

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.

YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, et al. Effect of foliar application of different manganese fertilizers on cadmium accumulation and subcellular distribution in pak choi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1872-1881.

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

闫秀秀^{1,2}, 徐应明^{1,2}, 王 林^{1,2*}, 陶雪莹^{1,2}, 孙约兵^{1,2}, 梁学峰^{1,2}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业农村部产地环境污染防控重点实验室, 天津 300191)

摘要:为探明喷施锰肥对叶用油菜累积镉的调控作用, 采用盆栽试验, 研究喷施不同浓度的 MnSO_4 、 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 和 $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$ 对两种叶用油菜(Cd低积累品种华骏和普通品种寒绿)生物量以及Cd和Mn含量的影响, 并通过分析Cd在叶用油菜体内的吸收转运规律以及亚细胞分布特征揭示其作用机理。结果表明, 喷施3种形态Mn肥对Cd低积累叶用油菜地上部和根部生物量无显著影响, 喷施高浓度 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 和 $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$ 显著降低普通叶用油菜地上部生物量。喷施 MnSO_4 和 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 处理降低叶用油菜Cd含量、提高Mn含量的效果明显优于 $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$ 处理, 其中, $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}\text{Mn}$ 的 MnSO_4 和 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}\text{Mn}$ 的 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 处理降低Cd低积累叶用油菜地上部Cd含量的效果最佳, 可使其分别降低29.2%和31.0%。喷施Mn肥显著降低叶用油菜总Cd累积量, 使Cd转运系数显著升高, 叶用油菜地上部Cd含量与总Cd累积量呈极显著的相关性($P < 0.01$), 而与Cd转运系数则无显著相关性。Cd和Mn在叶用油菜地上部主要分布在细胞可溶组分中, 其次为细胞壁。喷施Mn肥后, Cd和Mn在细胞壁组分的分配比例降低, 在可溶组分的分配比例升高。总之, 喷施 $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}\text{Mn}$ 的 MnSO_4 和 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}\text{Mn}$ 的 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 可以显著降低低积累叶用油菜地上部Cd含量, 提高其Mn含量, 同时不影响叶用油菜生长, 是保障Cd低积累叶用油菜安全优质生产的较好措施。

关键词: 镉; 叶用油菜; 锰; 喷施; 低积累品种; 亚细胞分布

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)08-1872-10 doi:10.11654/jaes.2019-0577

Effect of foliar application of different manganese fertilizers on cadmium accumulation and subcellular distribution in pak choi

YAN Xiu-xiu^{1,2}, XU Ying-ming^{1,2}, WANG Lin^{1,2*}, TAO Xue-ying^{1,2}, SUN Yue-bing^{1,2}, LIANG Xue-feng^{1,2}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to test the effect of foliar application of manganese (Mn) fertilizers on cadmium (Cd) accumulation in pak choi (*Brassica chinensis*), three different forms of Mn, MnSO_4 , $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ and $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$, were sprayed among two pak choi cultivars (Huajun and Hanlv) in a pot experiment. We examined the biomass, Cd and Mn concentrations, Cd uptake and transport, and Cd and Mn subcellular distribution in pak choi. The results show that foliar application of Mn had no significant effect on the shoot and root biomasses of the low Cd-accumulating cultivar (Huajun); however, the foliar application of high dosages of $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ and $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$ significantly reduced shoot biomass in the common cultivar of pak choi (Hanlv). Foliar application with MnSO_4 and $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ resulted in greater alleviation of shoot Cd concentrations and a more notable enhancement of shoot Mn concentrations in pak choi than by spraying with $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$. Shoot Cd concentrations in Huajun were the lowest under foliar feeding with $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}\text{Mn}$ (MnSO_4) and $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}\text{Mn}$ [$\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$],

收稿日期: 2019-05-24 录用日期: 2019-07-16

作者简介: 闫秀秀(1993—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 从事农田重金属污染修复研究。E-mail: yxiuxiu2019@163.com

*通信作者: 王 林 E-mail: wanglin2017@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800203); 国家自然科学基金项目(41571322); 天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJC34000)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2018YFD0800203); The National Natural Science Foundation of China (41571322); The Key Program of the Natural Science Foundation of Tianjin (18JCZDJC34000)

which were decreased by 29.2% and 31.0%, respectively. Foliar Mn application reduced the total Cd accumulation significantly and increased the Cd transfer factor of pak choi markedly. The shoot Cd concentration of pak choi was positively correlated ($P < 0.01$) with total Cd accumulation; however, it was not significantly correlated with the Cd transfer factor. In shoots of pak choi, the majority of Cd and Mn were associated with the soluble fraction, followed by the cell wall fraction. After foliar Mn application, the proportions of Cd and Mn in the cell wall fraction decreased and those in the soluble fraction increased. In summary, foliar feeding with $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Mn}(\text{MnSO}_4)$ and $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Mn}[\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2]$ significantly reduced Cd concentrations and increased Mn concentrations in shoots, and it did not affect the growth of Huajun, which is suitable for the safe and high-quality production of pak choi.

Keywords: cadmium; *Brassica chinensis*; manganese; foliar spraying; low cadmium accumulating cultivar; subcellular distribution

镉(Cd)是对人体健康威胁最大的重金属元素之一,而蔬菜是人体膳食Cd摄入的主要来源之一^[1]。近年来的调查显示,我国部分城市郊区蔬菜Cd含量超标率较高,严重影响了农业安全生产^[2-3],因此,有必要采取有效措施切实降低蔬菜Cd累积。近年来,筛选和应用具有低量积累Cd特征的作物品种即Cd低积累品种,已成为安全利用Cd污染土壤的有效方法之一^[1,4]。考虑到作物基因型和土壤环境对作物Cd累积均有显著影响^[5],在单独使用低积累品种仍无法满足安全生产要求时,则有必要采取调控措施,进一步减少作物Cd吸收。

锰(Mn)是植物必需的微量元素之一,由于植物吸收转运 Mn^{2+} 和 Cd^{2+} 会使用相同的载体蛋白如NRAMP和ZIP等,因此二者在植物体内的累积常表现出拮抗作用^[6-7]。基于这种拮抗作用,许多研究通过施用Mn肥来降低作物Cd累积。例如,Huang等^[8]研究发现,喷施或土施 $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$ 均能显著降低两种水稻的稻米Cd含量,其中土施处理降低效果更好,最大降低率可达78.6%;而土施 MnSO_4 对两种水稻籽粒Cd含量有不同影响,其中Jinzao47没有显著变化,而Zhongjiacao32则显著升高。尹晓辉等^[9]研究表明,施用螯合锰、碳酸锰以及硫酸锰对水稻糙米Cd含量有不同降低效果,基施和喷施联合措施的抑制效果明显优于单一措施。综合上述研究可知,施用Mn肥调控作物Cd累积的效果与施肥种类、方法以及作物品种等都有密切关系。因此,要使施用Mn肥成为调控Cd低积累品种安全生产的有效方法,有必要根据具体品种开展Mn肥施用方法研究。

