叶面喷施硒对紫色小麦镉积累的影响

余林科, 杨昕玥, 徐小逊, 王贵胤, 杨占彪, 张世熔

余林科, 杨昕玥, 徐小逊, 等. 叶面喷施硒对紫色小麦镉积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 733-743.
YU L K, YANG X Y, XU X X, et al. Effects of foliar application of selenium on cadmium accumulation in purple wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4): 733-743.

叶面喷施硒对紫色小麦镉积累的影响

余林科[1], 杨昕玥[1], 徐小逊[1,2*], 王贵胤[1,2], 杨占彪[1], 张世熔[1,2]

(1.四川农业大学环境学院, 成都 611130; 2.四川省土壤环境保护重点实验室, 成都 611130)

摘　要: 为降低紫色小麦籽粒对镉(Cd)的积累能力,确保食品安全,本研究采用大田试验分析叶面喷施3种浓度亚硒酸钠(Na_2SeO_3)溶液对4种紫色小麦Cd含量的影响,并通过分析Cd在小麦中的富集和亚细胞分布特征揭示其作用机理。结果表明:施硒(Se)后小麦各器官Cd含量呈下降趋势,富集系数均显著降低(P<0.05)。施Na_2SeO_3浓度为0.8 mmol·L^{-1}时,小麦籽粒中Cd含量较对照(不施Se)降低47%~63%。4种小麦茎到籽粒和叶到籽粒的Cd转运系数均显著降低(P<0.05),降幅分别为22%~46%和34%~61%。小麦根和叶亚细胞中的Cd含量均表现为可溶性组分>细胞壁>细胞器,施Se降低了小麦亚细胞各组分中的Cd含量,提高了Cd在根和叶亚细胞可溶性组分中的占比。研究表明,叶面喷施Se能增强紫色小麦对Cd的区室化作用,抑制Cd向籽粒的转运,并使籽粒中Cd含量达到《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)的要求。

关键词: 叶面喷施;镉积累;亚硒酸钠;紫色小麦;亚细胞分布

中图分类号: X173;S512.1　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2023)04-0733-11　　doi:10.11654/jaes.2022-0873

Effects of foliar application of selenium on cadmium accumulation in purple wheat

YU Linke[1], YANG Xinyue[1], XU Xiaoxun[1,2*], WANG Guiyin[1,2], YANG Zhanbiao[1], ZHANG Shirong[1,2]

(1. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment Protection of Sichuan Province, Chengdu 611130, China)

Abstract: Due to the large area of cadmium (Cd) contaminated agricultural soils, convenient operation, high efficiency, and environmentally friendly methods for safe food production are necessary. In the current study, a field experiment was conducted to determine the effects of foliar spraying of sodium selenite (Na_2SeO_3) on Cd concentration in four purple wheat varieties. Furthermore, the enrichment and subcellular distribution characteristics of Cd in plants were investigated. The results showed that the Cd concentration of all wheat organs decreased after the supply of Na_2SeO_3, and the bioconcentration factor was significantly lower (P<0.05) than that in the control treatment. When the concentration of Na_2SeO_3 was 0.8 mmol·L^{-1}, the Cd concentration of wheat grains decreased by 47%-63%, compared with the control treatment. In addition, the translocation factor of Cd from the stem to the grain and the leaf to the grain of four wheat varieties significantly decreased (P<0.05) by 22%-46% and 34%-61%, respectively. The concentration of Cd in the subcellular fractions of the plants was in the order of soluble fraction>cell wall>organelle fraction. Application of Na_2SeO_3 reduced the Cd concentration in each subcellular fraction of wheat plants, and increased the proportion of Cd in the soluble fractions of roots and leaves. These results suggest that foliar spraying of Na_2SeO_3 could enhance the compartmentalization of Cd in purple wheat, inhibit its transport to grains, and induce its concentration in grains to meet the requirements of the *National Standard for Food Safety-Limits of Contaminants in Foods*(GB 2762—2017).

Keywords: foliar application; cadmium accumulation; sodium selenite; purple wheat; subcellular distribution

收稿日期: 2022-09-01　　**录用日期:** 2022-11-03
作者简介: 余林科(1999—),男,四川广安人,硕士研究生,从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:571793698@qq.com
***通信作者:** 徐小逊　E-mail:xuxiaoxun2013@163.com
基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFN0018);成都市重点研发支撑计划项目(2021-YF05-00959-SN)
Project supported: Sichuan Science and Technology Program(2021YFN0018); The Key Research and Development Program of Chengdu City (2021-YF05-00959-SN)

镉(Cd)是土壤重金属污染元素之一,随着工农业加速发展,大量含Cd废物通过工业废气沉降、废水排放、化肥施用等方式进入农业土壤[1]。土壤中过量的Cd会破坏植物细胞结构,抑制植物的光合作用以及对养分的吸收和运输,进而影响植物的正常生长[2]。此外,Cd的流动性很强,极易通过植物富集作用进入食物链,对人体健康构成威胁[3]。小麦作为最主要的粮食作物之一,在世界范围内被广泛种植,因此,开发降低小麦Cd污染风险的技术措施很有必要。

减少作物Cd积累的途径主要包括种植低Cd积累品种[4-5],采取改良灌溉方式、施用功能性肥料、叶面喷施阻控剂等农艺措施[6-7],以及施行土壤改良措施[8-9]等。叶面喷施阻控技术具有操作方便、效率高、环境友好等特点,是一种具有良好应用前景的减Cd措施,已成为当下研究的热点[10]。其中,叶面喷施硒(Se)被认为是缓解作物中Cd污染毒性效应的有效农艺措施[11]。Se能够通过与Cd形成复合物、促进Cd的螯合作用以及区室化分布等方式,减少植物对Cd的吸收和转运[12]。研究发现,施Se可以改变Cd在植物亚细胞组分中的分布,通过增加Cd在小白菜和水稻幼苗可溶性组分中的分布比例来降低Cd的流动性[13-14]。然而庞晓辰等[15]发现施Se增加了Cd在水稻K优818细胞壁中的分布,通过细胞壁对Cd的固定作用减少Cd向地上部转移。由此可见,Se对Cd的阻控机制受作物类型和品种差异的影响。

紫色小麦与传统小麦相比,具有对重金属低积累的特性[16]。本课题组在前期大田试验研究中发现,紫色小麦比传统普通小麦有更低的Cd积累能力,但其籽粒中Cd含量仍未达到《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)对Cd的要求。因此,本研究拟对紫色小麦叶面喷施亚硒酸钠(Na_2SeO_3),通过分析不同器官中Cd富集、转运和亚细胞分布特征,探讨施Se对紫色小麦籽粒Cd积累的影响,以期为今后利用该技术减少紫色小麦Cd积累提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

大田试验位于四川省成都市金堂县某安全利用耕地。该试验地土壤类型为中性紫色土,其耕层(0~20 cm)pH为7.42,有机质含量为12.44 g·kg^{-1},碱解氮、有效磷、速效钾的含量分别为97.23、17.56、95.83 mg·kg^{-1},Cd含量为0.35 mg·kg^{-1}。供试的4份小麦材料分别为蜀紫麦1702、蜀紫麦1705、蜀紫麦1706和紫糯麦168。采用Gao等[17]的方法进行Na_2SeO_3溶液的配制:将2 767 mg的Na_2SeO_3固体溶解于1 L去离子水中,得到16 mmol·L^{-1}的Na_2SeO_3溶液。使用前将Na_2SeO_3溶液分别稀释到0.2、0.4、0.8 mmol·L^{-1}(分别记作Se1、Se2、Se3),喷施等量去离子水作为空白对照(CK)。

