有重要意义。

关键词 硒; 镉; 拮抗作用; 土壤施硒; 叶面施硒

中图分类号 S154.4 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)01-0010-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.01.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Effects of Selenium Application on Cadmium Uptake and Transport by Crops in Soil Plant System

ZHANG Xiu-jin¹, CHAI Guan-qun², LIU Gui-hua² et al (1. College of Eco-Environmental Engineering of Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025; 2. Soil and Fertilizer Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550006)

Abstract Cadmium is a highly toxic heavy metal. Cadmium pollution has the characteristics of concealment, long-term and irreversibility. Selenium is one of the indispensable trace elements for human body. Using the antagonistic effect of selenium and cadmium in plants, the application of exogenous selenium in soil or plants can reduce the content of heavy metal cadmium in crops and increase the content of selenium in crops. Previous studies have shown that different selenium application methods affect the effect of cadmium absorption and transport in plants. This paper summarizes the effects of soil selenium application and leaf selenium application on cadmium absorption and transport in different crops. It is found that for crops with fruits or leaves as edible objects, foliar spraying of exogenous selenium can reduce the accumulation of cadmium in edible parts, the application of exogenous selenium in soil decreased the absorption of cadmium by plant roots and the content of cadmium transported to edible parts in plants, and the content of selenium transported to edible parts increased at the same time. It is expected to provide a reference basis for further study on the safe utilization of selenium on cadmium contaminated soil in the future, and is of great significance to realize the safe production of agricultural products in cadmium contaminated soil.

Key words Selenium; Cadmium; Antagonism; Soil selenium application; Foliar application of selenium

镉是一种毒性较强的重金属, 我国土壤镉污染的点位超标率为7%^[1]。镉污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点^[2]。镉价态有2种(0价和+2价), 镉在土壤中一般以+2价的形式存在, 土壤中镉的形态^[3]大致可以细分为水溶性态、交换性态、可还原态、螯合态、难溶性有机结合态。杨居荣等^[4]的研究证明, 在谷物中的镉主要以螯合态的形式存在。根系是镉进入植物体内的第一道屏障, 对镉的积累主要分布在根部^[5]。李江遐等^[6]研究表明, 镉在水稻中的分布为根>茎>叶>糙米。镉一旦被茎和叶运输到籽实中就被固定, 不会再转运到其他部位。

硒是自然界中分布不均匀的一种稀有元素^[7]。硒具有增强免疫力、抗氧化和抗衰老的生理功能, 是人体和动物所必需的微量元素^[8]。元素硒有多种价态^[9]: 元素态硒(0价)、硒化物(-2价)、亚硒酸盐(+4价)和硒酸盐(+6价)。亚硒酸盐为土壤中硒的主要形态, 也是植物从其他地方吸收硒的主要无机形态^[10]。硒在植物营养阶段在幼叶中积累, 生殖生长阶段中种子硒含量高而叶片中硒含量却大幅降低^[11]。硒的广泛利用对于促进农业种子的萌发, 作

物生长率和粮食品质的改善具有十分重要的意义^[12-13]。

适量的硒还能缓解植物中重金属胁迫, 抑制重金属的吸收^[14], 这种硒与镉的相互作用就是拮抗作用^[15]。目前关于拮抗作用的研究有很多, 郭锋等^[16]发现外源硒使菠菜地上部和根部镉含量显著降低。孙红艳等^[17]研究表明, 施加外源硒浓度为2.5 μmol/L对黄瓜幼苗的镉毒害缓解效果最佳。硒对镉的拮抗作用也受硒价态的影响^[18-19], 通常情况下Se⁶⁺对镉的拮抗低于Se²⁻和Se⁴⁺。周健等^[20]研究发现, 在镉胁迫下, 对于降低油菜的镉胁迫采用Se²⁻处理最为有效。张海英等^[21]试验证明, 施+4价的外源Se使草莓中硒含量增加, 也减少了草莓对金属镉的吸收。可见, 硒对镉的这种拮抗效应受农作物种类、镉浓度、硒浓度及硒价态的影响。笔者归纳前人关于叶面施硒和土壤施硒的相关研究, 总结了2种施硒方式对土壤-植物体系中镉吸收转运的影响, 旨在探索利用硒、镉的拮抗作用降低镉的科学方法, 为寻找富硒产品研究提供参考。