近年来,本团队通过盆栽和小区试验从35个叶用油菜(*Brassica chinensis* L,以下简称油菜)品种中筛选了2个Cd低积累品种,并初步揭示了其低量吸收Cd的机理^[10]。在此基础上,本研究选择Cd低积累油菜和普通油菜各1种,通过盆栽试验,研究叶面喷

施不同浓度的 MnSO_4 、 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 以及 $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$ 对油菜生长和Cd、Mn含量的影响,确定降低油菜Cd含量的最佳Mn肥施用方法,同时通过分析Cd在油菜体内吸收转运规律以及亚细胞分布特征来探讨其作用机理,以期为喷施Mn肥降低油菜Cd含量提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

供试土壤取自河南济源市某Cd污染农田,土壤类型为潮土,其基本理化性质如下:pH值7.65,阳离子交换量 $13.38 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $7.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $81.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $23.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $93.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd、Mn总量分别为 $2.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $443.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd、Mn有效态含量(DTPA法浸提)分别为 $1.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $15.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试油菜品种为前期研究筛选的Cd低积累品种华骏和普通品种寒绿^[10],油菜种子由天津市农业科学院提供。供试Mn肥包括硫酸锰($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、乙酸锰 $[\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ 以及乙二胺四乙酸二钠锰($\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$),其中前两者为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司,后者纯度高于95%,购自TCI公司。

1.2 实验处理与方法

本实验采用三因素完全组合设计。第一个因素为油菜品种,设置2种油菜。第二个因素为Mn肥形态,设置3种Mn肥。第三个因素为喷施Mn肥的浓度,每种Mn肥分别设置3个水平,其中,硫酸锰喷施浓度为: 0.2 、 0.4 、 $0.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (以Mn计,下同),分别记作:Mn-S1、Mn-S2、Mn-S3;乙酸锰喷施浓度为: 0.1 、 0.2 、 $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,分别记作:Mn-A1、Mn-A2、Mn-A3;螯合锰($\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$)浓度为: 0.1 、 0.2 、 $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,分别记作:Mn-E1、Mn-E2、Mn-E3;另外设置对照处理

(CK), 喷施去离子水。本实验共有20个处理, 每个处理设置3次重复。

盆栽实验于2018年5—7月在玻璃温室内进行, 室内温度为20~30℃, 自然光照, 盆栽器皿按随机区组排列。供试土壤风干后过5 mm筛, 然后装入塑料盆中(直径22 cm, 高13.5 cm), 每盆装土2.0 kg, 同时施入分析纯CO(NH₂)₂ (N 150 mg·kg⁻¹)和K₂HPO₄ (P₂O₅ 206 mg·kg⁻¹, K₂O 277 mg·kg⁻¹)作为底肥。拌土后每盆加入500 mL去离子水, 密封平衡7 d, 然后播种, 待幼苗长至4片真叶时每盆间苗至5株。在油菜生长过程中每日以去离子水浇灌, 控制土壤含水量为田间持水量的70%左右。在油菜撒播后第30、35、40 d进行喷施处理, 采用微型喷雾瓶, 每盆每次喷施10 mL溶液。油菜播种45 d后收获。

1.3 样品处理与分析

收获的油菜样品分为地上部和根部, 样品使用去离子水和超纯水洗净, 吸干水分, 称取鲜质量, 部分地上部样品经液氮冷冻后储存在-80℃冰箱备用。剩余地上部和全部根部样品在95℃杀青30 min, 70℃烘干至恒质量, 称量干质量, 粉碎混匀, 加入浓HNO₃ (优级纯), 在电热板上进行消解, 80℃加热1.5 h, 120℃加热1.5 h, 150℃加热3 h, 180℃赶酸。消解后样品的Cd和Mn含量使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, ICPQc, Thermo Fisher Scientific)测定^[11], 采用美国国家标准与技术研究院提供的菠菜叶标样SRM1570a作为油菜元素含量分析的质控样品, Cd和Mn的回收率均在95%~105%范围内。土壤基本理化性质按照土壤农化常规分析方法测定^[12]。

采用离心法分离地上部样品的亚细胞组分^[13]。准确称取4.00 g冷冻保存的地上部样品置于预冷的研钵中, 加入40 mL预冷的提取液(蔗糖250 mmol·L⁻¹, Tris-HCl 50 mmol·L⁻¹, DTT 1 mmol·L⁻¹, pH 7.5), 研磨匀浆, 然后用80 μm孔径的尼龙筛网过滤, 并用提取液冲洗两次, 所得滤渣即为细胞壁组分。所得滤液在20 000 r·min⁻¹下离心45 min, 上清液和沉淀分别为可溶组分和细胞器组分。以上操作均在4℃下进行。将3个亚细胞组分完全转移至消解管中, 在电热板上蒸干, 然后采用浓HNO₃消解, ICP-MS测定Cd和Mn含量。

1.4 数据分析及统计

总Cd累积量(μg·株⁻¹)=植物地上部Cd含量×植物地上部干质量+植物根部Cd含量×植物根部干质量。该指标表征植物根部对Cd的吸收能力^[14]。

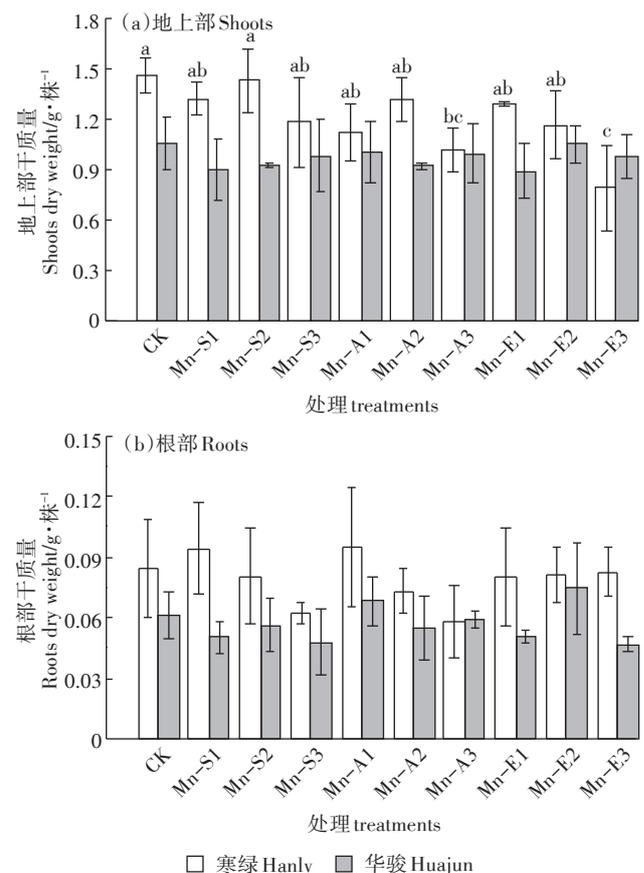
Cd转运系数=植物地上部Cd含量/植物地下部Cd含量。该指标反映植物由根部向地上部转运Cd的能力^[15]。