1.2 试验设计

小麦于2020年10月29日播种,播种方式为撒播,播种量为150 kg·hm^{-2}。4种小麦均设置CK、Se1、Se2、Se3 4个处理,小区面积2 m×2 m,随机区组设计,每个处理重复3次,共48个试验小区,在小区周围设置1 m的缓冲区。在小麦孕穗期至灌浆期每间隔7 d进行1次叶面喷施,每个小区每次的喷施量为1.5 L,共喷施3次(4月1日、8日、15日)。于第3次喷施后第14天(4月29日)采集植物鲜样测定根、叶亚细胞中的Cd含量,小麦成熟后(5月16日)采集样品分别测定根、茎、叶、籽粒中的Cd含量。

1.3 样品采集与处理

试验小区所在田块地形起伏小、土壤理化特征均匀。于小麦播种前采用梅花法设置7个混样点,采集1份耕层混合土样用于土壤Cd含量及其他基础理化性质分析。为进行小麦各器官中亚细胞组分Cd含量分析,于第3次叶面喷施后第14天(4月29日),分别在每个处理小区距离边界0.3 m的区域内,按五点取样法采集5株生长状况良好的小麦混合成1份小麦鲜样,共采集48份。鲜样用去离子水洗净后将根、叶分别研磨,根据Jiang等[18]的方法通过差速离心分离得到亚细胞内细胞壁、细胞器、可溶性组分,之后测定各组分中的Cd含量。具体操作:样品采集洗净后擦干表面水分,收集到离心管并放入液氮中带回实验室,然后快速转移到−80 ℃冰箱保存;称取新鲜根系、叶片各0.2 g,然后加入组成为250 mmol·L^{-1}蔗糖、50 mmol·L^{-1} Tris−HCl(pH=7.5)与1 mmol·L^{-1}二硫赤鲜糖醇(Dithioerythritol,DTE)的预冷提取液,充分研磨成匀浆液,将匀浆液转移至离心管中在4 000 r·min^{-1}条件下离心15 min,沉淀即为细胞壁组分,再将上清液在10 000 r·min^{-1}条件下离心40 min,沉淀为细胞器组分,上清液为可溶性组分,试验操作均在4 ℃下进行;细胞壁和细胞器组分经10 mL混酸(V_{HNO_3}:V_{HClO_4}=4:1)消解后,稀释至25 mL,可溶性组分直接稀释至25 mL,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Varian 720ES ICP−OES,检出限为1 μg·L^{-1})测定稀释液中的Cd含量。

为进行成熟期小麦各器官Cd含量分析,于小麦

成熟后(5月16日),以相同的方法采集48份小麦混合样品,用去离子水洗净后分为根、茎、叶和籽粒4个部分,在烘箱中105 ℃杀青30 min后,70 ℃烘干至质量恒定。将小麦各器官的样品经粉碎机粉碎,然后分别称取各样品0.3 g于锥形瓶中,加入10 mL混酸(V_{HNO_3}:V_{HClO_4}=4:1)消解,稀释至25 mL后测定Cd含量。

1.4 数据分析

采用生物富集系数(Bioconcentration Factor,BCF)和转运系数(Translocation Factor,TF)来评价重金属在小麦各部位中的积累转运能力[19]。BCF为小麦各器官Cd含量(mg·kg^{-1})与土壤中Cd含量(mg·kg^{-1})的比值;TF_{A-B}为B器官Cd含量(mg·kg^{-1})与A器官Cd含量(mg·kg^{-1})的比值;小麦A器官Cd的分配比例为A器官Cd含量(mg·kg^{-1})与根、茎、叶、籽粒Cd含量总和(mg·kg^{-1})的比值。

数据采用Excel 2019进行处理并制作表格。利用SPSS Statistics 20.0软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),用Duncan法进行处理间多重比较(P<0.05),使用Origin 2021制图。根据假设的因果关系,使用Rstudio 2021,应用结构方程模型(SEM)来探究Se浓度和小麦各器官Cd含量对籽粒Cd含量的直接和间接影响,使用PowerPoint 2019制图。

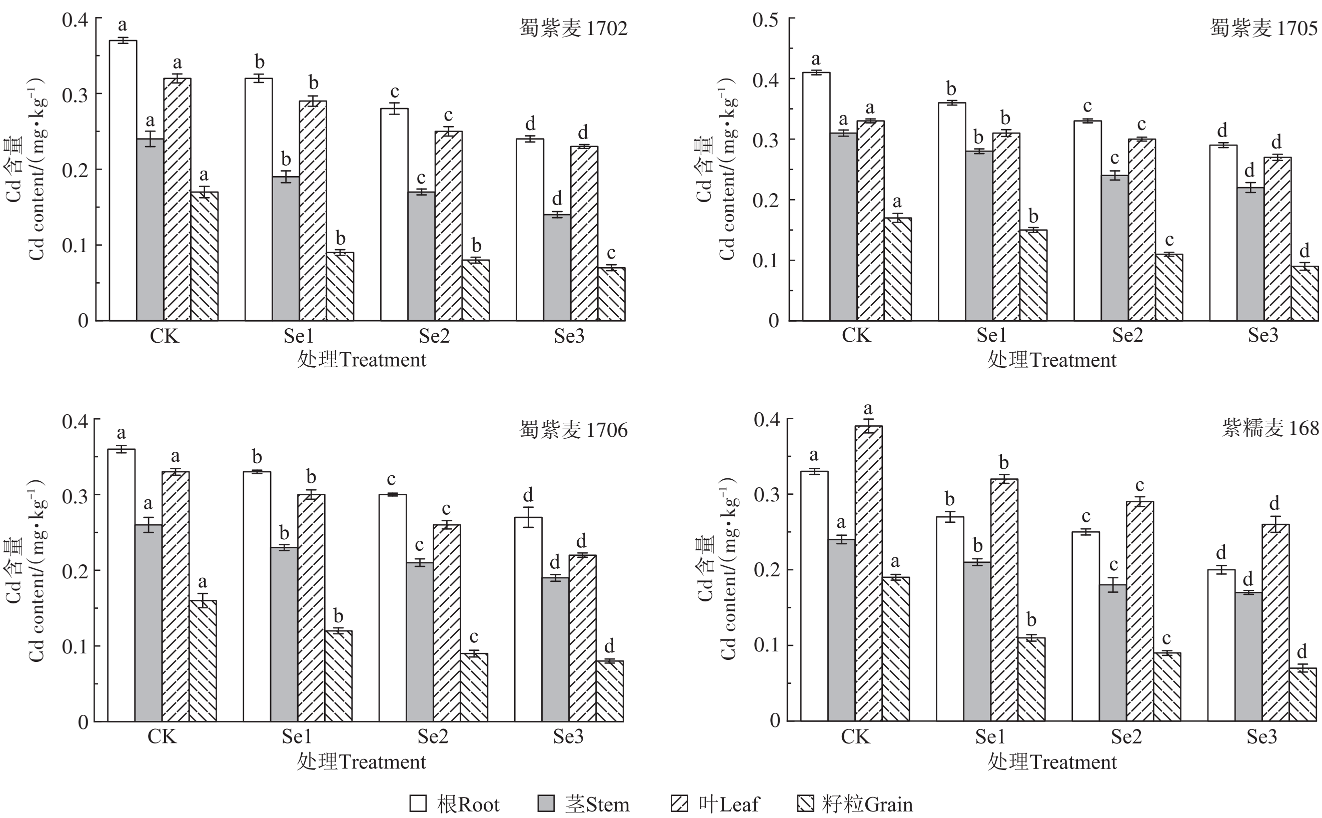
2 结果与分析

2.1 叶面喷施Se对小麦各器官Cd含量的影响

4种小麦根、茎、叶、籽粒中的Cd含量随Na_2SeO_3喷施浓度升高呈下降趋势(图1)。Se3处理时,4种小麦的籽粒Cd含量下降最明显,降幅为47%~63%,其中紫糯麦168降幅最大。根、茎、叶中Cd含量也呈现显著下降趋势,降幅范围分别为25%~39%、27%~42%和18%~33%。

2.2 喷施Se对小麦Cd富集及转运的影响

在小麦各器官中Cd分布较高的器官为根和叶,占比分别为28%~36%和27%~38%,其次为茎,占比为21%~25%,籽粒对Cd的积累能力最弱,仅占比10%~16%(图2)。喷施Se后,籽粒中Cd分布占比下降1~7



误差线表示3次重复的标准差。柱体上不同小写字母表示通过单因素方差分析和Duncan检验,处理间在5%水平差异显著。

Error bar represent standard deviation(n=3). The means marked with different letters at the column are significant differences(P<0.05) among different treatments according to ANOVA and Duncan tests.