1 叶面施硒对作物吸收转运镉的影响

1.1 对镉含量的影响 土壤-植物体系中镉浓度过高会对作物产生毒害作用, 而施外源硒是一种有效可行的富硒、降镉的方法。研究发现叶片中的气孔通道是植物叶片与外界的联系, 植物通过叶片吸收养分, 与根系表面相似, 营养物质被叶片选择吸收到内部^[22], 所以可通过叶面对作物喷施硒来达到降低镉含量的目的, 成为近年来的研究热点。水稻作

基金项目 贵州省科技厅科技支撑计划项目(黔科合支撑2018[2338]); 贵州省土壤肥料研究所成果培育项目(TFS-JY-001)。

作者简介 张秀锦(1996—), 女, 山西晋中人, 硕士, 研究方向: 重金属污染土壤修复。*通信作者, 教授, 从事重金属污染土壤生态修复与管控研究。

收稿日期 2022-03-15

为重要的粮食作物,研究叶面施硒影响水稻积累镉的报道很多。刘永贤等^[23]对百香 139 和中广香 1 号 2 种水稻叶面喷施 4.38 g/L 的 Na_2SeO_3 发现,百香 139 籽实的镉含量比对照降低了 83.33%,对中广香 1 号影响却很小。黄青青等^[24]试验表明,叶面施硒使早稻和晚稻地上部镉含量降低,其秸秆、糙米和稻壳中镉含量分别比对照降低了 4.50%~18.5%、13.0%~23.5%和 4.00%~36.5%。方勇等^[25]试验发现,在喷施低浓度硒为 25 和 50 g/hm² 时,相比对照组籽粒中镉含量变化不大,而喷施硒浓度增加至 75 和 100 g/hm² 时,稻米中镉含量显著降低,施硒组浓度为 100 g/hm² 比对照镉含量降低了 15.6%。谭旭生等^[26]对黄华占和星 2 号 2 种水稻品种叶面喷施的外源硒量分别为 8、10、16、20 g/hm²,黄华占和星 2 号分别施 16 和 8 g/hm² 时降镉明显,分别是 22.30%和 25.11%,随着施硒量的增加,2 种水稻降镉的作用却减弱。说明水稻品种不同,叶面施硒对镉积累的影响差异较大;施加外源硒的量过多或过少,降低镉累积的效果都不好。

以果树和蔬菜为研究对象时,以叶面施硒的方式施加不同浓度硒,其不同作物对镉含量也有着不同的影响。张海英等^[21]试验表明,通过叶面施加外源硒能提高草莓中硒的含量,且硒浓度 5.0 mg/L 降镉效果最佳。张翠翠等^[27]通过大田试验结果表明,西瓜施外源硒处理的镉含量相比对照减少了 6.61%~66.13%,其中硒浓度为 4.0 mg/L 处理最佳。杨燕君等^[28]研究发现,甜柿体内随硒处理浓度增大镉、汞、铅等重金属含量降低,当施硒浓度为 150 mg/L 时效果为最佳。吕选忠等^[29]研究发现,通过叶面施加外源硒使生菜中镉的吸收降低了 31.63%,而喷硒生菜吸收的硒比不喷硒的增加了 1213%。说明以果实或叶片作为食用对象的作物,可以用叶面喷施外源硒的方式降低镉在食用部位的累积,同时增加食用部位的含硒量,达到安全和富硒的生产目标。

1.2 对镉运转迁移的影响 镉在植物体内具有一定的迁移性,除体内运转外还有土壤和植物间的运转迁移。外源硒可以增加镉在植物茎叶中的迁移,并受施硒浓度的影响。但当硒浓度过高时,拮抗作用的降低会促进植物对镉的吸收和转运。同时,植物在不同生长阶段向根、茎、叶和果实迁移镉的能力不同,因此在不同生长期喷施外源硒对植物吸收和转运镉的影响不同。张璐等^[30]在水稻的孕穗期和成熟期喷施外源硒,当喷施浓度<1 mg/L 时,对镉的迁移影响不明显,喷施浓度为 5 mg/L 时,促进镉向茎叶和籽粒迁移,镉的迁移系数与对照相比分别下降了 38.4%和 23.0%。刘永贤等^[23]研究表明,硒源为 Na_2SeO_3 (4.38 g/L),喷施硒次数为 0、1、2 次 3 个处理,喷施硒的次数越多,镉积累滞留在茎叶中就越多,水稻穗部镉积累就会减少。高敏等^[31]向水稻叶面喷施亚硒酸钠,减少了镉从根向茎、茎向糙米的迁移,增加了镉从茎向叶的迁移量,而镉从茎向糙米的迁移量在孕穗后期下降,表明水稻孕穗期和成熟期是喷施硒影响镉转运迁移的关键时期。