实验数据采用SPSS 20软件进行统计分析。采用单因素方差分析和Duncan's新复极差法分析同一品种不同处理间的差异显著性, 采用Pearson相关系数法分析不同参数间的相关性。

2 结果与分析

2.1 喷施Mn肥对油菜生物量的影响

如图1(a)所示, 不同Mn肥处理对油菜地上部生物量的影响与供试品种有关。就普通品种寒绿来说, 与CK处理相比, Mn-A3和Mn-E3处理下油菜地上部生物量显著降低($P<0.05$), 降幅分别为30.4%和45.8%。对于低积累品种华骏, 喷施Mn肥对其地上部生物量无显著影响。由图1(b)可知, 喷施Mn肥对两种油菜根部生物量均无显著影响。总体来看, 寒绿



不同小写字母表示同一品种内不同处理间差异显著($P<0.05$)
The different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level in the same cultivar

图1 不同Mn肥处理下油菜干生物量

Figure 1 Dry biomass of pak choi under different Mn treatments

油菜对喷施 Mn 肥较为敏感,喷施高浓度 Mn 肥会抑制其地上部生长。

2.2 喷施 Mn 肥对油菜体内 Cd 含量的影响

由图 2(a)可知,喷施 Mn 肥对两种油菜地上部 Cd 含量的影响不同。对于寒绿,喷施 3 种 Mn 肥均使其地上部 Cd 含量降低。其中,在喷施硫酸锰处理组, Mn-S1 和 Mn-S2 处理下油菜地上部 Cd 含量显著降低,与 CK 相比,降幅分别为 40.0% 和 38.0%;在喷施乙酸锰处理组,3 个浓度的处理均使地上部 Cd 含量显著降低,降幅范围为 30.0%~39.0%;在喷施螯合锰处理组, Mn-E2 和 Mn-E3 处理下油菜 Cd 含量显著降低,降幅分别为 16.0% 和 38.0%。对于华骏,在喷施硫酸锰处理组, Mn-S2 和 Mn-S3 处理使其地上部 Cd 含量显著降低,与 CK 相比,降幅分别为 29.2% 和

20.0%;在喷施乙酸锰处理组,只有 Mn-A2 处理降低效果显著,降幅为 31.0%;在喷施螯合锰处理组, Mn-E2 和 Mn-E3 处理下油菜 Cd 含量呈现升高趋势。总之,从作用显著性和降幅来看,喷施 Mn 肥对寒绿地上部 Cd 含量的降低效果优于华骏。

由图 2(b)知,喷施不同形态的 Mn 肥对两种油菜根部 Cd 含量均有显著影响。对于寒绿,与 CK 相比,所有喷施硫酸锰和乙酸锰处理均使其根部 Cd 含量显著降低,降幅范围分别为 22.1%~56.1% 和 35.3%~46.6%;在喷施螯合锰处理组,在 Mn-E2 和 Mn-E3 处理下油菜根部 Cd 含量显著降低,降幅分别为 22.0% 和 25.0%,而 Mn-E1 处理则使 Cd 含量显著升高。对于华骏,喷施硫酸锰和乙酸锰均使其根部 Cd 含量显著降低,最大降低率分别为 48.7% 和 56.0%;在喷施螯合锰处理组, Mn-E1 和 Mn-E2 处理下根部 Cd 含量显著降低,降幅分别为 35.8% 和 30.9%。对比不同 Mn 肥处理下油菜地上部和根部 Cd 含量的变化规律可知,喷施 Mn 肥对油菜根部 Cd 含量的影响要强于地上部。

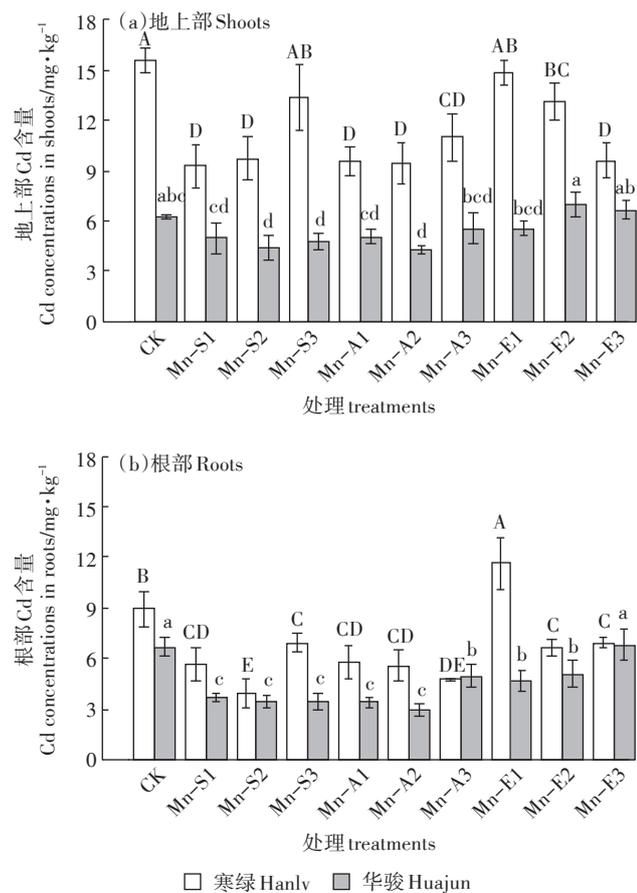
2.3 喷施 Mn 肥对油菜总 Cd 累积量和 Cd 转运系数的影响

植物地上部 Cd 含量主要受根部吸收和根部向地上部转运两个过程控制,在本研究中分别采用总 Cd 累积量和 Cd 转运系数两个指标来表征这两个过程。由图 3(a)知,对于寒绿,与 CK 相比,除 Mn-E1 外,其余 Mn 肥处理均使总 Cd 累积量显著下降,降幅范围为 15.1%~65.0%。这表明喷施 Mn 肥可以有效降低寒绿根系对 Cd 的吸收;而与 CK 相比,寒绿的 Cd 转运系数在 Mn-S2 和 Mn-A3 处理下显著提高。由图 3(b)可知,对于华骏,在 Mn-S2 和 Mn-A2 处理下总 Cd 累积量与 CK 相比显著降低,降幅分别为 32.0% 和 49.2%;华骏的 Cd 转运系数在 Mn-S1、Mn-S3、Mn-A1、Mn-A2 以及 Mn-E2 处理下显著增加。

