

张立,王杰.不同硒形态对镉胁迫下油菜镉亚细胞分布、化学形态及硒累积的影响[J].江苏农业科学,2022,50(17):259-264.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.17.042

不同硒形态对镉胁迫下油菜镉亚细胞分布、化学形态及硒累积的影响

张立¹,王杰²

(1. 怀化职业技术学院,湖南怀化 418000; 2. 湖南粮安科技股份有限公司,湖南邵阳 422008)

摘要:为了解不同形态硒(Se)对镉(Cd)胁迫下油菜对镉累积及相关分布的影响,采用自然 Cd 污染土壤(4.58 mg/kg)进行盆栽试验,以不施 Se 为对照(CK),研究不同硒形态:硒酸钠[Se(VI)]、亚硒酸钠[Se(IV)]、硒代甲硫氨酸(SeMet)、纳米硒(SeNPs)对油菜镉累积、亚细胞分布及化学形态的影响,为 Se 应用于降低植物 Cd 累积提供依据。结果表明,与 CK 相比,除 Se(IV)外,其他硒形态[SeNPs、Se(VI)、SeMet]皆减轻了 Cd 对油菜干物质及光合色素含量的不利影响。SeNPs、Se(VI)、SeMet 均降低了油菜根系、地上部的 Cd 浓度及转移系数(TF),Se(IV)亦降低了地上部 Cd 浓度及 TF 系数,但对根系 Cd 浓度无明显影响;地上部、根系 Se 浓度中,皆以 SeMet 处理显著大于其他处理。与 CK 处理相比,Cd 的亚细胞分布中,硒处理的地上部、根系的细胞壁 Cd 比例更低、可溶性部分比例更高;而在 Cd 化学形态组成中,硒处理均降低了地上部、根系中水提取态和乙醇提取态的 Cd 比例,提高了氯化钠提取态的 Cd 比例。综上,硒可增加 Cd 在细胞壁和液泡中的螯合量、降低油菜植株幼苗中 Cd 的活性化学形式比例以及限制根系 Cd 向上易位,从而减少地上部 Cd 积累,以施用硒代甲硫氨酸(SeMet)处理效果最佳、Se 浓度最高。

关键词:油菜;硒;镉;亚细胞分布;镉化学形态

中图分类号:S634.301 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)17-0259-06

镉(Cd)是一种在农田土壤中广泛存在的重金属元素,Cd 具有高移动性、高毒害性以及不可生物降解等特性^[1],且研究发现,Cd 对植物光合作用、养分吸收及生理代谢具有显著影响,低浓度下 Cd 可诱导植物活性氧(ROS)累积造成氧化应激损伤,从而导致植株发育迟缓,而高 Cd 浓度下植物可能会直接死亡^[2],目前土壤 Cd 污染已成为威胁农作物安全生产的全球问题。油菜(*Brassica napus* L.)作为最具代表性的十字花科芸薹属植物,是我国种植面积最广的油料作物,Cd 胁迫可导致油菜籽产量锐减,菜籽油是居民日常的膳食辅料,超过每日摄入量限制的 Cd 含量会对人类健康造成危害^[3]。因此,降低油菜的 Cd 累积对保护人们免受 Cd 的威胁具有重要意义。

硒(Se)是人类和动物所必需的微量营养元素,尽管 Se 对高等植物来说不是必需的,但大量研究表明,一定剂量的 Se 对植物生长和提高非生物胁迫耐

受性具有积极影响^[4]。近年来,Se 在减轻植物重金属(例如 Cd)毒性方面的作用已越来越受到关注。周健等研究表明,外源硒代甲硫氨酸、硒酸盐[Se(VI)]和亚硒酸盐[Se(IV)]作为 3 种形态的硒源皆可有效提高小油菜的抗氧化酶活性,激活谷胱甘肽代谢,从而降低 Cd 胁迫对小油菜的应激损伤^[5]。徐境懋等研究发现,亚硒酸盐[Se(IV)]处理可降低细胞可溶物质组分和细胞器组分的 Cd 含量,改变根系 Cd 的亚细胞分布,从而减少 Cd 向茎叶的转运,降低地上部的膜脂过氧化程度^[6]。Lin 等研究表明,外源 Se(IV)可通过增加叶绿素含量和提高抗氧化活性来减少辣椒中的镉积累,且 Se 有利于 Cd 胁迫下细胞膜和叶绿体结构的恢复和重建^[7]。上述研究表明,Cd 胁迫下不同硒形态尤其是 Se(IV)和 Se(VI)对植物具有良好的解毒作用。