图1 叶面施Se对小麦各器官Cd含量的影响

Figure 1 Effects of foliar Se application on Cd content in wheat organs

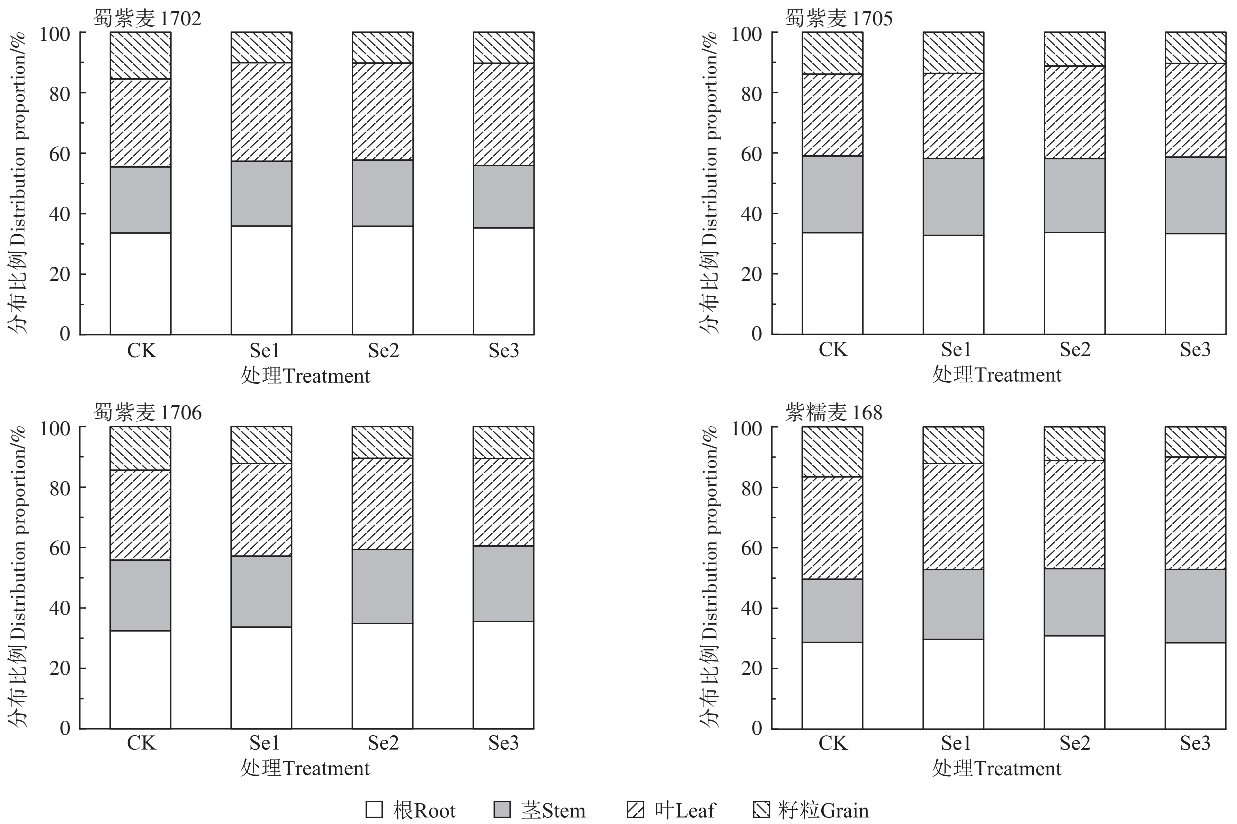


图2 叶面施Se对小麦各器官Cd分布比例的影响

Figure 2 Effects of foliar Se application on Cd distribution proportion in wheat organs

个百分点，其中紫糯麦168下降最多。从作用显著性和降幅来看，喷施Se对紫糯麦168籽粒Cd含量及分布比例的降低效果最好。

叶面喷施Se后，4种小麦各器官Cd富集系数均显著降低（P<0.05），且随着Na_2SeO_3浓度升高降幅增大（表1）。其中籽粒富集系数的减小程度最大，Se3处理时，4种小麦籽粒Cd富集系数降低45%~75%。

小麦Cd转运系数表现为$TF_{(茎-叶)}$>$TF_{(根-茎)}$>$TF_{(茎-籽粒)}$>$TF_{(叶-籽粒)}$（表2）。叶面喷施Se后，$TF_{(茎-籽粒)}$和$TF_{(叶-籽粒)}$显著减小（P<0.05），且随Na_2SeO_3浓度升高，下降程度逐渐增大，Se3处理时，降幅分别为22%~46%和34%~61%，其中紫糯麦168降幅最大。$TF_{(茎-叶)}$和$TF_{(根-茎)}$整体变化不显著。

2.3 叶面喷施Se对小麦根和叶亚细胞中Cd分布的影响

2.3.1 根亚细胞Cd分布

4种紫色小麦根亚细胞Cd含量顺序为可溶性组分>细胞壁>细胞器，根亚细胞各组分中Cd含量随Na_2SeO_3喷施浓度的升高呈下降趋势（表3）。其中，Se3处理与CK相比，4种小麦的Cd含量在细胞壁中降低47%~67%，在细胞器中降低57%~72%，在可溶性组分中降低26%~52%。就Cd的分配比例来看，小麦根部的Cd主要积累于可溶性组分中，占小麦根部Cd总量的53%~73%，其次于细胞壁中，占比为18%~33%（图3）。Se1、Se2处理后，4种小麦根亚细胞各组分Cd分布占比变化较小，随着Na_2SeO_3浓度的进一步提升（Se3处理），细胞壁的Cd分布占比较CK下降了3~12个百分点，细胞器的Cd分布占比下降了4~7个百分点，而可溶性组分的Cd分布占比上升了8~16个百分点。

2.3.2 叶亚细胞Cd分布

由表4可知，小麦叶部Cd含量顺序为可溶性组分>细胞壁>细胞器。叶亚细胞各组分中Cd含量随Na_2SeO_3喷施浓度的升高呈下降趋势，与根亚细胞Cd含量变化情况相似。其中，Se3处理与CK相比，4种小麦细胞壁中Cd含量降低50%~53%，细胞器中降低75%~78%，可溶性组分中降低39%~46%。小麦叶片中的Cd主要积累于可溶性组分中（图4），占叶片Cd总量的59%~71%，其次为细胞壁，占比为21%~25%。随着Na_2SeO_3喷施浓度的升高，蜀紫麦1702、蜀紫麦1705和蜀紫麦1706小麦叶亚细胞可溶性组分中的Cd分布占比上升了6~10个百分点，细胞器中下降了5~10个百分点，而细胞壁中分布占比变化不明显；紫

