

施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响

胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 张兴, 陈璐, 郭大维, 党秀丽

引用本文:

胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 等. 施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1635–1643.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0106>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小叶榕对土壤铅镉污染的抗性和修复潜力研究

彭维新, 庄玉婷, 梁智淇, 俞政男, 吴道铭, 张学平, 曾曙才

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1707–1717 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0241>

石灰石砂砾负载铁膜及其强化除磷效果

施佳诚, 陈灿明, 高婷, 卫泽斌, 吴启堂

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1993–2000 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0284>

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健, 朱靖

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1723–1733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110>

钝化剂对土壤性质及镉生物有效性的影响研究

武晓微, 翟文珺, 高超, 荣飒爽, 郭小彪, 赵会薇, 刘微

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 562–569 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0826>

稻秆炭与巨菌草联合对铜镉污染土壤的修复

王玺洋, 辛在军, 李晓晖, 李亮, 孙小艳, 闵芳芳

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 74–82 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0878>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 等. 施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1635–1643.

HU Y M, LÜ J S, SUN W B, et al. Effects of manganese application on the growth, cadmium uptake and cadmium distribution of maize in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1635–1643.



开放科学 OSID

施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响

胡艳美¹, 吕金朔¹, 孙维兵², 张兴¹, 陈璐¹, 郭大维¹, 党秀丽^{1*}

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 农业农村部东北耕地保育重点实验室 土壤资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866;
2. 沈阳环境科学研究院, 沈阳 110167)

摘要:为定量研究锰(Mn)对镉(Cd)污染土壤的修复效果,以低(5 mg·kg⁻¹)和高(10 mg·kg⁻¹)Cd污染棕壤为供试土壤,通过盆栽培养试验,研究施加不同浓度的MnSO₄(20、200、2 000 mg·kg⁻¹)对土壤Cd形态、玉米生长和体内Cd吸收、Cd亚细胞分布的影响。结果表明:施Mn可以显著改变土壤中Cd的赋存形态,与对照(未施加Mn)相比,土壤可交换态Cd含量降低了4.75%~30.81%,且随着Cd浓度的增加,可交换态Cd降低比例逐渐增大。适量的Mn(20、200 mg·kg⁻¹)可以促进玉米根系的生长,提高玉米各部位生物量,增产11.42%~17.51%,但过量的Mn(2 000 mg·kg⁻¹)则会对玉米产生一定的毒害作用,导致减产。Mn降低了土壤中Cd的生物有效性,从而抑制玉米对Cd的吸收,籽粒Cd含量在低Cd污染土壤中降低了46.15%~53.85%,在高Cd污染土壤中降低了38.37%~52.33%。同时Mn增加了细胞壁对Cd的沉积和液泡区隔化作用,促进Cd在根部的固持,从而降低其向地上部转运。研究表明,Mn的施加对低Cd污染土壤的钝化效果优于高Cd污染土壤,适量的Mn更有助于玉米的生长发育以及降低玉米体内的Cd含量。

关键词: 镉污染; 锰; 玉米; 土壤修复

中图分类号: S513; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)08-1635-09 doi:10.11654/jaes.2021-0106

Effects of manganese application on the growth, cadmium uptake and cadmium distribution of maize in cadmium contaminated soil

HU Yanmei¹, LÜ Jinshuo¹, SUN Weibing², ZHANG Xing¹, CHEN Lu¹, GUO Dawei¹, DANG Xiuli^{1*}

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Northeast Key Laboratory of Conservation and Improvement of Cultivated Land, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China; 2. Shenyang Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110167, China)