相关性分析表明,两种油菜的地上部 Cd 含量与总 Cd 累积量都呈极显著的正相关性($P < 0.01$),相关系数分别为 0.838(寒绿)和 0.867(华骏);油菜地上部 Cd 含量与 Cd 转运系数的相关系数分别为 -0.030(寒绿)和 -0.124(华骏)($P > 0.05$),均无显著相关性。另外,对比两种油菜地上部 Cd 含量、总 Cd 累积量以及 Cd 转运系数的变化规律可知,地上部 Cd 含量与总 Cd 累积量变化趋势一致。由此可知,本研究中喷施 Mn 肥主要是通过抑制油菜根部 Cd 吸收,来降低地上部 Cd 含量。

2.4 喷施 Mn 肥对油菜体内 Mn 含量的影响

由表 1 可知,喷施不同形态的 Mn 肥可显著提高



不同小写字母表示华骏不同处理间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示寒绿不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments of Huajun ($P < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences among treatments of Hanlv ($P < 0.05$)

图 2 不同 Mn 肥处理下油菜 Cd 含量(干基)

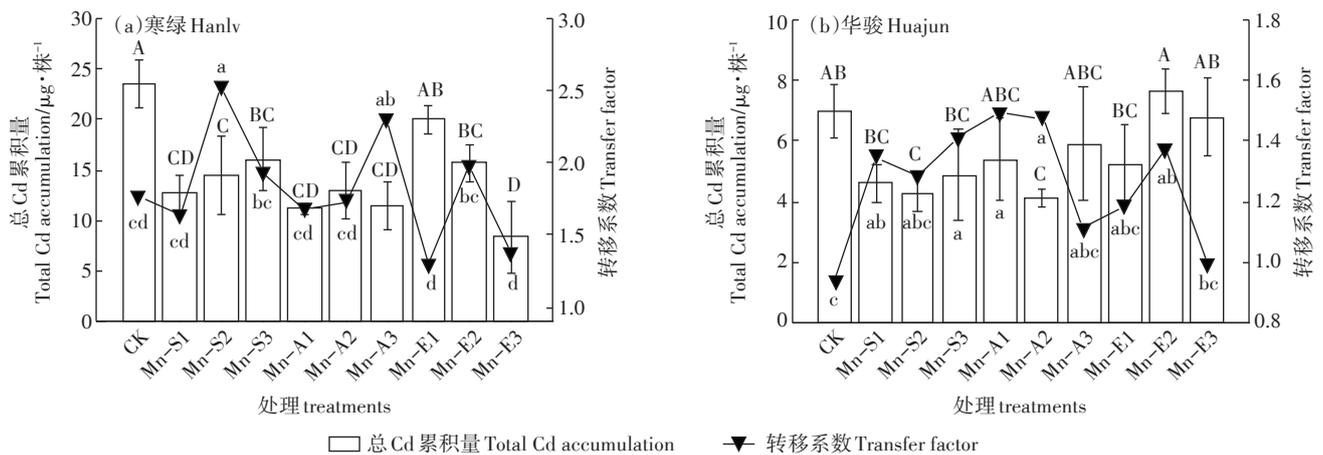
Figure 2 Cd concentrations(dry weight basis) in the shoots and roots of pak choi under different Mn treatments

油菜体内 Mn 含量。就地上部来说,对于寒绿,除了 Mn-A1、Mn-E1 和 Mn-E2 处理外,其他处理的地上部 Mn 含量均显著增加,增幅为 CK 组的 3.56~8.59 倍;对于华骏,除了喷施螯合锰处理组,其他 Mn 肥处理都使其地上部 Mn 含量显著提高,最大增幅为 CK 组的 13.27 倍。对比相同浓度 Mn 处理下两种油菜地上部 Mn 含量可知,3 种 Mn 肥对油菜地上部 Mn 含量提高效果的顺序为硫酸锰>乙酸锰>螯合锰。对于根部,与 CK 比较,在 Mn-S2、Mn-S3、Mn-A2 及 Mn-E2 处理下,寒绿根部的 Mn 含量显著提高,而华骏则在 Mn-S3、Mn-A3 以及 Mn-E3 处理下,根部 Mn 含量显著增

加。这表明喷施 Mn 肥后,油菜地上部吸收的 Mn 可以转运到根部。

2.5 喷施 Mn 肥对油菜 Cd 亚细胞分布的影响

由表 2 可知,对于寒绿,除了 Mn-S3、Mn-A3、Mn-E1 处理外,其余 Mn 肥处理的细胞壁组分 Cd 含量与 CK 相比均显著降低,降幅范围为 30.3%~83.1%;对于细胞器组分,除了 Mn-E1 处理,其余 Mn 肥处理的 Cd 含量与 CK 相比均显著降低,降幅范围为 48.6%~83.1%;对于可溶组分,在 Mn-E1 处理下,其 Cd 含量比 CK 显著升高,增幅为 90.4%,其余处理下则没有显著变化。就 Cd 的分配比例来看(图 4),在喷施硫酸锰



不同大写字母表示不同处理的总 Cd 累积量差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同处理的 Cd 转运系数差异显著 ($P < 0.05$)
Different capital letters indicate significant differences of total Cd accumulation ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences of Cd transfer factor ($P < 0.05$)

图 3 不同 Mn 肥处理下油菜总 Cd 累积量和 Cd 转运系数

Figure 3 Total Cd accumulation and Cd transfer factor of two cultivars of pak choi under different Mn treatments

表 1 不同 Mn 肥处理下两种油菜体内 Mn 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 干基)

Table 1 Mn concentrations in two cultivars of pak choi under different Mn treatments ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, dry weight basis)

喷施处理 Foliar treatments	地上部 Shoots		根部 Roots	
	寒绿 Hanlv	华骏 Huajun	寒绿 Hanlv	华骏 Huajun
CK	88.1±2.2e	89.6±6.7e	34.4±4.1d	44.7±2.5cd
Mn-S1	313.8±12.1c	388.4±44.9c	45.6±7.2cd	49.4±5.2bc
Mn-S2	583.6±54.6b	510.3±79.5b	70.5±8.8a	43.5±7.5cd
Mn-S3	756.9±162.1a	1 189.1±149.9a	55.1±4.5bc	55.6±9.5b
Mn-A1	175.8±7.9de	238±22.9d	37.7±4.1d	40.6±4.2cd
Mn-A2	282.3±45.8cd	257.9±36.2d	58.8±7.9b	39.1±3.8d
Mn-A3	502.1±62.7b	460.6±43.9bc	41.2±5.6d	67.5±6.5a
Mn-E1	104±22.2e	100.5±7.2e	45.8±5.7cd	38.5±4.2d
Mn-E2	147.2±39.8e	176.4±18.3de	70.3±6.2a	39.2±2.4d
Mn-E3	352.9±56.5c	201.3±14.3de	45.8±7.5cd	54.4±7.0b

注:表中数据为平均值±标准差($n=3$)。同一列不同小写字母表示同一品种各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Values are means±SD ($n=3$). Different lowercase letters in the same column show significant differences in the same cultivar ($P < 0.05$). The same below.