表1 叶面施Se对小麦各器官Cd富集系数的影响

Table 1 Effects of foliar Se application on Cd bioconcentration factor of wheat organs

品种 Variety	处理 Treatment	根部富集系数 BCF of root	茎部富集系数 BCF of stem	叶部富集系数 BCF of leaf	籽粒富集系数 BCF of grain
蜀紫麦1702	CK	1.49±0.02a	0.97±0.04a	1.26±0.01a	0.68±0.03a
	Se1	1.29±0.02b	0.75±0.03b	1.17±0.02b	0.38±0.02b
	Se2	1.12±0.30c	0.66±0.02c	1.01±0.02c	0.33±0.02c
	Se3	0.97±0.02d	0.57±0.02d	0.93±0.01d	0.27±0.02d
蜀紫麦1705	CK	1.65±0.02a	1.23±0.02a	1.32±0.02a	0.66±0.02a
	Se1	1.46±0.02b	1.10±0.02b	1.24±0.02b	0.60±0.02b
	Se2	1.33±0.02c	0.96±0.03c	1.19±0.01c	0.45±0.01c
	Se3	1.16±0.15d	0.86±0.03d	1.09±0.02d	0.36±0.03d
蜀紫麦1706	CK	1.43±0.02a	1.03±0.04a	1.32±0.02a	0.65±0.04a
	Se1	1.33±0.01b	0.93±0.02b	1.22±0.03b	0.47±0.02b
	Se2	1.22±0.01c	0.84±0.02c	1.04±0.02c	0.39±0.02c
	Se3	1.06±0.05d	0.74±0.02d	0.86±0.01d	0.31±0.01d
紫糯麦168	CK	1.31±0.02a	0.94±0.02a	1.58±0.04a	0.75±0.02a
	Se1	1.09±0.03b	0.83±0.02b	1.29±0.02b	0.44±0.02b
	Se2	0.99±0.02c	0.72±0.04c	1.17±0.03c	0.36±0.01c
	Se3	0.79±0.02d	0.68±0.01d	1.06±0.04d	0.29±0.02d

注：数值表示3次重复的平均值与标准差，同列相同品种的不同小写字母表示通过单因素方差分析和Duncan检验，处理之间在5%水平差异显著。下同。

Note: Values are means ± standard deviation (n=3). Different letters in the same variety mean significant differences (P<0.05) among different treatments according to ANOVA and Duncan tests. The same below.

表2 叶面施Se对小麦Cd转运系数的影响

Table 2 Effects of foliar Se application on Cd translocation factor in wheat

品种 Variety	处理 Treatment	根-茎转运系数 TF from root to stem	茎-叶转运系数 TF from stem to leaf	茎-籽粒转运系数 TF from stem to grain	叶-籽粒转运系数 TF from leaf to grain
蜀紫麦1702	CK	0.65±0.04a	1.31±0.08b	0.70±0.02a	0.53±0.04a
	Se1	0.58±0.03b	1.56±0.05a	0.50±0.01b	0.32±0.01b
	Se2	0.59±0.01b	1.53±0.02a	0.50±0.02b	0.33±0.01b
	Se3	0.59±0.03b	1.63±0.06a	0.46±0.02c	0.29±0.02b
蜀紫麦1705	CK	0.74±0.01a	1.17±0.03a	0.54±0.03a	0.50±0.02a
	Se1	0.76±0.01a	1.13±0.06a	0.54±0.02a	0.48±0.03a
	Se2	0.72±0.03a	1.24±0.04a	0.47±<0.01b	0.38±0.02b
	Se3	0.75±0.04a	1.27±0.16a	0.42±0.03c	0.33±0.03c
蜀紫麦1706	CK	0.72±0.04a	1.29±0.03a	0.63±0.01a	0.49±0.02a
	Se1	0.70±0.01a	1.31±0.04a	0.50±0.02b	0.38±0.02b
	Se2	0.69±0.02a	1.24±0.01b	0.46±0.01c	0.37±0.01b
	Se3	0.70±0.05a	1.16±0.02c	0.41±0.02d	0.36±0.02b
紫糯麦168	CK	0.72±0.02a	1.67±0.03a	0.80±0.02a	0.47±0.02a
	Se1	0.76±0.03a	1.56±0.01b	0.54±0.02b	0.35±0.01b
	Se2	0.73±0.02a	1.61±0.06ab	0.50±0.02c	0.31±0.01c
	Se3	0.76±0.02a	1.57±0.08b	0.43±0.03d	0.27±0.03d

糯麦168在Na_2SeO_3喷施浓度最高时才出现明显变化，可溶性组分中Cd分布占比上升6个百分点，细胞器中下降5个百分点，细胞壁中下降1个百分点。

3 讨论

不同品种小麦对Cd的积累存在一定差异。肖昕

表3 叶面施Se对小麦根亚细胞中Cd含量（以鲜质量计）的影响

Table 3 Effects of foliar Se application on subcellular distribution of Cd content(calculated by fresh weight) in the roots of wheat

单位：mg·kg^{-1}

品种 Variety	处理 Treatment	细胞壁 Cell wall	细胞器 Organelle	可溶性组分 Soluble fraction
蜀紫麦1702	CK	0.175±0.008a	0.084±0.004a	0.300±0.001a
	Se1	0.151±0.004b	0.069±0.005b	0.236±0.001b
	Se2	0.127±0.009c	0.055±0.004c	0.226±0.006b
	Se3	0.062±0.003d	0.033±0.004d	0.213±0.002c
蜀紫麦1705	CK	0.156±0.005a	0.081±0.005a	0.308±0.002a
	Se1	0.139±0.004a	0.069±0.003a	0.226±0.002b
	Se2	0.110±0.008b	0.050±0.002b	0.203±0.005c
	Se3	0.052±0.004c	0.026±0.004c	0.146±0.009d
蜀紫麦1706	CK	0.124±0.005a	0.056±0.005a	0.274±0.002a
	Se1	0.100±0.003b	0.054±0.003a	0.239±0.009b
	Se2	0.080±0.004c	0.043±0.003b	0.220±0.005bc
	Se3	0.051±0.004d	0.024±0.001c	0.203±0.005c
紫糯麦168	CK	0.131±0.005a	0.065±0.005a	0.264±0.002a
	Se1	0.105±0.002b	0.058±0.002b	0.224±0.009b
	Se2	0.093±0.001c	0.038±0.004c	0.208±0.004b
	Se3	0.070±0.004d	0.018±0.002d	0.183±0.004c

表4 叶面施Se对小麦叶亚细胞中Cd含量（以鲜质量计）的影响

Table 4 Effects of foliar Se application on subcellular distribution of Cd concentration(calculated by fresh weight) in the leaves of wheat

单位：mg·kg^{-1}

品种 Variety	处理 Treatment	细胞壁 Cell wall	细胞器 Organelle	可溶性组分 Soluble fraction
蜀紫麦1702	CK	0.069±0.005a	0.044±0.005a	0.165±0.002a
	Se1	0.049±0.004b	0.025±0.002b	0.149±0.005a
	Se2	0.043±0.004b	0.021±0.001b	0.123±0.003ab
	Se3	0.034±0.001c	0.011±0.001c	0.100±0.007b
蜀紫麦1705	CK	0.060±0.005a	0.036±0.005a	0.145±0.002a
	Se1	0.048±0.005b	0.028±0.002b	0.123±0.003b
	Se2	0.038±0.004bc	0.020±0.002c	0.106±0.003c
	Se3	0.028±0.001c	0.009±0.002d	0.089±0.004d
蜀紫麦1706	CK	0.048±0.005a	0.041±0.005a	0.129±0.002a
	Se1	0.040±0.004b	0.030±0.046b	0.106±0.052b
	Se2	0.033±0.005c	0.018±0.005c	0.089±0.039c
	Se3	0.024±0.009d	0.009±0.037d	0.070±0.039d
紫糯麦168	CK	0.044±0.005a	0.036±0.005a	0.124±0.002a
	Se1	0.035±0.003ab	0.030±0.001b	0.095±0.004b
	Se2	0.028±0.002b	0.020±0.001c	0.070±0.004c
	Se3	0.016±0.002c	0.010±0.002d	0.053±0.004d