土壤中存在不同形态的 Se 源,Se(IV)是淹水环境的主要形式,Se(VI)主要存在于碱性或通气状况良好的环境中^[8]。有机形式的 Se 是土壤硒的主要组成部分,与 N、P 等养分的有机形态不同,有机硒容易被植物根系吸收,研究发现小麦、油菜对硒代甲硫氨酸(SeMet)的吸收率是硒(VI)或硒(IV)的 10~20 倍^[9]。此外,随着农业技术发展,通过生物

收稿日期:2022-03-21

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(编号:21B0916)。

作者简介:张立(1984—),女,湖南怀化人,讲师,主要从事农作物安全生产与病虫害防治研究。E-mail:hushuiz@163.com。

或非生物途径还原硒氧阴离子形成的纳米级硒元素(SeNPs)已越来越多的应用于农业生产^[10]。目前已知 Se(IV)、Se(VI)、SeMet 及 SeNPs 皆可被植物吸收,且关于 Se 对植物 Cd 吸收和转运的影响已有较多报道,然而关于不同 Se 形态对重金属胁迫的效果尚不清楚。基于此,本研究通过沙培试验探索 4 种 Se 形态对油菜 Cd 累积、化学形态及生理特性的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2021 年 3—5 月在湖南粮安科技园(27°14'28"N,110°22'48"E)进行。供试油菜品种为中双 11,种子购自湖南粮安科技股份有限公司。种子采用 5% H₂O₂ 进行表面灭菌 5 min,采用蒸馏水冲洗,然后放置于铺满基质的园艺育苗盘中,在光照培养室(光—暗周期为 12 h—12 h)中培养 15 d。

供试土壤取自湖南省怀化市某电子拆卸区附近废弃的油菜田。将土壤自然风干后采用溴甲烷(CH₃-Br)对土壤进行化学熏蒸,之后过 4 mm 网筛备用。供试土壤理化性质如下:有机质含量为 28.26 g/kg、全磷含量为 1.95 g/kg、碱解氮含量为 96.40 mg/kg、速效磷含量为 22.18 mg/kg、速效钾含量为 141.72 mg/kg, pH 值为 6.27, 镉含量为 4.58 mg/kg。根据 GB 15618—2018《土壤环境质量

农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[11],当土壤 pH 值为 5.5~6.5 时,农田土壤污染 Cd 风险临界值为 0.30 mg/kg,供试土壤 Cd 超标 14.27 倍。

供试亚硒酸钠(Na₂SeO₃)、硒酸钠(Na₂SeO₄)、硒代甲硫氨酸(C₅H₁₁NO₂Se)均购自北京百灵威科技有限公司;纳米硒(SeNPs),粒径 25~45 nm,购自奥格生物技术(上海)有限公司。供试 N、P、K 肥分别为分析纯的尿素、磷酸二氢钙、硫酸钾,均购自湖南化学试剂总厂。

1.2 试验设计

试验设置 5 个处理:对照(CK),污染土培养;SeNPs,污染土培养中施用纳米硒;Se(VI),污染土培养中施用硒酸钠;Se(IV),污染土培养中施用亚硒酸钠;SeMet,污染土培养中施用硒代甲硫氨酸。各处理重复 3 次。上述硒处理皆采用超纯水进行高速搅拌,Se 浓度为 36 μmol/L。

盆栽装置为桶形塑料制品,每盆装土 2.5 kg,将肥料(N=1.0 g, m(N):m(P₂O₅):m(K₂O)=

2:1:1)与土壤充分混合,保持 70% 土壤持水量,平衡 6 d。之后每盆移入油菜幼苗 3 株,待幼苗进入生根期(10 d 后)间苗至 1 株。之后加入相关硒溶液,为避免高剂量的硒对幼苗造成冲击效应,采用多次分施,即每次施入 30 mL 相应硒溶液,连续 10 d,总量为 300 mL。其他管理措施同作物培育方法,盆栽培育时间为 38 d。