和乙酸锰处理组,细胞器组分Cd的分配比例明显降低,降幅为6.5%~11.3%,可溶组分比例则明显升高,增幅为9.0%~33.6%;在喷施螯合锰处理组,细胞壁和细胞器组分Cd的分配比例都明显降低,二者最大降幅分别为22.8%和12.4%,可溶组分比例则明显升高,最大增幅为33.6%。

对于华骏,细胞壁组分Cd含量在喷施3种Mn肥后均显著降低,降幅范围为31.3%~59.5%;喷施Mn肥对细胞器组分Cd含量没有显著影响;对于可溶组分,喷施Mn-E3处理下其Cd含量比CK显著升高,增幅为92.0%,其余处理下则没有显著变化。由图4(b)可知,对于华骏,在Mn-S2、Mn-A3以及所有螯合

表2 不同Mn肥处理下两种油菜地上部亚细胞组分中的Cd含量(mg·kg⁻¹,鲜基)

Table 2 Cd concentrations(mg·kg⁻¹, fresh weight basis) in three subcellular fractions in shoots of the tested pak choi cultivars under different Mn treatments

品种 Cultivars	处理 Treatments	组分 Fractions		
		细胞壁 Cell wall	细胞器 Organelles	可溶组分 Soluble fraction
寒绿 Hanlv	CK	0.303±0.032a	0.145±0.011a	0.355±0.028bcd
	Mn-S1	0.161±0.012def	0.050±0.005cd	0.251±0.036cd
	Mn-S2	0.163±0.024cdef	0.033±0.003cd	0.284±0.034cd
	Mn-S3	0.242±0.032abc	0.075±0.005bc	0.373±0.048bc
	Mn-A1	0.211±0.029bede	0.062±0.008bcd	0.306±0.043bcd
	Mn-A2	0.147±0.021ef	0.025±0.003cd	0.206±0.017d
	Mn-A3	0.235±0.032abcd	0.071±0.007bcd	0.349±0.044bcd
	Mn-E1	0.284±0.032ab	0.110±0.018ab	0.675±0.077a
	Mn-E2	0.104±0.018fg	0.033±0.005cd	0.434±0.051b
	Mn-E3	0.051±0.004g	0.024±0.002d	0.264±0.034cd
华骏 Huajun	CK	0.231±0.034a	0.081±0.048	0.218±0.022bc
	Mn-S1	0.143±0.014bc	0.082±0.047	0.116±0.037c
	Mn-S2	0.144±0.014bc	0.046±0.028	0.242±0.083b
	Mn-S3	0.155±0.036b	0.048±0.028	0.160±0.039bc
	Mn-A1	0.159±0.014b	0.055±0.034	0.180±0.030bc
	Mn-A2	0.148±0.035b	0.033±0.016	0.203±0.114bc
	Mn-A3	0.125±0.017bc	0.053±0.040	0.253±0.043b
	Mn-E1	0.094±0.009c	0.017±0.005	0.271±0.059b
	Mn-E2	0.131±0.052bc	0.091±0.062	0.258±0.053b
	Mn-E3	0.094±0.008c	0.028±0.003	0.419±0.093a

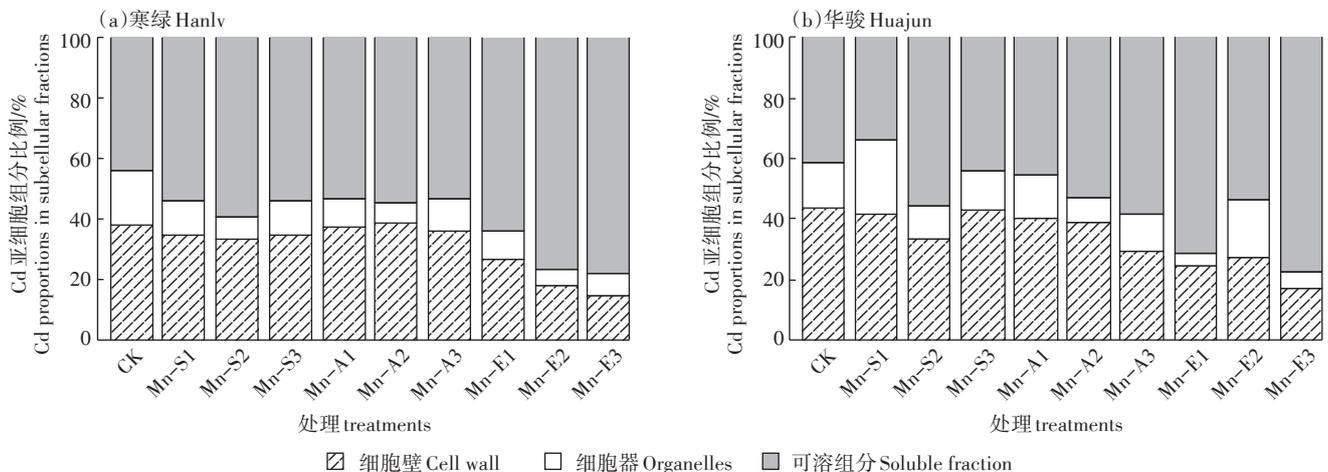


图4 不同Mn肥处理下两种油菜地上部Cd在亚细胞组分中的分配比例

Figure 4 Cd proportions in three subcellular fractions in shoots of the tested pak choi cultivars under different Mn treatments

锰处理下,细胞壁 Cd 的分配比例明显降低,降幅范围为 4.18%~26.27%,可溶组分中 Cd 的比例则明显升高,最大增幅为 33.57%。总体来说,喷施 Mn 肥后两个油菜品种地上部细胞壁组分中 Cd 含量和分配比例呈现降低趋势,而可溶组分中 Cd 的比例则呈现升高趋势。