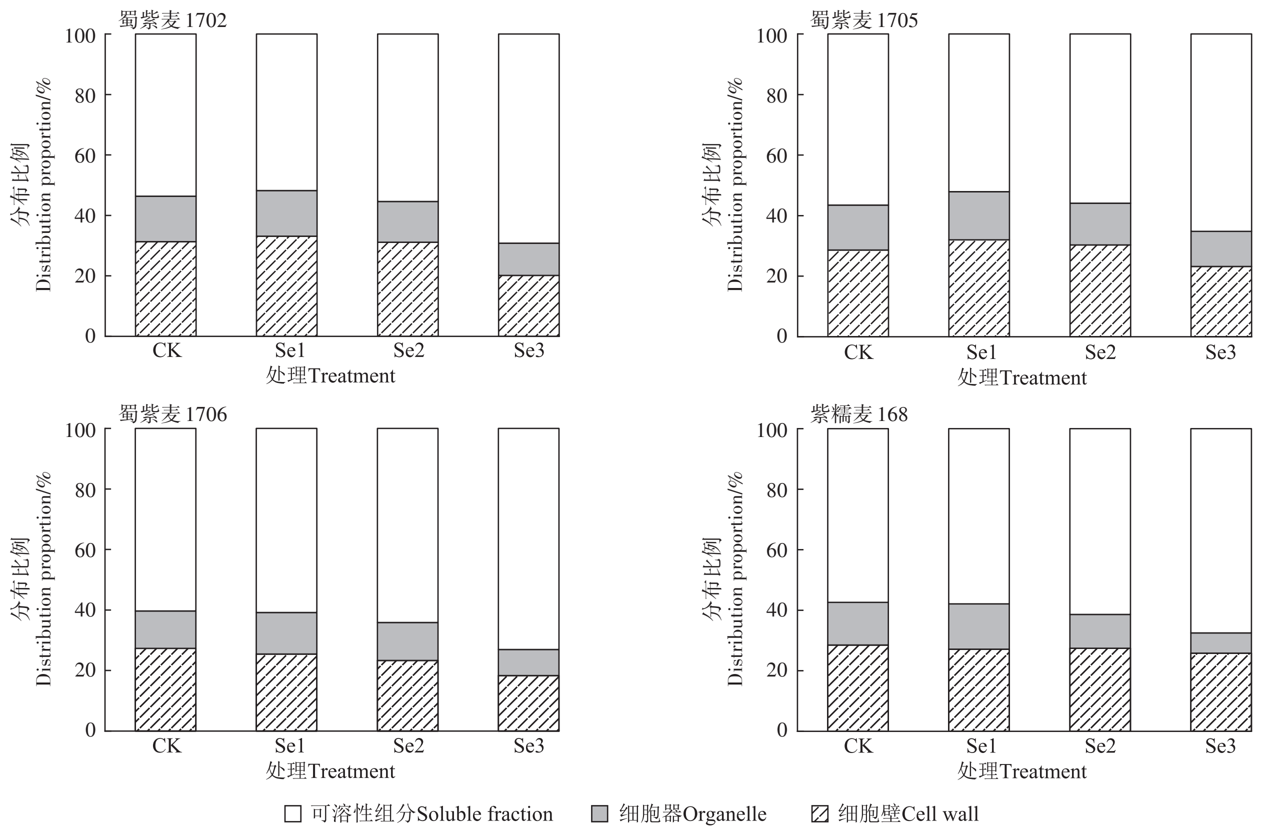


图3 叶面施Se对小麦根亚细胞中Cd分布比例的影响

Figure 3 Effects of foliar Se application on proportion of subcellular distribution of Cd in the roots of wheat

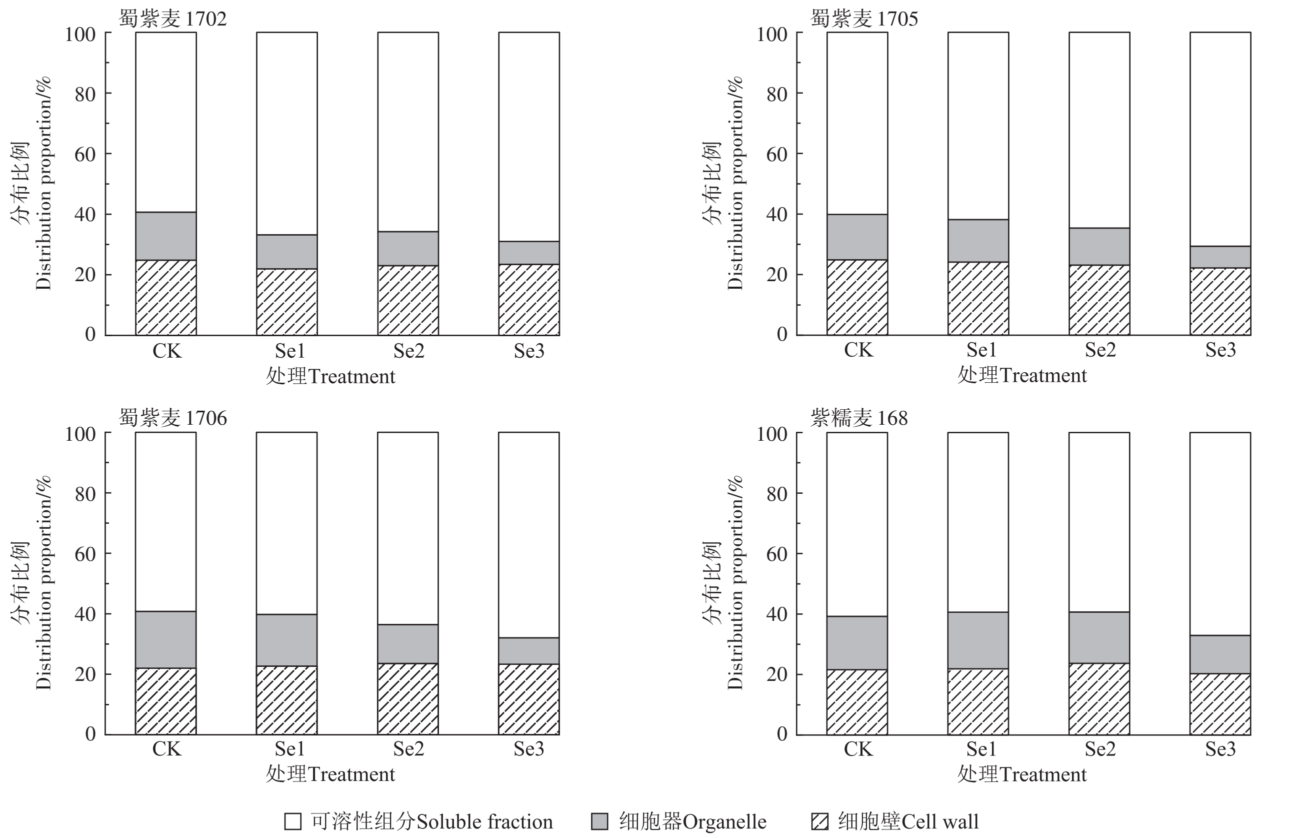


图4 叶面施Se对小麦叶亚细胞中Cd分布比例的影响

Figure 4 Effects of foliar Se application on proportion of subcellular distribution of Cd in the leaves of wheat