2 土壤施硒对作物吸收转运镉的影响

2.1 对镉含量的影响

2.1.1 作物在不同镉浓度条件下,施不同浓度硒处理的研

究。刘春梅等^[32]研究表明,土壤镉浓度在 0~4 mg/kg 时,随着镉浓度的增加,各器官和糙米、精米中的镉含量也显著增加。而当镉浓度>4 mg/kg 时,水稻中糙米和精米中的镉增加幅度较小。在镉浓度 6 mg/kg 下,外源硒处理浓度为 5 mg/kg 可使得冬小麦的籽粒、茎秆和颖壳中的镉显著降低。可见冬小麦对抑制镉吸收的硒浓度为 5 mg/kg。卞威尔斯等^[33]研究表明,在镉污染(0、3、30 mg/kg)条件下,花生叶片和根系的镉含量随硒浓度的增加而降低,且在施硒浓度为 0.25 mg/kg 时效果最好。施加 0.25 mg/kg 硒使花生地上部分、根系镉含量分别在低镉(3 mg/kg)处理和高镉(30 mg/kg)处理条件下,下降 12.71%、46.13%和 21.29%、36.00%。郭锋等^[16]试验表明,0.5 mg/kg 镉胁迫下,随着外源硒含量的增加,菠菜地上部分对镉的吸收先降低后增加,而菠菜根对镉的吸收先升高后下降。在 20 mg/kg 镉胁迫下,菠菜地上部对镉的吸收随着外源硒施加含量的增加而降低,根部对镉的吸收先升高后降低。

2.1.2 镉污染为单一浓度条件下,施不同浓度硒对降镉的研究。曾宇斌等^[15]研究表明,施硒浓度为 2.56 mg/kg 时,大豆体内的硒和镉元素呈现出协同作用。硒浓度为 11.56 mg/kg 时,大豆的茎、果、壳、叶累积 Cd 的含量相比对照降低显著。刘春梅等^[32]试验发现,镉浓度一致时,添加硒浓度为 0.14 mg/kg 的处理相比 0.07 mg/kg 较好,当镉的浓度为 2 mg/kg 时,硒处理为 0.14 mg/kg 时水稻籽粒镉的含量下降幅最大,为 31.5%。江念等^[34]研究表明,硒浓度为 0~15 mg/kg 范围内能有效抑制延龄草对镉的吸收;当硒浓度为 5~15 mg/kg 时,延龄草对镉的吸收达到最小值(5.17 mg/kg);硒浓度为 15~30 mg/kg 时,镉的吸收明显增强;当硒浓度为 25 mg/kg 时,延龄草对镉的吸收量达到最大值(25.34 mg/kg);当硒浓度为 30~40 mg/kg 时,显著抑制了延龄草生长。说明可以通过土壤施加外源硒的方式降低土壤镉含量,从而减少植物根部从土壤对镉的吸收,植物体内转运至可食用部位镉含量也降低,同时转运至可食用部位的含硒量增加。能有效缓解镉对作物的毒害,保障粮食安全生产和实现富硒产品生产。

2.2 对镉运转迁移的影响 镉对植物的毒害是植物的根从土壤中吸收镉,然后将镉转移到地上部产生的。添加外源硒的主要目的是通过拮抗作用降低植物体中的镉含量来缓解毒害,间接促进植物对硒的吸收^[35]。刘达等^[36]研究表明,土壤镉污染水平为 0.5 mg/kg 时施用浓度 0.25 mg/kg 的硒肥,能显著降低白菜中镉向地上部分的运输,但当硒浓度增加到 1.0 mg/kg 时会促进镉向地上的运输。刘春梅等^[32]研究表明,在一致的土壤镉浓度下,向土壤喷施的硒浓度从 0.07 mg/kg 增加到 0.14 mg/kg,镉向水稻地下部分运转的比例增加,而向地上部分运转的比例减小。王波等^[37]研究表明,相比对照,低硒(0.5 mg/kg)和高硒(2.0 mg/kg)处理使水稻根际土壤有效镉含量分别降低了 32.24%和 9.43%,减少了镉在地上的积累和迁移。同样卞威尔斯等^[38]的研究表明,向土壤喷施适量硒可以减少镉向花生的地上部运输。这