2.6 喷施 Mn 肥对油菜 Mn 亚细胞分布的影响

两种油菜地上部 Mn 的亚细胞组分含量如表 3 所示。对于寒绿,喷施螯合锰对各亚细胞组分的 Mn 含量没有显著影响;而 Mn-S2、Mn-S3 以及 Mn-A3 处理下细胞壁和可溶组分 Mn 含量显著升高。从 Mn 的分配比例来看(图 5),喷施 Mn 肥后,细胞器组分 Mn 的

表 3 不同 Mn 肥处理下两种油菜地上部的亚细胞组分中的 Mn 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,鲜基)

Table 3 Mn concentrations($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, fresh weight basis) in three subcellular fractions in shoots of the tested pak choi cultivars under different Mn treatments

品种 Cultivars	处理 Treatments	组分 Fractions		
		细胞壁 Cell wall	细胞器 Organelles	可溶组分 Soluble fraction
寒绿 Hanlv	CK	1.79±0.22cd	0.68±0.08bcd	3.38±0.48e
	Mn-S1	3.00±0.41cd	0.74±0.08bcd	10.29±1.57cde
	Mn-S2	7.43±1.12ab	1.42±0.17bc	17.76±2.68bc
	Mn-S3	9.48±1.05a	2.65±0.34a	25.98±3.57a
	Mn-A1	2.68±0.32cd	0.50±0.04cd	5.78±0.78de
	Mn-A2	4.12±0.58c	0.89±0.06bcd	12.48±1.78cd
	Mn-A3	6.94±0.75b	1.71±0.2ab	22.69±3.21ab
	Mn-E1	1.52±0.26d	0.28±0.03d	3.90±0.45e
	Mn-E2	1.17±0.17d	0.32±0.04d	5.42±0.65de
	Mn-E3	3.44±0.43cd	0.58±0.07cd	8.74±0.95de
华骏 Huajun	CK	1.65±0.20f	0.43±0.031ef	2.48±0.26f
	Mn-S1	6.93±1.28cd	2.15±0.27c	13.49±1.71c
	Mn-S2	9.21±1.48bc	2.12±0.27c	25.21±4.43b
	Mn-S3	23.33±3.61a	5.29±0.522a	43.61±5.28a
	Mn-A1	3.70±0.49ef	0.87±0.115d	5.83±0.34ef
	Mn-A2	5.20±0.47de	0.82±0.105de	11.99±1.27cd
	Mn-A3	10.96±1.59b	2.88±0.298b	29.06±2.53b
	Mn-E1	2.00±0.31f	0.34±0.035f	3.94±0.39f
	Mn-E2	2.39±0.12f	0.93±0.069d	5.97±0.93ef
	Mn-E3	2.35±0.26f	0.53±0.073def	8.32±0.83de

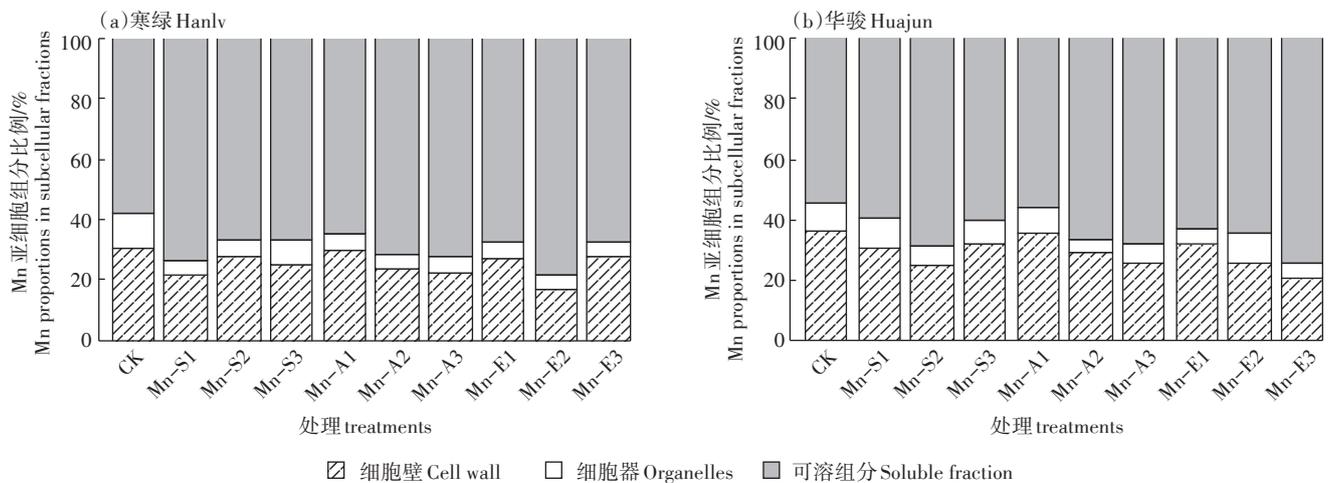


图 5 不同 Mn 肥处理下两种油菜地上部 Mn 在亚细胞组分中的分配比例

Figure 5 Mn proportions in three subcellular fractions in shoots of the tested pak choi cultivars under different Mn treatments

分配比例明显降低,降幅范围为3.7%~6.9%,可溶组分Mn的分配比例明显升高,增幅范围为6.8%~20.6%,部分处理细胞壁组分Mn的比例有所降低,降幅为0.8%~13.7%。对于华骏,所有硫酸锰以及Mn-A3处理下各亚细胞组分的Mn含量显著升高,而其余大部分处理对各亚细胞组分Mn含量没有显著影响。从Mn的分配比例来看,喷施Mn肥使得细胞壁中Mn的比例下降,降幅范围为0.5%~15.1%,可溶组分中Mn的比例升高,最大增幅为19.9%。总体来看,大部分整合锰处理对各亚细胞组分Mn含量没有显著影响,而喷施高浓度硫酸锰和乙酸锰显著提高各组分Mn含量;喷施Mn肥后,油菜细胞壁Mn的比例呈现降低趋势,可溶组分Mn的比例则明显升高。