1.3 样品采集及测定分析

1.3.1 油菜植株生物量、Cd 浓度及 Se 浓度测定 培养 38 d 后,将油菜植株小心整株取出,将植株地上部、根系分开,105 ℃ 杀青 30 min,70 ℃ 烘干至恒质量并记录。将烘干的植株进行粉碎处理封装待测,称取 0.50 g 待测样品,用 HNO₃ 消解 2 min,之后加入浓盐酸进行酸解萃取,借助电感耦合等离子体光谱仪(ICAPQc,赛默飞世尔科技公司)采用电感耦合等离子体质谱法^[12]测定样品中的 Cd、Se 浓度。

1.3.2 植株 Cd 亚细胞分布、Cd 化学形态测定 Cd 的亚细胞分布采用差速离心法分离测定,分为细胞壁、细胞器、细胞膜和可溶性部分,相关方法参考闫秀秀等所述^[13]略作修改。即准确称取 0.50 g 新鲜油菜植株样品,并用 4 ℃ 环境下预冷的 40 mL 混合提取液[250 mmol/L 蔗糖、1 mmol/L 二硫代甲腺腺素醇(DTT)、50 mmol/L 三羟甲基氨基甲烷盐酸盐, pH 值为 7.5]速研磨提取样品,将匀浆采用 80 μm 孔径的有机膜过滤,残留滤渣记为细胞壁组分。将所得滤液在 3 000 r/min 离心 30 min,沉淀物即为细胞器组分;随后上清液以 15 000 r/min 进一步离心 30 min 后,上清液溶液、沉淀物分别为可溶性组分、细胞膜组分。

Cd 不同化学形态分为乙醇提取态、水提取态、氯化钠提取态、醋酸提取态、盐酸提取态及残渣提取态,上述提取分离参考 Fu 等所述^[14]采用逐步提取法测定,使用电感耦合等离子体质谱仪测量每个提取步骤中获得的 Cd 浓度。

1.3.3 植株光合色素测定 叶绿素、类胡萝卜素总量皆采用丙酮-乙醇混合浸提,采用紫外分光光度法分别在 650、470 nm 处测定,具体步骤参照李合生所述^[15]。

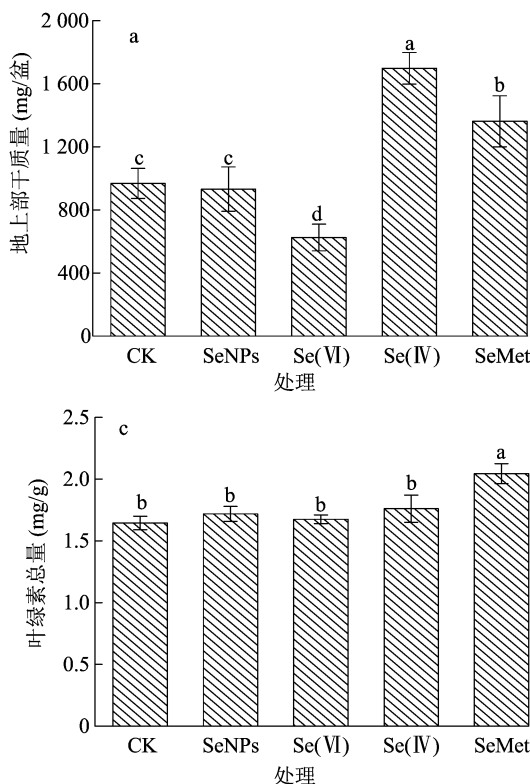
1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2013 进行数据整理,采用 SPSS 19.0 进行试验数据统计分析(α=0.05),采用 Origin 9 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同硒形态对镉胁迫下油菜生物量累积及色素含量的影响