Abstract: To quantitatively analyze the remediation effect of manganese (Mn) on cadmium (Cd) contaminated soil, the effects of different concentrations of Mn (20, 200, 2 000 mg·kg⁻¹) on Cd fractions in the soil, maize growth, Cd uptake by maize, and Cd subcellular distribution were studied by a pot experiment in low (5 mg·kg⁻¹) and high (10 mg·kg⁻¹) Cd contaminated brown soil. The results showed that: Mn application significantly changed the Cd fractions in the soil. Compared with the control, the concentration of exchangeable Cd decreased by 4.75%~30.81%, and the decreasing proportion of exchangeable Cd increased with increasing Cd concentration. Moderate Mn (20, 200 mg·kg⁻¹) promoted the growth of maize roots, enhanced the biomass of all plant parts, and increased the yield by 11.42%~17.51%. However, excessive Mn (2 000 mg·kg⁻¹) had a toxic effect on maize, resulting in yield reduction. The bioavailability of Cd in the soil was decreased by Mn application, and Cd uptake by maize was also inhibited. The Cd content in the grain in low and high Cd contaminated soil decreased by 46.15%~53.85% and 38.37%~52.33%, respectively. Meanwhile, Mn increased the Cd deposition in the

收稿日期: 2021-01-26 录用日期: 2021-04-20

作者简介: 胡艳美(1995—),女,新疆库尔勒人,硕士,从事土壤改良与生态修复研究。E-mail: 2018220363@stu.syau.edu.cn

*通信作者: 党秀丽 E-mail: dxl@syau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301530)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41301530)

cell wall and vacuolar compartmentation, promoted the fixation of Cd in the root, and reduced the transport of Cd to the shoot. In general, the passivation effect of Mn on low Cd contaminated soil is better than that in the high Cd contaminated soil, and an appropriate Mn application is more conducive to enhancing the growth and development of maize and reducing the Cd uptake.

Keywords: cadmium contamination; manganese; maize; soil remediation

由于工业活动的快速发展、过量施肥和污水灌溉,土壤重金属污染已成为农业环境中最亟需解决的问题之一^[1]。与其他有毒重金属相比,Cd具有很高的迁移性,在同等污染程度下,Cd的生物有效性要比Pb、As和Hg等其他重金属高得多^[2];Cd很容易被植物吸收、运输并在食物链中积累,即使在较低浓度下也会危害人类健康^[3]。据估计,全世界每年约有 1.0×10^6 t的Cd被释放到环境中;在我国,受Cd污染的农田近 1.0×10^7 hm²,被Cd污染的农产品(食品中Cd含量超标)达 1.5×10^6 t^[4]。Cd在植物中的过度积累会降低植物对营养元素的吸收,最终损害植株的正常生长降低粮食产量^[5]。我国土地资源高度紧张,人均耕地面积不到世界平均水平的一半^[4],为了缓解耕地资源短缺和农产品质量下降等问题,通过农艺调控措施对Cd污染农田进行修复和再利用,对于确保我国粮食安全和农业可持续发展具有重要意义。

Mn是植物生长所必需的微量元素之一,由于其具有肥料的属性,在治理土壤Cd污染的同时还能够提高粮食籽粒中的Mn含量,因此,施加Mn作为经济有效的重金属农艺调控方法也越来越受到人们的关注^[6-7]。有研究表明,Mn、Zn等元素与Cd具有相同的粒子结构和相似的化学行为,因此会产生拮抗作用,从而显著降低作物对Cd的吸收^[8]。向Cd污染土壤中施加MnO₂、Fe₂O₃可以显著降低土壤中有效态Cd含量,这是由于铁锰氧化物对土壤中的Cd有较强的吸附性,且在相同施用量下,MnO₂的改良效果优于Fe₂O₃^[9]。施用MnSO₄和水溶性锰均能抑制Cd对水稻的毒害作用^[10],少量的MnSO₄就能有效降低小麦籽粒对Cd的吸收积累^[11],说明施加Mn对缓解植物Cd毒害有一定的作用。有研究发现,外源施加Mn可以促进植株生长,并通过“稀释”作用降低植株体内的Cd含量^[12]。通过Mn-Cd之间的拮抗作用和改良营养状况可以减轻Cd对白羽扇豆的毒害作用,但是高量Mn处理会使Cd的毒害作用增强,因为Mn作为一种重金属元素,过量的积累会导致Mn中毒,从而抑制植物生长^[13]。