3 讨论

Mn在植物光合作用、氮代谢以及抗氧化体系等方面发挥重要作用,Mn可以通过改善植物生理功能以及拮抗作用缓解Cd对植物的毒害作用^[16]。在本研究中,喷施Mn肥对两种油菜生长没有促进作用,这可能与供试土壤的Mn有效性和Cd含量有关。本研究对照组油菜地上部Mn含量超过 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远高于植物缺Mn临界值 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[17],这表明供试土壤Mn有效性较高,从而导致施用Mn肥的肥效不佳;而土壤Cd含量为 $2.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对照组中油菜生长没有受到明显抑制,因此通过Mn/Cd拮抗缓解植物Cd毒害的作用也未得以体现。另外,Mn也是一种重金属元素。施用高剂量Mn肥会使植物累积过量的Mn,进而导致Mn中毒,显著抑制植物生长^[18-19]。Zhang等^[20]研究发现,喷施 $0.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn(MnSO_4)显著提高人参根部产量,而喷施 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn却使其产量显著降低。本研究也表明,喷施高浓度乙酸锰和整合锰显著降低了寒绿的地上部生物量。值得注意的是,在本研究中,乙酸锰和整合锰处理组Mn的喷施浓度比硫酸锰低1倍,但是前两者的高浓度处理使寒绿的地上部生物量显著降低,后者却没有显著影响,究其原因可能与伴随阴离子不同有关。Huang等^[8]研究发现,喷施 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn的 MnSO_4 处理对水稻地上部生物量没有显著影响,而喷施相同浓度的 $\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Mn}$ 却使水稻生物量显著降低。张玉先等^[21]研究也发现,喷施高浓度 EDTA-Mn ($7.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn)显著抑制大豆氮代谢相关指标,进而明显影响大豆产量。

在本研究中,从喷施Mn肥降低油菜地上部和根部Cd含量的效果来看,硫酸锰处理组平均降低率和

最大降低率分别为34.0%和56.1%,乙酸锰处理组为34.8%和56.0%,整合锰处理组为16.1%和38.4%。由此可知,硫酸锰和乙酸锰降低油菜Cd含量的效果明显优于整合锰。就具体处理来说, $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn的硫酸锰和 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn的乙酸锰两个处理降低油菜地上部Cd含量的效果最佳。而就提高油菜地上部Mn含量的效果来看,硫酸锰和乙酸锰的效果也明显优于整合锰。另外,相关性分析显示,油菜地上部和根部Cd含量与地上部Mn含量都呈显著的负相关关系($P < 0.05$, $df=58$),相关系数分别为-0.579和-0.542,这表明油菜在Mn、Cd吸收过程中确实存在拮抗作用,喷施Mn肥可能通过提高油菜地上部Mn含量,降低了油菜体内Cd的累积,这一锰镉拮抗作用也是硫酸锰和乙酸锰降低油菜Cd含量的效果优于整合锰的重要原因。近年来研究发现,NRAMP5蛋白是水稻吸收Mn和Cd的重要转运载体,而且NRAMP5基因的表达量不受生长介质中Mn浓度的影响,即使在Mn浓度较高时,其表达量也没有显著变化,这就导致其对应的载体数量有限,而过量的Mn和Cd竞争这些载体,从而造成水稻对二者的吸收表现为拮抗作用^[22-23]。喷施Mn肥抑制油菜Cd吸收是否也有相同的基因调控机制,还有待进一步研究证实。

重金属的亚细胞分布与其在植物体内的累积和转运有密切的关系,它受多种因素影响,诸如元素种类与浓度、植物基因型与器官以及外源物质等^[13,24]。本研究中,Cd和Mn在油菜茎叶不同亚细胞组分中的分配比例大小顺序为可溶组分>细胞壁>细胞器。王俊丽等^[25]发现,在Cd污染土壤种植艾纳香,其茎和叶中的Cd大部分累积在可溶组分中,比例高达69.1%~95.6%。何蔚等^[26]研究表明,Mn在栎树和乌柏体内主要分布在细胞可溶组分,其次为细胞壁。本研究的结果与这两个研究一致。另外,喷施Mn肥后,Cd和Mn在油菜茎叶细胞壁的分配比例呈现降低趋势,而在可溶组分的分配比例则呈现升高趋势。邓华等^[27]研究发现,Mn在短毛蓼茎部细胞可溶组分的分配比例随Mn处理浓度升高而增加,从25.1%上升至58.2%,而在细胞壁中的比例则从66.5%降低至38.0%。徐向华等^[28]也发现,随着Mn处理浓度的升高,商陆叶片中Mn在细胞可溶组分的比例逐步升高,而在细胞壁中的比例则有所降低。而徐筱等^[29]研究发现,在培养液中添加 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn会显著提高水稻地上部Cd在细胞壁中的比例,降低其在可溶组分中的比例。本研究结果与邓华等和徐向华等的研究

一致,而与徐蓓等的不同。研究发现,在拟南芥的液泡膜上存在多种转运 Mn 的载体蛋白,例如 NRAMP3 和 CAX2,在 Mn 胁迫时植物会大量合成这些载体,从而向液泡内转运过量的 Mn,同时这些载体也可以转运 Cd^[30-31]。因此我们推测油菜液泡膜上可能也存在类似的载体,在本研究中喷施 Mn 肥使油菜地上部 Mn 含量升高,会激活相关基因而导致载体大量合成,将过量的 Mn 转运到液泡,而转运 Mn 的同时部分 Cd 可能被协同转运,最终造成可溶组分中 Mn 和 Cd 的比例都有所提高。

4 结论

(1) 喷施 Mn 肥对 Cd 低积累叶用油菜地上部和根部生物量无显著影响,喷施高浓度 Mn(CH₃COO)₂ 和 EDTA·Na₂Mn 显著降低普通叶用油菜地上部生物量。

(2) 喷施 MnSO₄ 和 Mn(CH₃COO)₂ 处理降低叶用油菜 Cd 含量、提高 Mn 含量的效果明显优于喷施 EDTA·Na₂Mn 处理,其中,0.4 g·L⁻¹Mn 的 MnSO₄ 和 0.2 g·L⁻¹Mn 的 Mn(CH₃COO)₂ 处理降低 Cd 低积累叶用油菜地上部 Cd 含量的效果最佳。

(3) 喷施 Mn 肥显著降低叶用油菜总 Cd 累积量,使 Cd 转运系数显著升高,叶用油菜地上部 Cd 含量与总 Cd 累积量呈极显著的正相关性($P < 0.01$),而与 Cd 转运系数则无显著相关性,表明喷施 Mn 肥降低叶用油菜地上部 Cd 含量主要是由抑制根部 Cd 吸收引起。

(4) Cd 和 Mn 在叶用油菜地上部主要分布在细胞可溶组分中,其次为细胞壁。喷施 Mn 肥后,Cd 和 Mn 在细胞壁组分的分配比例降低,在可溶组分的分配比例升高。

参考文献:

[1] Huang Y Y, He C T, Shen C, et al. Toxicity of cadmium and its health risks from leafy vegetable consumption[J]. *Food & Function*, 2017, 8(4):1373-1401.

[2] 李霞,张慧鸣,徐震,等. 农田 Cd 和 Hg 污染的来源解析与风险评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7):1314-1320.

LI Xia, ZHANG Hui-ming, XU Zhen, et al. Source apportionment and risk assessment of Cd and Hg pollution in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7):1314-1320.