等[20]对苏徐2号小麦的研究发现，成熟期小麦植株中不同器官Cd含量顺序为根>叶片>茎>颖壳>果实。本试验在3.5 mg·kg^{-1} Cd胁迫环境下，蜀紫麦1702、蜀紫麦1705和蜀紫麦1706根部Cd富集最多，其次是叶部，而紫糯麦168叶部Cd含量大于根部（图1），这与任超等[21]在土壤Cd为4 mg·kg^{-1}水平下对小麦的研究结果相似。这可能是由于不同小麦品种存在基因型差异，从而导致品种间Cd积累特征的不同[22]。Wu等[23]发现，经Na_2SeO_3溶液喷施后，小麦各个器官的Cd含量均显著降低。Xia等[24]的盆栽和田间试验结果同样表明，叶面施Se可显著降低小麦灌浆期籽粒中Cd的含量。屈婵娟等[25]的研究发现，施Se可降低油菜根、茎、叶中Cd的含量。本研究结果与以上研究大致相同，Na_2SeO_3浓度在0.2~0.8 mmol·L^{-1}时，小麦各器官Cd的含量随Na_2SeO_3浓度增加呈降低趋势，其中籽粒Cd含量下降最高，达63%（图1）。在对水稻的研究中发现，Se和Cd存在明显的拮抗作用，二者可形成难溶性复合物，从而减少植物根部对Cd的吸收[26]。卞威乐斯等[27]的研究发现，施Se不仅可以降低植物对Cd的吸收，还可以降低已吸收的Cd的活性。此外，外源Se可抑制Cd胁迫下植物根部Cd吸收基因的表达，从而减少对Cd的吸收[28]。本研究中，喷施Se后，各器官Cd富集系数相应降低，表明Cd在各器官中的积累能力受到抑制。籽粒Cd含量与根（图5a）、茎（图5b）、叶（图5c）Cd含量存在正相关关系（P<0.05），叶面喷施Se减少了小麦根部对Cd的吸收，从而减少了Cd向地上部转运，因此籽粒中Cd的积累量相应降低。

本研究探讨了4种小麦不同器官间Cd的转运特征，经Na_2SeO_3溶液喷施后，4种小麦的$TF_{(茎-籽粒)}$和$TF_{(叶-籽粒)}$均显著下降（P<0.05），然而，蜀紫麦1702在Se1处理后$TF_{(根-茎)}$比其他3种小麦显著降低（表2），这是该品种籽粒Cd含量大幅下降的原因。表明喷施Se后各品种小麦转运特征存在差异，从而导致各品种小麦籽粒中Cd含量降低程度不同。进一步分析发现，4种小麦经Se处理后$TF_{(茎-籽粒)}$和$TF_{(叶-籽粒)}$下降分别达到22%~46%和34%~61%（表2），小麦籽粒Cd含量与$TF_{(茎-籽粒)}$（图6c）和$TF_{(叶-籽粒)}$（图6d）存在显著的正相关关系，表明叶面施Se主要是通过抑制Cd从茎到籽粒和叶到籽粒的运输来降低籽粒Cd的积累量。

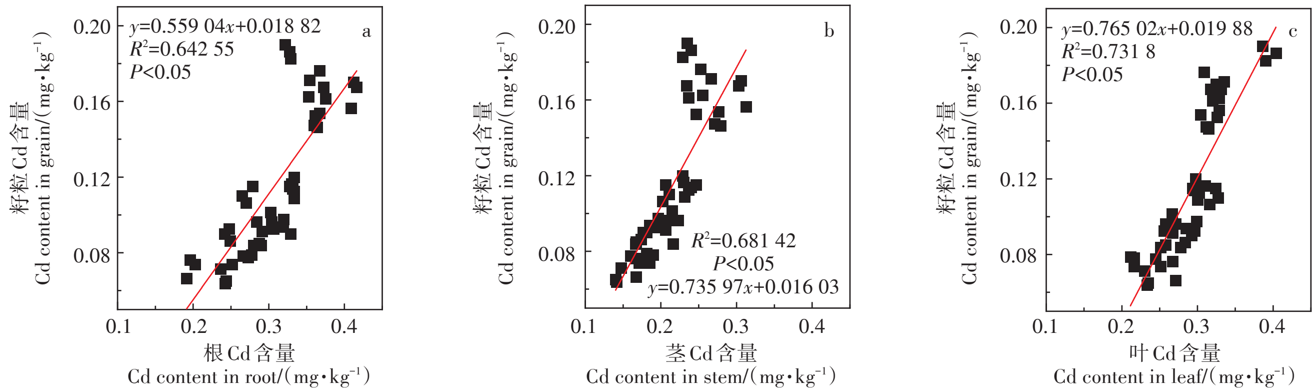


图5 籽粒与其他各器官Cd含量的相关性分析

Figure 5 Relationships of Cd content between grain and other organs

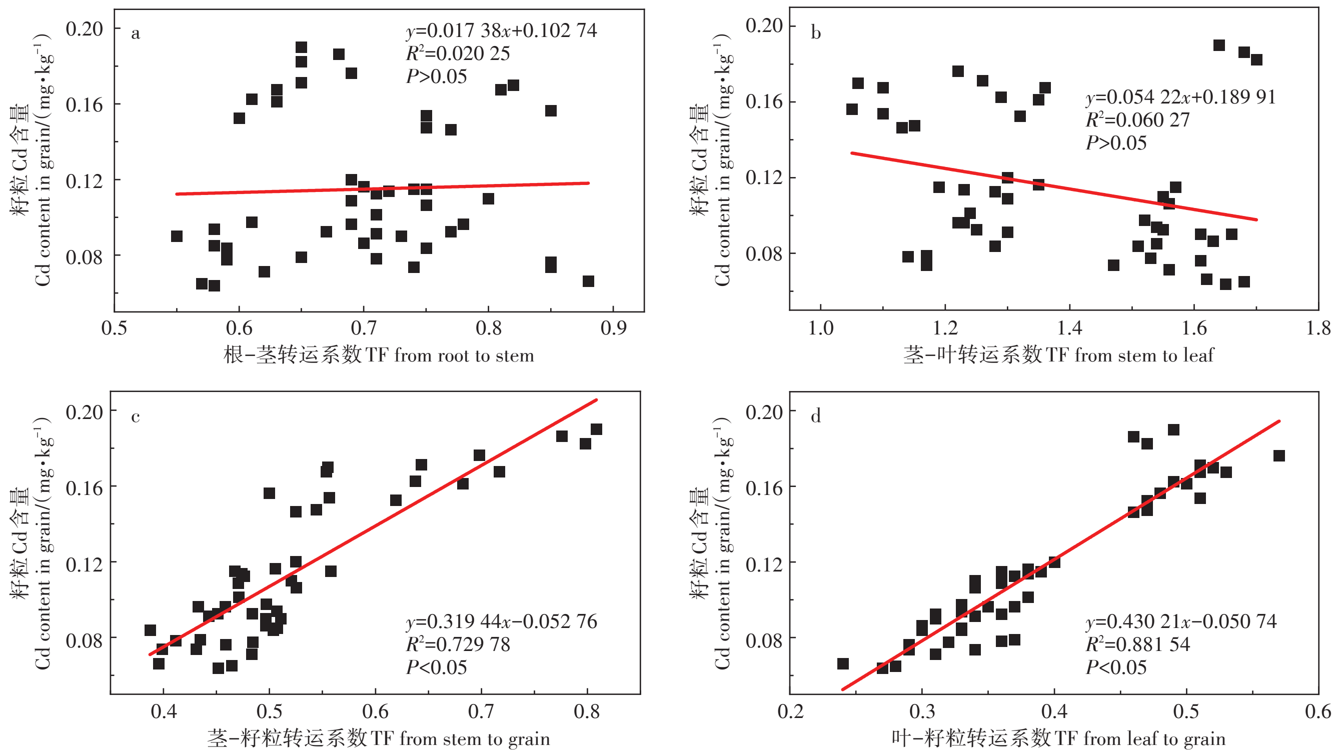
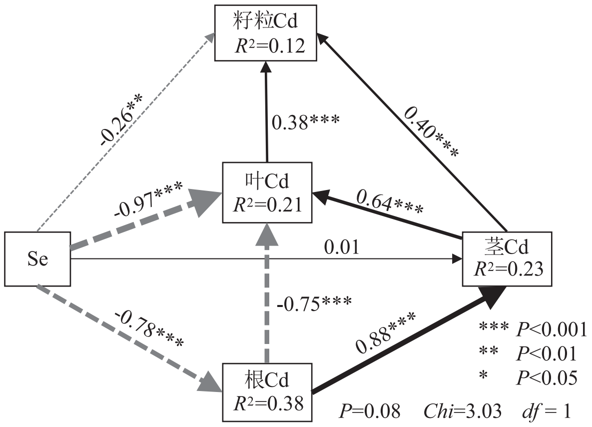