由图 1 - a 可知,地上部干物质累积中,与 CK 相比,硒处理[SeNPs、Se(VI)、Se(IV)、SeMet]变幅 -35.43% ~ 75.39%,其中 Se(VI) 处理累积量最低,显著小于其他处理;以 Se(IV) 处理累积量最高,SeMet 处理其次,二者间差异显著,同时 CK、SeNPs、Se(VI) 处理较 Se(IV) 和 SeMet 处理分别显著降低 42.98%、45.12%、63.19% 和 28.94%、31.61%、54.12%。由图 1 - b 可知,各处理根系干物质累积

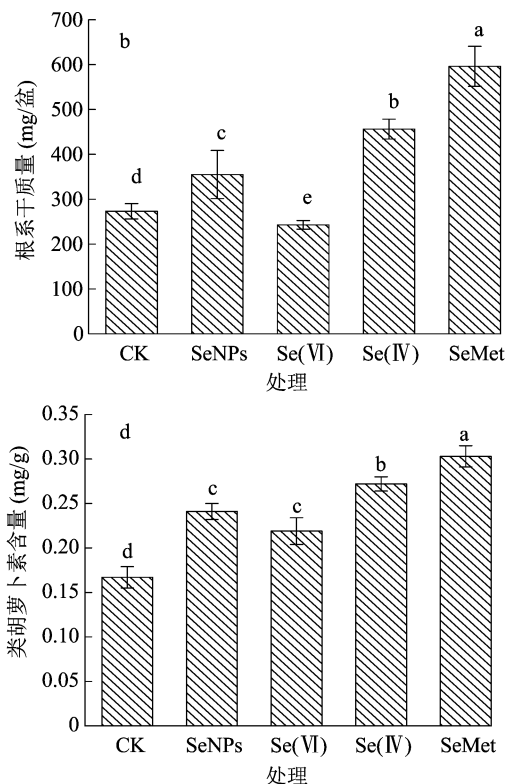


柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。图 2、图 3 同
图 1 不同硒形态对镉胁迫下油菜生物量累积及色素含量的影响

2.2 不同硒形态对镉胁迫下油菜硒累积的影响

由图 2 - a 可知,各处理地上部 Se 浓度表现为 CK < SeNPs < Se(VI) < Se(IV) < SeMet; 与 CK 处理相比, SeNPs、Se(VI) 处理分别提高 20.74%、45.19%, CK、SeNPs、Se(VI) 处理间无显著差异且均显著小于 Se(IV) 和 SeMet 处理;硒处理中,以 SeMet 处理 Se 浓度最高,其较 CK、SeNPs、Se(VI)、Se(IV) 处理显著增加 66.43 倍、54.85 倍、45.44 倍、13.03 倍。由图 2 - b 可知,各处理根系 Se 浓度表现为 CK < Se(VI) < SeNPs < Se(IV) < SeMet; CK 除与 Se

量表现为 Se(VI) < CK < SeNPs < Se(IV) < SeMet, 处理间均差异显著。由图 1 - c 可知,叶绿素总量中,CK、SeNPs、Se(VI)、Se(IV) 处理间差距较小均未达显著差异水平,且分别显著小于 SeMet 处理 19.56%、15.94%、18.09%、13.89%。由图 1 - d 可知,类胡萝卜素含量中,各处理表现为 CK < Se(VI) < SeNPs < Se(IV) < SeMet, 与 CK 处理相比,硒处理较其显著提高 31.14% ~ 81.44%;在硒处理中,Se(VI) 处理含量最低,为 0.22 mg/g,与 SeNPs 处理 (0.24 mg/g) 无显著差异,且二者均显著小于 Se(IV)、SeMet 处理。



(VI) 处理无显著差异外皆显著小于其他硒处理;硒处理中,各硒处理间均差异显著,其中与 SeMet 处理相比, SeNPs、Se(VI)、Se(IV) 处理分别显著降低 88.87%、92.70%、51.50%。

2.3 不同硒形态对镉胁迫下油菜镉累积及转运的影响

由图 3 - a 可知,根系 Cd 浓度皆整体大于地上部。地上部 Cd 浓度中,与 CK 处理相比,硒处理[SeNPs、Se(VI)、Se(IV)、SeMet]显著降低 32.94% ~ 42.92%,硒处理中,以 SeMet 处理 Cd 浓度最低,其