[3] Chen H P, Yang X P, Wang P, et al. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: A case study in Xiangtan, southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639:271-277.

[4] 黄道友,朱奇宏,朱捍华,等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6):1030-1043.

HUANG Dao-you, ZHU Qi-hong, ZHU Han-hua, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6):1030-1043.

[5] 温娜,王景安,刘仲齐. 利用 AMMI 模型分析稻米镉含量的基因型与环境互作效应[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):817-823.

WEN Na, WANG Jing-an, LIU Zhong-qi. Analysis of genotypic and environmental effects on cadmium content in rice by AMMI model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):817-823.

[6] Socha A L, Guerinot M L. Mn-coupling manganese: The role of transporter gene family members in manganese uptake and mobilization in plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5:106-122.

[7] Ullah I, Wang Y, Eide D J, et al. Evolution, and functional analysis of Natural Resistance-Associated Macrophage Proteins (NRAMPs) from *Theobroma cacao* and their role in cadmium accumulation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):14412.

[8] Huang Q N, An H, Yang Y J, et al. Effects of Mn-Cd antagonistic interaction on Cd accumulation and major agronomic traits in rice genotypes by different Mn forms[J]. *Plant Growth Regulation*, 2017, 82(2):317-331.

[9] 尹晓辉,邹慧玲,方雅瑜,等. 施锰方式对水稻吸收积累镉的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(8):8-12.

YIN Xiao-hui, ZOU Hui-ling, FANG Ya-yu, et al. Effects of manganese fertilizer on absorption and accumulation of Cd in rice[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(8):8-12.

[10] Wang L, Xu Y M, Sun Y B, et al. Identification of pakchoi cultivars with low cadmium accumulation and soil factors that affect their cadmium uptake and translocation[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2014, 8(6):877-887.

[11] Liang X F, Qin X, Huang Q Q, et al. Remediation mechanisms of mercapto-grafted palygorskite for cadmium pollutant in paddy soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(30):23783-23793.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.

BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3th Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[13] Xin J L, Huang B F. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two hot pepper cultivars differing in cadmium accumulation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(2):508-515.

[14] Xin J L, Huang B F, Dai H W, et al. Characterization of cadmium uptake, translocation, and distribution in young seedlings of two hot pepper cultivars that differ in fruit cadmium concentration[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(12):7449-7456.

[15] 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 Ru-yin, XU Ying-ming, WANG Lin, 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.

[16] Rahman A, Nahar K, Hasanuzzaman M, et al. Manganese-induced

- cadmium stress tolerance in rice seedlings: Coordinated action of anti-oxidant defense, glyoxalase system and nutrient homeostasis[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2016, 339(11/12):462-474.
- [17] 安振锋, 方正. 植物锰营养研究进展[J]. 河北农业科学, 2002, 6(4):35-41.
- AN Zhen-feng, FANG Zheng. Research progress on plant manganese nutrition[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2002, 6(4):35-41.
- [18] 李光远, 王风华, 蒋燕. 叶面喷施锰对生菜生长和品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(3):54-57.
- LI Guang-yuan, WANG Feng-hua, JIANG Yan. Effects of foliage spraying Mn on growth and quality of lettuce[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2015, 43(3):54-57.
- [19] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀, 等. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展[J]. 植物学报, 2010, 45(4):506-520.
- ZHANG Yu-xiu, LI Lin-feng, CHAI Tuan-yao, et al. Advances in research on manganese toxicity to plants and mechanism of manganese tolerance in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010, 45(4):506-520.
- [20] Zhang H, Yang H, Wang Y, et al. The response of ginseng grown on farmland to foliar-applied iron, zinc, manganese and copper[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 45:388-394.
- [21] 张玉先, 祁倩倩, 罗奥, 等. 锰对大豆氮代谢相关指标及产量品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(4):486-491.
- ZHANG Yu-xian, QI Qian-qian, LUO Ao, et al. Effects of manganese on soybean nitrogen metabolism yield and quality[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2009, 31(4):486-491.
- [22] Yang M, Zhang Y Y, Zhang L J, et al. OsNRAMP5 contributes to manganese translocation and distribution in rice shoots[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(17):4849-4861.
- [23] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, et al. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. *The Plant Cell*, 2012, 24(5):2155-2167.
- [24] Shi G R, Zhang Z, Liu C F. Silicon influences cadmium translocation by altering subcellular distribution and chemical forms of cadmium in peanut roots[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(1):117-123.
- [25] 王俊丽, 梁娟, 任建国. 土壤镉污染对艾纳香生长及体内镉累积和分布特征的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(9):84-89.
- WANG Jun-Li, LIANG Juan, REN Jian-guo. Effects of soil cadmium contamination on growth of *Blumea balsamifera* and cadmium accumulation and subcellular distribution in plant[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science)*, 2017, 42(9):84-89.
- [26] 何蔚, 陈永华, 梁希, 等. 改良锰矿渣中木本植物筛选及锰的亚细胞分布和化学形态[J]. 环境工程, 2018, 36(9):154-160.
- HE Wei, CHEN Yong-hua, LIANG Xi, et al. Screening for tolerant woody plants for improved manganese slag and research on subcellular distribution and chemical form of manganese[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(9):154-160.
- [27] 邓华, 李明顺, 陈英旭, 等. 锰在短毛蓼不同器官中的亚细胞分布及化学形态[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2010, 28(1):58-62.
- DENG Hua, LI Ming-shun, CHEN Ying-xu, et al. Subcellular distribution and chemical fractions of manganese in hyperaccumulator *Polygonum pubescens* Blume[J]. *Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2010, 28(1):58-62.
- [28] 徐向华, 施积炎, 陈新才, 等. 锰在商陆叶片的细胞分布及化学形态分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):515-520.
- XU Xiang-hua, SHI Ji-yan, CHEN Xin-cai, et al. Subcellular distribution and chemical fractions of manganese in leaves of hyperaccumulator *Phytolacca acinosa* Roxb.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):515-520.
- [29] 徐蓓, 杨益新, 李文华, 等. 锰离子浓度及其转运通道对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1429-1435.
- XU You, YANG Yi-xin, LI Wen-hua, et al. Effects of manganese concentrations and transporters on uptake and translocation of cadmium in rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1429-1435.
- [30] Thomine S, Lelièvre F, Debarbieux E, et al. AtNRAMP3, a multispecific vacuolar metal transporter involved in plant responses to iron deficiency[J]. *The Plant Journal*, 2003, 34(5):685-695.
- [31] Koren'kov V, Park S, Cheng N H, et al. Enhanced Cd²⁺-selective root-tonoplast-transport in tobaccos expressing *Arabidopsis* cation exchangers[J]. *Planta*, 2006, 225(2):403-411.