些研究都表明,通过在土壤中施加外源硒可以降低镉向地上部转移,降低茎、叶、果实中镉的含量,缓解镉对植物的毒害,从而实现安全生产。

3 展望

综上所述,通过土壤和叶面施硒这2种方式,在一定程度上可以调控土壤-植物系统中硒的积累,以及通过硒对镉的拮抗作用缓解对植物的胁迫来达到降镉的目的。总结已有研究发现,针对同种作物,施硒降镉的作用因品种不同差异较大。施硒降镉不是硒用量越多越好,可以开展针对原植物-土壤体系中镉的浓度来设计硒的浓度梯度寻找合适的降镉浓度。在作物不同生长期,镉向根、茎、叶和果实的运转迁移也有差异,低浓度促进镉向地上部分迁移,高浓度抑制镉向地上部分迁移。利用这2种不同的施硒方式可以开展针对农作物的农艺性状和各部位硒含量的影响的研究,找出适合富硒的农产品以及不同植物中降低镉含量和缓解重金属镉毒害作用的适宜施硒浓度,对重金属污染土壤在植物修复技术中的有效应用具有重要意义。

参考文献

- [1] 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[J]. 油气田环境保护,2014,24(3):66.
- [2] 湛润生,王莉,岳新丽,等. 镉胁迫对芥菜型油菜幼苗生理特性的影响[J]. 种子,2020,39(10):109-112.
- [3] 熊愈辉. 镉在土壤-植物系统中的形态与迁移特性研究进展[J]. 安徽农业科学,2008,36(30):13355-13357,13414.
- [4] 杨居荣,查燕,刘虹. 污染稻、麦籽实中Cd、Cu、Pb的分布及其存在形态初探[J]. 中国环境科学,1999,19(6):500-504.
- [5] 赵会会,方志刚,马睿,等. 耐镉根际促生菌的筛选及其对一年生黑麦草镉吸收积累的影响[J]. 草地学报,2017,25(3):554-560.
- [6] 李江遐,张军,马友华,等. 不同水稻品种对镉的吸收转运及其非蛋白巯基含量的变化[J]. 生态环境学报,2017,26(12):2140-2145.
- [7] 尹俊钦,涂路遥,赵小虎,等. 硒对菜地土壤镉微区分布及其吸附解吸特性的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(7):2254-2260.
- [8] 杨肇铭,胡岗,范成五,等. 提高土壤硒生物有效性的技术措施研究进展[J]. 安徽农业科学,2022,50(1):12-14.
- [9] PYRZYŃSKA K. Determination of selenium species in environmental samples[J]. Microchimica acta,2002,140(1/2):55-62.
- [10] 宋崎. 土壤和植物中的硒[M]//龚子同. 土壤地球化学的进展和应用. 北京:科学出版社,1985.
- [11] TERRY N, ZAYED A M, DE SOUZA M P, et al. Selenium in higher plants[J]. Annual review of plant physiology and plant molecular biology, 2000,51:401-432.
- [12] 周进财,曹艳玲,刘凤兰. 外源硒浸种对油菜幼苗根系生长及生理特性的影响[J]. 种子,2019,38(10):107-109,118.
- [13] 蒋方山,张海军,吕连杰,等. 叶面喷施亚硒酸钠对黑粒小麦籽粒硒含量、产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报,2018,38(12):1496-1503.
- [14] 彭玲,贾芬,田小平,等. 硒对油菜根尖镉胁迫的缓解作用[J]. 环境科

学学报,2015,35(8):2597-2604.