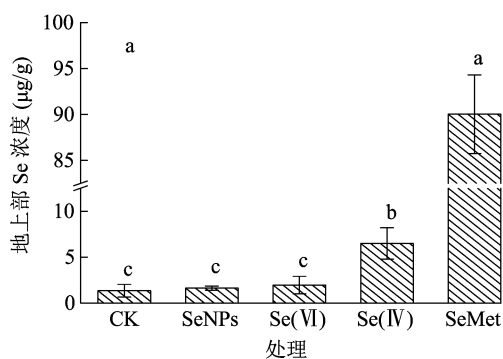
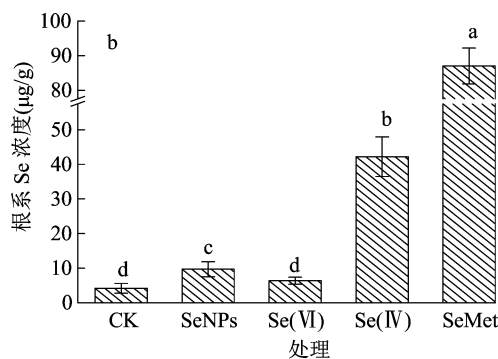


图2 不同硒形态对镉胁迫下油菜硒累积的影响



显著低于 SeNPs、Se(VI)、Se(IV) 处理,此外,后三者处理间差异较小且差异不显著;根系 Cd 浓度中,各处理呈 SeMet < SeNPs < Se(IV) < Se(VI) < CK,其中各硒处理 Cd 浓度均小于 CK 处理,其中 CK 除与 Se(VI) 处理无显著差异外皆显著大于其他硒处理,且与 SeMet 处理相比,CK、SeNPs、Se(VI) 及 Se(IV) 分别较其显著提高 16.43%、6.89%、15.34% 及

11.74%。Cd 转移系数(TF)为地上部 Cd 浓度与根系浓度之比,由图 3-b 可知,TF 以 CK 处理最高,硒处理较其显著降低 26.97%~33.71%;硒处理中,以 SeNPs 处理的 TF 最高,Se(VI)、Se(IV)、SeMet 处理较其分别显著降低 8.30%、7.59%、9.03%,此外,Se(VI)、Se(IV)、SeMet 处理间均差异不显著。

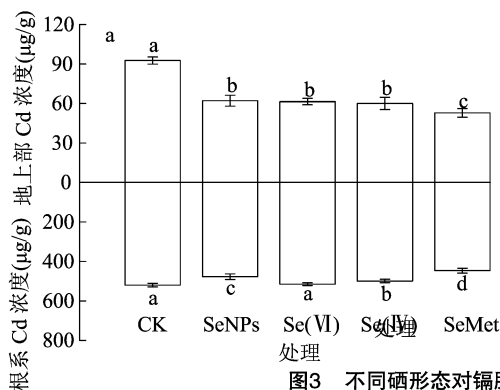
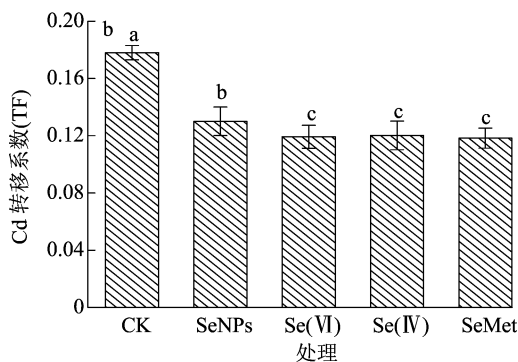