图6 籽粒Cd含量与小麦Cd转运系数的相关性分析

Figure 6 Relationships between grain Cd content and Cd transport coefficient in wheat

Jiang等[29]在对水稻的研究中发现，叶面施Se可减少Cd由茎、叶向穗部的转运，使糙米中Cd含量降低了40.36%。叶面可通过气孔和表皮亲水小孔直接吸收养分[30]，叶面喷施可使更多的Se元素进入小麦茎、叶组织。Na_2SeO_3与茎、叶组织中的Cd相结合形成难溶的$CdSeO_3$，改变细胞膜对Cd的通透性[31]，从而抑制Cd由茎、叶向籽粒转运。

基于Se浓度和小麦各器官中Cd含量之间的影响关系生成的结构方程模型图（图7），进一步表明了叶面施Se通过茎、叶对籽粒Cd含量产生影响的路径。该模型解释了小麦籽粒Cd含量方差的12%。Se对小麦根、叶Cd含量有显著的、直接的负效应（$P<0.001$），其中，对叶的影响强度最大，为-0.97；茎、叶Cd含量对籽粒Cd含量有显著的、直接的正效应（$P<0.001$），影响强度分别为0.40和0.38。Gao等[17]在对水稻的研究中也发现茎、叶中Cd含量对籽粒Cd含量有显著影响。上述结果表明，叶面施Se可通过影响小麦叶Cd含量来影响籽粒Cd含量，也可通过抑制根



与箭头相邻的数字是标准化的路径系数,指示相关性的大小。实线箭头和虚线箭头分别表示正关系和负关系。箭头宽度与关系的强度成正比。R^2表示变量所解释的方差比例。P、Chi、df表示模型的拟合优度统计数据。

Numbers adjacent to arrows are standardized path coefficient, indicative of the magnitude of the correlation. Continuous and dashed arrows indicate positive and negative relationships, respectively. Arrow width is proportional to the strength of the relationship. R^2 represents the proportion of variance explained by the variable. P, Chi and df represent goodness-of-fit statistics for the model.

图7 叶面施Se对小麦Cd含量的影响路径结构方程模型图

Figure 7 Structural equation model for the path of effects of foliar Se application on Cd content in wheat

对Cd的吸收,进而改变茎、叶Cd含量,最终影响籽粒对Cd的积累。

Cd在亚细胞水平的分布特征能深入揭示Se对植物吸收和转运Cd的影响机制[32]。本研究发现Cd在小麦根、叶亚细胞中均主要分布于可溶性组分,其次是细胞壁,细胞器内含量最低,叶面喷施Se后,增加了Cd在可溶性组分中的比例。然而,李虹颖等[33]的研究表明,早籼788水稻根、茎、叶亚细胞中细胞壁组分Cd含量最高,且随施Se浓度升高呈上升趋势。由此可见,不同植物中Cd的亚细胞分布模式以及Se对其分布的影响存在明显差异。相关研究表明,植物会对进入细胞内的Cd通过区室化积累于液泡或固定在细胞壁,或形成Cd盐沉淀以及通过螯合方式来减轻Cd胁迫对植物的伤害[34]。大部分Cd会与细胞中的植物螯合肽(PCs)形成稳定的PC-Cd螯合物,该螯合物转运至液泡中,以减少Cd在细胞间的流动。Se能促进谷胱甘肽(GSH)系统对PCs的合成以及相关酶的活性[35],PCs的增多又直接影响到液泡对Cd的分隔容量(VSC)大小[36],进而增强Cd在液泡中的滞留作用[37]。本试验中,喷施Se后小麦根、叶亚细胞中的Cd更倾向积累于可溶性组分中。这与张雯等[14]对水稻的研究结果相似。说明本研究中Na_2SeO_3的施用促进了紫色小麦根、叶细胞中的Cd被区室化于液泡。Lux等[38]的研究发现,Cd主要通过质外体在小麦根、茎、叶、籽粒间运输。随着Na_2SeO_3的浓度增大,Cd在可溶性组分中的比例相应增大,大量Cd被阻隔于液泡中,减少了其在质外体中的流动转移,最终减少了Cd向地上部的转运,尤其是减少了由茎向籽粒和叶向籽粒的转运。这说明Cd的区室化是减少Cd向籽粒转运的一个重要因素。

4 结论

叶面喷施Na_2SeO_3能显著降低紫色小麦各器官Cd的含量和富集系数,同时提高Cd在小麦根系中的分布占比,降低在籽粒中的分布占比。紫色小麦根、叶亚细胞中Cd的分布特征相似,含量顺序为可溶性组分>细胞壁>细胞器。叶面喷施Se能降低小麦亚细胞各组分的Cd含量,并促进细胞中Cd区室化分布于可溶性组分,有效阻控Cd从茎到籽粒和叶到籽粒的转运,这是Se减少籽粒Cd积累量的主要原因之一。

参考文献:

[1] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9):1689-1692. CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the *Report on the national general survey of soil contamination*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1689-1692.

[2] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20(3):514-523. ZHANG J B, HUANG W N. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3):514-523.

[3] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. 环境科学, 2019, 40(6):2877-2884. LIU Y Z, XIAO T F, XIONG Y, et al. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6):2877-2884.

[4] 陈辰, 朱园辰, 喇乐鹏, 等. 典型黑土环境下的高、低镉积累白菜品种筛选及耐性比较[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3):462-472. CHEN C, ZHU Y C, LA Y P, et al. Screening and tolerance comparison of high and low cadmium accumulating cabbage cultivars in a typical black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3):462-472.

[5] 王天抗, 李懿星, 宋书锋, 等. 水稻籽粒镉低积累资源挖掘及其新材料创制[J]. 杂交水稻, 2021, 36(1):68-74. WANG T K, LI Y X, SONG S F, et al. Excavation of rice resources with low cadmium accumulation in grains and development of new materials[J]. *Hybrid Rice*, 2021, 36(1):68-74.

[6] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉

的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9):3930-3939. JI X H, LIANG Y C, LU Y H, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice grow in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3930-3939.