- [15] 曾宇斌. 土壤添加硒对大豆拮抗重金属的影响[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [16] 郭锋,樊文华,冯两蕊,等. 硒对镉胁迫下菠菜生理特性、元素含量及镉吸收转运的影响[J]. 环境科学学报,2014,34(2):524-531.
- [17] 孙红艳,王杰文,王宇娜,等. 硒对镉胁迫下黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):175-177.
- [18] FENG R W, WEI C Y, TU S X, et al. A dual role of Se on Cd toxicity: Evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice[J]. Biological trace element research, 2013, 151(1):113-121.
- [19] HUANG G X, DING C F, GUO F Y, et al. Underlying mechanisms and effects of hydrated lime and selenium application on cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Environmental science and pollution research international, 2017, 24(23):18926-18935.
- [20] 周健,郝苗,刘永红,等. 不同价态硒缓解小油菜镉胁迫的生理机制[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):444-450.
- [21] 张海英,韩涛,田磊,等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响[J]. 园艺学报,2011,38(3):409-416.
- [22] 于广武,何长兴,陶国臣,等. 可溶性叶面肥及其发展趋势——黄萎叶喷剂的研究新进展[J]. 腐植酸,2006(3):9-14.
- [23] 刘永贤,潘丽萍,黄雁飞,等. 外源喷施硒与硅对水稻籽粒镉累积的影响[J]. 西南农业学报,2017,30(7):1588-1592.
- [24] 黄青青,刘艺芸,徐应明,等. 叶面硒肥与海泡石钝化对水稻镉累积的影响[J]. 环境科学与技术,2018,41(4):116-121,159.
- [25] 方勇,陈曦,陈悦,等. 外源硒对水稻籽粒营养品质和重金属含量的影响[J]. 江苏农业学报,2013,29(4):760-765.
- [26] 谭旭生,曾跃华,李智谋,等. 硒肥施用对稻米中镉等重金属含量的影响[J]. 中国稻米,2014,20(1):76-77.
- [27] 张翠翠,常介田,赵鹏. 叶面施硒对西瓜镉和铅积累的影响[J]. 华北农学报,2013,28(3):159-163.
- [28] 杨燕君,刘晓华,宁婵娟,等. 叶面施硒对甜柿果实品质及重金属含量的影响[J]. 园艺学报,2013,40(3):523-530.
- [29] 吕选忠,官象雷,唐勇. 叶面喷施锌或硒对生菜吸收镉的拮抗作用研究[J]. 土壤学报,2006,43(5):868-870.
- [30] 张璐,周鑫斌,苏婷婷. 叶面施硒对水稻各生育期镉吸收的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版),2017,39(7):50-56.
- [31] 高敏,周俊,刘海龙,等. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(2):215-222.
- [32] 刘春梅,罗盛国,刘元英. 硒对镉胁迫下寒地水稻镉含量与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):190-199.
- [33] 卞威尔斯,闫家普,崔良,等. 施硒对花生镉吸收与抗性及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(6):1094-1101.
- [34] 江念,杨强,万佐玺,等. 硒对延龄草生长及硒、镉、砷、铅、汞吸收规律的影响[J]. 中药材,2016,39(9):1960-1965.
- [35] 陈大清. 植物硒同化的研究进展及其耐硒突变体的筛选[J]. 氨基酸和生物资源,2004,26(2):65-71.
- [36] 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.
- [37] 王波,张然然,杨如意,等. 外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(12):2710-2718.
- [38] 卞威尔斯,田侠,丁效东,等. 施硒对花生幼苗硒、镉吸收及光合效应的影响[J]. 环境化学,2017,36(11):2349-2356.

(上接第9页)

- [40] WU G H, PAN L, WEI Q, et al. Decreased mobility of heavy metals in Haihe River sediments: The possible role of tide gate[J]. Journal of geochemical exploration, 2015, 157:92-99.
- [41] 张婷,刘爽,宋玉梅,等. 柘林湾海水养殖区底泥中重金属生物有效性及生态风险评估[J]. 环境科学学报,2019,39(3):706-715.

- [42] WEI B G, YANG L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. Microchemical journal, 2010, 94(2):99-107.
- [43] JOHANSSON C, NORMAN M, BURMAN L. Road traffic emission factors for heavy metals[J]. Atmospheric environment, 2009, 43(31):4681-4688.
- [44] 肖宇红,艾应伟,陈黎萍,等. 原子吸收光谱法测定铁路岩石边坡土壤中重金属含量[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(9):2576-2578.