图3 不同硒形态对镉胁迫下油菜镉累积及转运的影响



2.4 不同硒形态对镉胁迫下油菜镉亚细胞分布的影响

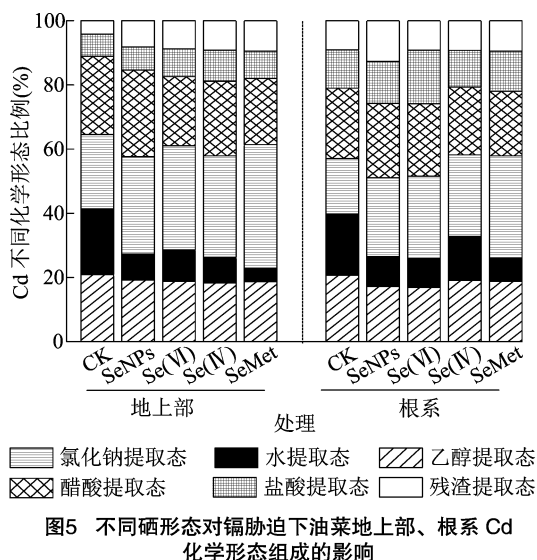
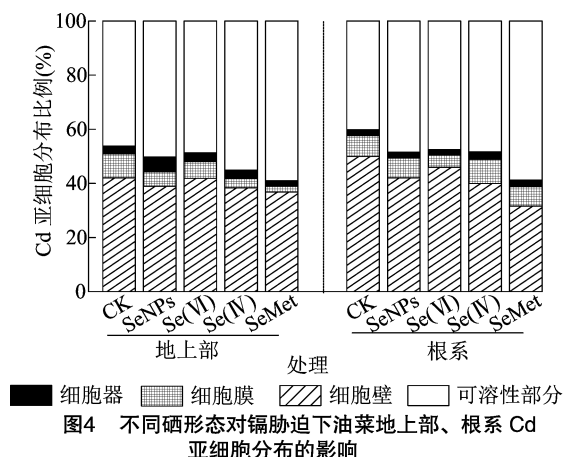
由图 4 可知,使用差异离心法将植物亚细胞 Cd 组分分为 4 个部分:细胞壁、细胞器、细胞膜和可溶性部分。各处理不同组分中 Cd 累积比例差距较大,在根系中,CK 处理中的 Cd 主要分布于细胞壁(49.91%)和可溶性部分(40.15%),一小部分分布于细胞器(2.18%)和细胞膜(7.76%)中;同时,在硒处理[SeNPs、Se(VI)、Se(IV)、SeMet]中,大部分 Cd 则存在于可溶性部分(47.51%~58.73%)中,这意味着硒处理下使 Cd 主要分布于可溶性部分,其中 SeMet 处理可溶性部分的 Cd 比例最高,较 CK 处理增加 18.58%。

Cd 在地上部中的亚细胞分布规律与根系趋于一致。由图 4 可知,CK 处理的油菜植株中 Cd 在细

胞壁和可溶性部分中的比例较高,其中 CK 处理细胞壁比例高于 SeNPs 处理、Se(IV) 处理和 SeMet 处理;而在可溶性组分中,硒处理的比例皆大于 CK 处理。然而,对于根系和地上部的 Cd 亚细胞分布,CK 处理和各硒处理[SeNPs、Se(VI)、Se(IV)、SeMet]之间,细胞器和细胞膜中 Cd 比例波动较小。

2.5 不同硒形态对镉胁迫下油菜镉化学形态组成的影响

Cd 在根系中的化学形态如图 5 所示,各处理中的醋酸提取态和氯化钠提取态的 Cd 形态在根系中占据主要地位,两者 Cd 化学形态分别占总 Cd 累积量的 20.17%~23.18% 和 17.35%~31.86%,而残渣提取态的化学形态比例整体较低(9.05%~12.65%)。根系中,CK 处理的水提取态的 Cd 占总 Cd 的 19.09%,均高于硒处理(7.25%~13.77%);而盐



酸提取态和乙醇提取态的 Cd 化学形态分别以 Se(VI) 处理(16.67%)、CK 处理(20.63%)最高。

在地上部中,各处理的 Cd 化学形态规律与根系趋势相似。即氯化钠提取态和醋酸提取态的 Cd 组分在地上部中也占据主导地位,分别占总 Cd 含量的 23.09% ~ 38.61% 和 20.67% ~ 26.96%。此外,在所有形式的硒处理中,氯化钠提取态和盐酸提取态的 Cd 比例均高于 CK 处理,而硒处理的乙醇提取态与水提取态 Cd 比例皆低于 CK 处理。