探究Mn对Cd有效性的影响对防治棕壤Cd污染和农业的可持续发展非常重要。东北地区既是我国的老工业基地,也是重要的玉米生产基地,Cd污染土

壤的修复和再利用有助于保障粮食安全。目前的研究多数集中在Mn对水稻和蔬菜的Cd改良方面,并且缺乏Cd胁迫下Mn对玉米不同部位Cd含量的影响的研究。因此,本文通过盆栽试验,以玉米为研究对象,探究外源Mn添加对土壤中Cd的有效性、玉米生长及不同部位Cd含量的影响,并通过分析Cd在玉米不同部位亚细胞的分布进一步研究Mn对Cd的固定机制,为探明Mn、Cd的相互作用以及Cd污染土壤修复和玉米的安全生产提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自辽宁省沈阳市沈阳农业大学科研基地旱地0~20 cm表层棕壤,其pH为6.80,有机质含量为 $10.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮、速效钾、速效磷的含量分别为 13.21 、 53.25 、 $32.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,未检测出Cd,Mn全量为 $195.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试作物为玉米(*Zea mays*),品种为沈峰56。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,将土壤风干后过2 mm筛,装入陶瓷盆中,每盆15 kg(按照土壤容重 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 计)。向盆内土壤中加入常规用量的尿素、磷肥和钾肥,其中氮用量为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,磷(P₂O₅)用量为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,钾(K₂O)用量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。调节土壤含水量为田间持水量的60%。静置3 d后,以Cd(NO₃)₂·4H₂O(分析纯)溶液的形式将Cd加入土壤中,使Cd浓度分别达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别用Cd1和Cd2表示,室温下陈化2周后备用。Mn以MnSO₄·3H₂O溶液加入至土壤中,使加入的Mn与土壤充分混匀。设置Mn浓度分别为0、20、200、2 000 mg·kg⁻¹,分别记作Mn0、Mn1、Mn2、Mn3,两种土壤均以未施加Mn(Mn0)为对照。共设8个处理(表1),每个处理重复3次。将上述土壤陈化2周后播种,每盆播种3颗玉米种子,间苗后使每盆留一株长势相似的幼苗。种植、管理方式与当地普通大田一致。玉米成熟后采集土壤及植株样品进行测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤Cd赋存形态

将玉米收获之后的土样自然风干,研磨过筛后保

表1 不同处理Cd和MnSO₄的浓度(mg·kg⁻¹)Table 1 Concentrations of Cd and MnSO₄ in different treatments (mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	Cd浓度 Cd concentration	MnSO ₄ 浓度 MnSO ₄ concentration
Mn0Cd1	5	0
Mn1Cd1	5	20
Mn2Cd1	5	200
Mn3Cd1	5	2 000
Mn0Cd2	10	0
Mn1Cd2	10	20
Mn2Cd2	10	200
Mn3Cd2	10	2 000

存备用。在土样中加入硝酸:盐酸:高氯酸混合液(V:V:V=3:1:1)^[14]于微波消解仪(MARS 6, CLASSIC)中消解,再利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MPX, Vista-MPX, Agilent Technologies)测定土壤Cd全量。土壤中的Cd形态采用 Tessier 连续提取法测定^[15],其相应的形态为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态。利用电感耦合等离子体发射光谱仪测定各形态Cd含量,其中残渣态含量通过总量减去其他各形态含量求得。

1.3.2 玉米根系形态的测定

玉米成熟后还为新鲜状态时将其收获,将玉米分为根、茎、叶和籽粒,然后用去离子水彻底冲洗。用剪刀将根沿茎基部一条条剪下,尽可能收集土壤中的根和从主根上掉落的侧根,将所有根浸泡在装有去离子水的塑料盆中,防止根系打结。将根分开放入托盘中,喷洒适量蒸馏水使根系充分伸展,避免侧根重叠和交叉,然后用根系扫描仪(EXPRESSION 10000XL, EPSON)进行分析。记录总根长、总根表面积、总根体积和平均根直径。