[7] 董如茵, 徐应明, 王林, 等. 土施和喷施锌肥对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8):2589-2596. DONG R Y, XU Y M, WANG L, et al. Effects of soil application and foliar spray of zinc fertilizer on cadmium uptake in a pakchoi cultivar with low cadmium accumulation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8):2589-2596.

[8] 王芳婷, 陈植华, 包科, 等. pH值对海陆交互相土壤镉纵向迁移转化的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1):335-341. WANG F T, CHEN Z H, BAO K, et al. Effects of pH on vertical migration of cadmium in the sea land interaction zone[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1):335-341.

[9] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):428-436. YI Y K, ZHOU Z B, CHEN G H. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):428-436.

[10] 杜海萌, 韦还和, 余清源, 等. 水稻叶面肥研究的应用进展与展望[J]. 作物杂志, 2022(3):33-38. DU H M, WEI H H, YU Q Y, et al. Application progress and prospect of rice foliar fertilizer[J]. *Crops*, 2022(3):33-38.

[11] 秦晓明, 聂兆君, 刘红恩, 等. 施硒对冬小麦镉吸收、迁移及分配的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(6):898-905. QIN X M, NIE Z J, LIU H E, et al. Effect of selenium application on cadmium uptake, translocation and distribution in winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(6):898-905.

[12] 马俊桃, 周文, 李静浩, 等. 外源硒调控植物重金属胁迫机制的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(6):27-35. MA J T, ZHOU W, LI J H, et al. Research progress on the regulation mechanism of exogenous selenium on heavy metal stress in plants[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(6):27-35.

[13] YU Y, FU P, HUANG 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.

[14] 张雯, 林匡飞, 周健, 等. 不同硫浓度下叶面施硒对水稻幼苗镉的亚细胞分布及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):844-852. ZHANG W, LIN K F, ZHOU J, et al. Effects of selenium foliar spray on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in rice seedlings in different sulfur concentrations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):844-852.

[15] 庞晓辰, 王辉, 吴泽嬴, 等. 硒对水稻镉毒性的影响及其机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1679-1685. PANG X C, WANG H, WU Z Y, et al. Alleviation by selenium of cadmium toxicity to rice and its mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1679-1685.

[16] 王艳胜. 紫色小麦和普通小麦的农艺性状及功能成分测定[D]. 晋中:山西农业大学, 2019. WANG Y S. Determination of agronomic characters and functional components of purple and common wheat[D]. Jinzhong:Shanxi Agricultural University, 2019.

[17] GAO M, ZHOU J, LIU H, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632:1100-1108.

[18] JIANG Y, HAN J H, XUE W X, et al. Overexpression of SmZIP plays important roles in Cd accumulation and translocation, subcellular distribution, and chemical forms in transgenic tobacco under Cd stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 214:112097.

[19] 刘畅, 徐应明, 黄青青, 等. 不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异[J]. 环境科学, 2022, 43(3):1596-1605. LIU C, XU Y M, HUANG Q Q, et al. Variations in cadmium accumulation and transport and ionomic traits among different winter wheat varieties[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3):1596-1605.

[20] 肖昕, 冯启言, 季丽英. 重金属Cd Cu Zn在小麦中富集特征的实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5):1133-1137. XIAO X, FENG Q Y, JI L Y. Enrichment character of heavy metals Cd, Cu and Zn in wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1133-1137.

[21] 任超, 任彧仲, 王浩, 等. 镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性[J]. 环境科学, 2022, 43(3):1606-1619. REN C, REN Y Z, WANG H, et al. Cadmium accumulation characteristics of different wheat varieties under cadmium stress[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3):1606-1619.

[22] 黄其颖. 不同基因型小麦对土壤镉污染的反应及竹炭对小麦镉积累的影响[D]. 杭州:浙江农林大学, 2015. HUANG Q Y. Responses of different genotypes of wheat to soil cadmium pollution and effect of bamboo charcoal on cadmium accumulation in wheat[D]. Hangzhou:Zhejiang A&F University, 2015.

[23] WU C, DUN Y, ZHANG Z J, et al. Foliar application of selenium and zinc to alleviate wheat (*Triticum aestivum* L.) cadmium toxicity and uptake from cadmium-contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 190:110091.

[24] XIA S, WANG J, CHEN Z, et al. Foliar application of several reagents reduces Cd concentration in wheat grains[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(12):17150-17161.

[25] 屈婵娟, 吴志超, 赵小虎, 等. 硒对镉胁迫下不同基因型油菜镉积累、光合特性及抗氧化活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(5):490-497. QU C J, WU Z C, ZHAO X H, et al. Effects of selenium(Se) on cadmium(Cd) accumulation, photosynthetic characteristics and activities of antioxidant enzymes in different genotypes of rape under cadmium(Cd) stress[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(5):490-497.

[26] 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. LIU C M, LUO S G, LIU Y Y. Effects of Se on Cd content and distribution in rice plant under Cd stress in cold climate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1):190-199.

[27] 卞威乐斯, 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. BIAN

W L S, YAN J P, CUI L, et al. The effect of selenium on cadmium accumulation, chemical forms and the resistance of peanuts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1094-1101.

[28] HUANG H, LI M, RIZWAN M, et al. Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401:123393.

[29] JIANG S C, DU B, WU Q X, et al. Selenium decreases the cadmium content in brown rice:foliar Se application to plants grown in Cd-contaminated soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(1):1033-1043.

[30] 李燕婷, 李秀英, 肖艳, 等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1):162-172. LI Y T, LI X Y, XIAO Y, et al. Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1):162-172.

[31] 邓思涵, 龙九妹, 陈聪颖, 等. 叶面肥阻控水稻富集镉的研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(1):1-5. DENG S H, LONG J M, CHEN C Y, et al. Foliar fertilizers mitigate cadmium accumulation in rice:a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(1):1-5.

[32] 严勋, 唐杰, 李冰, 等. 不同水稻品种对镉积累的差异及其与镉亚细胞分布的关系[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(5):244-256. YAN X, TANG J, LI B, et al. Cadmium accumulation in different rice varieties and its relationship with subcellular distribution of cadmium[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, 14(5):244-256.

[33] 李虹颖, 唐杉, 王允青, 等. 硒对水稻镉含量及其在亚细胞中的分布的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2):320-326. LI H Y, TANG S, WANG Y Q, et al. Mechanism of Se on Cd content and subcell distribution in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):320-326.

[34] 蔡保松, 张国平. 大、小麦对镉的吸收、运输及在籽粒中的积累[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(3):82-86. CAI B S, ZHANG G P. Cadmium absorption and mobilization in barley and wheat plants and its accumulation in grains[J]. *Journal of Triticeae Crop*, 2002, 22(3):82-86.

[35] 向焱赟, 伍湘, 张小毅, 等. 叶面阻控剂对水稻吸收和转运镉的影响研究进展[J]. 作物研究, 2020, 34(3):290-296. XIANG Y Y, WU X, ZHANG X Y, et al. Advances in the study of the influence of foliar control agant on absorption and transportion of cadmium in rice[J]. *Crop Research*, 2020, 34(3):290-296.

[36] PENG J S, GONG J M. Vacuolar sequestration capacity and long-distance metal transport in plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5:19.

[37] 王学华, 戴力. 作物根系镉滞留作用及其生理生化机制[J]. 中国农业科学, 2016, 49(22):4323-4341. WANG X H, DAI L. Immobilization effect and its physiology and biochemical mechanism of the cadmium in crop roots[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(22):4323-4341.

[38] LUX A, MARTINKA M, VACULIK M, et al. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1):21-37.

(责任编辑:李丹)