3 讨论与结论

土壤 Cd 污染已成为制约农业安全生产的重要因素,已有研究表明,外源施用 Se 可有效降低植物对 Cd 的累积^[16-17]。本研究中,在 Cd 污染土壤中培养 35 d 后,与 CK 处理相比,除 Se(VI) 处理外,其他硒处理[SeNPs、Se(IV)、SeMet]均促进了油菜地上部、根系干物质累积,同时硒处理的叶绿素总量

和类胡萝卜素含量整体大于 CK 处理。叶绿素是光合作用的主要色素,参与光能的吸收、转移、分配以及转化过程,类胡萝卜素是重要的抗氧化剂,逆境环境下两者皆可激发 PS II 光反应系统的活性从而维持植物养分代谢^[18]。Ahmad 等研究表明,在重金属胁迫下硒可提高植物叶绿体中的淀粉积累、抑制叶绿体降解,从而维持植株生理代谢^[19]。因此,本研究中 Cd 胁迫下硒可能是通过提高光合色素含量从而保证油菜植株的生长发育。

污染土壤中,Cd 容易从土壤转移至植物体内。前人研究表明,外源无机形态 Se 可降低污染土壤中小白菜^[20]、水稻^[21]、小麦^[22]等作物的 Cd 累积。本研究中,SeNPs、Se(IV) 和 SeMet 处理均显著降低了油菜地上部和根系的 Cd 浓度,并且有机态硒处理(SeMet)效果最佳,而 Se(VI) 处理中地上部 Cd 浓度显著下降,但在根系中没有显著变化。这些结果表明不同硒形态对植株吸收 Cd 的阻遏能力不同,这可能是因为不同硒形态进入植物体的机制、数量以及在植株体内的同化差异所致^[16]。此外,本研究中,所有硒处理均显著降低了 Cd 转移系数,即亚硒酸钠、硒酸钠、硒代甲硫氨酸及纳米硒 4 种形态硒皆可有效阻隔 Cd 向上运动。进一步研究表明,与无机形式的 Se 相比,有机硒处理(SeMet)的油菜植株硒含量最高;前人研究表明:有机硒是油菜作物吸收的主要硒形态^[23],该研究结果与前人研究结果一致。以往的研究表明,硒主要通过水分吸收途径被植物根系吸收,因此直径越小的硒形态越容易穿过细胞壁,从而到达植株体内^[8],因此植株的纳米硒吸收量最高。然而本研究发现,SeNPs 与 Se(VI) 的吸收量相当且皆显著小于 Se(IV)、SeMet,这意味着 Se 直径并不是 Se 进入根系的先决条件。

在根系中,Cd 在不同亚细胞组分比例表现为细胞壁 > 可溶性部分 > 细胞膜 > 细胞器,这种分布模式可能与植物缓解 Cd 胁迫的相应机制有关。在植物中,细胞壁是阻止 Cd^{2+} 进入植物的首道屏障^[24],但细胞壁对 Cd 的劫持能力有限,当细胞壁饱和后,可溶性部分的谷胱甘肽螯合 Cd 形成复合物,从而减少对细胞器的损伤^[2,25]。本研究表明,外源硒处理均降低了细胞壁中 Cd 比例,增加了可溶性部分中镉的比例,这些结果表明,Se 可以促进根系细胞壁和液泡螯合 Cd;这一发现与 Yu 等的研究结果^[26]一致。Se 的化学性质与硫相似,两者皆可能通过刺激植物中 GSH(谷胱甘肽)和 PC(植物螯合素)的合

成来促进 Cd 螯合^[2]。在植物中 Cd 首先被根系吸收然后转移到地上部,因此植物中存在的 Cd 形态可直接影响迁移能力和活性^[27]。在本研究中,醋酸提取态和氯化钠提取态的 Cd 比例在油菜植株中占主导地位,该结果与 Wang 等的研究结论^[28]一致。此外,本研究发现,Se 的添加降低了根系中乙醇提取态和水提取态 Cd 的比例。这些结果表明,硒通过抑制根系到地上部的 Cd 易位来减少地上部中 Cd 的积累。综上所述,硒增加了 Cd 在细胞壁和液泡中的螯合,降低了活性 Cd 的化学形式,从而减少了地上部 Cd 的积累。

参考文献:

- [1] 胡艳美,王旭军,党秀丽. 改良剂对农田土壤重金属镉修复的研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(6):17-23.
- [2] 张星雨,叶志彪,张余洋. 植物响应镉胁迫的生理与分子机制研究进展[J]. 植物生理学报,2021,57(7):1437-1450.
- [3] 俞明宏,王力明,刘继,等. 表油菜素内酯对镉胁迫下番茄幼苗生长及镉累积的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(3):151-156.
- [4] 吴春蕾,吴之琳,吴洁,等. 硒在植物保护与农产品质量安全中的应用进展[J]. 生物技术进展,2017,7(5):462-466.
- [5] 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.
- [6] 徐境懋,顾明华,韦燕燕,等. 纳米硒和亚硒酸盐对镉污染土壤中水稻镉积累的影响[J]. 南方农业学报,2021,52(10):2727-2734.
- [7] Lin L, Zhou W H, Dai H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235/236: 343-351.
- [8] Kikkert J, Berkelaar E. Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, 65(3):458-465.
- [9] Schiavon M, Pilon-Smits E A H. The fascinating facets of plant selenium accumulation - biochemistry, physiology, evolution and ecology[J]. New Phytologist, 2017, 213(4):1582-1596.
- [10] 王振宇,魏凌峰,蔡杰,等. 纳米硒的合成研究及其在食品与农业中的应用[J]. 食品科技,2021,46(12):26-33.
- [11] 中华人民共和国生态环境部,国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准:GB 15618—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 粮油检验 谷物及其制品中钠、镁、钾、钙、铬、锰、铁、铜、锌、砷、硒、镉和铅的测定 电感耦合等离子体质谱法:GB/T 35876—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [13] 闫秀秀,徐应明,王林,等. 喷施不同形态锰肥对叶用油菜镉累积及亚细胞分布的影响[J]. 农业环境科学学报,2019,38

- (8):1872-1881.
- [14] Fu X P, Dou C M, Chen Y X, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186:103-107.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [16] 万亚男,余垚,齐田田,等. 硒对植物吸收转运镉影响机制的研究进展[J]. 生物技术进展,2017,7(5):473-479.
- [17] 斯鑫鑫,唐尚柱,赵晓海,等. 蓝藻有机富硒肥的研制及其在普通白菜种植中的应用[J]. 江苏农业学报,2021,37(2):340-347.
- [18] 王峰,闫家榕,陈雪玉,等. 光调控植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 园艺学报,2019,46(5):975-994.
- [19] Ahmad P, Allah E A, Hashem A, et al. Exogenous application of selenium mitigates cadmium toxicity in *Brassica juncea* L. (Czern & Cross) by up-regulating antioxidative system and secondary metabolites[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(4):936-950.
- [20] 刘杨,齐明星,王敏,等. 不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响[J]. 环境科学,2021,42(4):2024-2030.
- [21] 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.
- [22] Qin X M, Nie Z J, Liu H E, et al. Influence of selenium on root morphology and photosynthetic characteristics of winter wheat under cadmium stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 150:232-239.
- [23] Yin H Q, Qi Z Y, Li M Q, et al. Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa* L. [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 169:911-917.
- [24] Fan J L, Wei X Z, Wan L C, et al. Disarrangement of actin filaments and Ca^{2+} gradient by CdCl_2 alters cell wall construction in *Arabidopsis thaliana* root hairs by inhibiting vesicular trafficking [J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(11):1157-1167.
- [25] 杨红霞,陈俊良,刘巍. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(2):1-8.
- [26] Yu Y, Fu P N, Huang Q Q, et al. Accumulation, subcellular distribution, and oxidative stress of cadmium in *Brassica chinensis* supplied with selenite and selenate at different growth stages[J]. Chemosphere, 2019, 216:331-340.
- [27] Wu F B, Dong J, Qian Q Q, et al. Subcellular distribution and chemical form of Cd and Cd-Zn interaction in different barley genotypes[J]. Chemosphere, 2005, 60(10):1437-1446.
- [28] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Bechmeria nivea* (L.) Gaud. [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 62(3):389-395.