1.3.3 玉米产量、生物量及各部位Cd、Mn含量的测定

玉米收获后,将其分为籽粒、叶、茎和根,将样品放在105℃烘箱中杀青30 min,再于70℃下烘干至恒质量,此为玉米各部位生物量;将籽粒生物量作为玉米产量。烘干后的根、茎、叶和籽粒分别置于植物粉碎机中粉碎,过筛保存,将样品于微波消解仪中进行消解,再利用ICP-MPX测定玉米各部位Cd、Mn含量。

1.3.4 玉米各部位亚细胞Cd含量的测定

采用差速离心法分离不同的细胞组分。分别称取1.00 g新鲜玉米根、茎、叶、籽粒于石英研钵内,加入20 mL预冷的提取液(0.154 g·L⁻¹二硫苏糖醇、0.25 mol·L⁻¹蔗糖溶液、pH 7.5 50 mmol·L⁻¹ Tris-HCl 缓冲

液)充分研磨后转移至离心管,在4 000 r·min⁻¹、4℃下离心15 min,沉淀为细胞壁部分。将上清液继续于16 000 r·min⁻¹、4℃下离心45 min,沉淀为细胞器部分,上清液即为细胞可溶性部分^[16]。将细胞壁和细胞器部分完全转移到消解管中,置于微波消解仪中进行消解,采用火焰原子吸收分光光度计法进行3个组分中亚细胞Cd含量的测定。

1.4 数据处理

所有数据均以平均值±标准差表示。采用Excel 2010和SPSS 23.0进行相关数据的计算、统计与处理,通过Duncan多重比较法进行单因素方差分析,利用Origin 2019软件作图。

各部位亚细胞Cd所占比例=各部位亚细胞Cd含量/各部位亚细胞Cd含量总和×100%

2 结果与讨论

2.1 Cd胁迫下不同浓度Mn处理对土壤Cd赋存形态的影响

土壤中重金属的赋存形态直接影响其毒性和环境行为^[17]。图1为不同Mn处理对土壤Cd赋存形态的影响。由图1可知,在Cd1土壤中,Mn0土壤中的Cd主要以可交换态存在,其次是残渣态和铁锰氧化物结合态,有机结合态最少;与Mn0相比,Mn1、Mn2、Mn3处理使可交换态Cd分别显著降低了9.4%、6.29%和4.75%;铁锰氧化物结合态以及残渣态Cd均有不同程度的增加。在Cd2土壤中,Mn1、Mn2和Mn3处理下可交换态Cd分别比Mn0显著降低了30.81%、28.78%和13.78%,碳酸盐结合态Cd分别显著降低了2.79%、

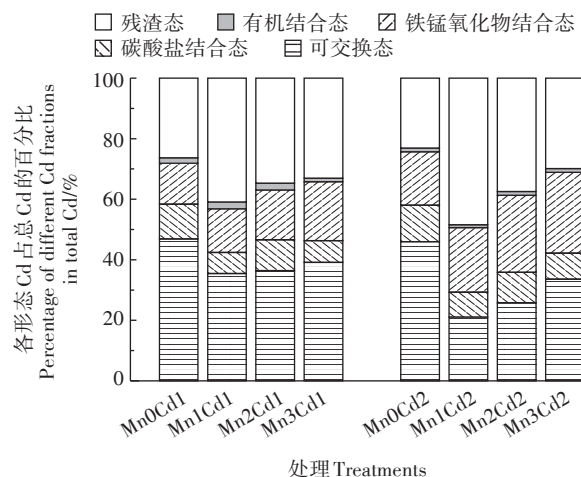


图1 Mn处理对土壤Cd赋存形态的影响

Figure 1 Effects of Mn treatments on Cd fractions in soil

1.61%和2.88%,有机结合态Cd含量均无显著变化,铁锰氧化物结合态和残渣态Cd均显著增加。向土壤中施加Mn促进了可交换态Cd向其他形态转化,其中铁锰氧化物结合态Cd增幅最大。在两种Cd污染土壤中,Mn1处理下可交换态Cd含量降幅最大;而相同Mn施用量下,土壤中Cd浓度越高,可交换态Cd含量降幅越大。

重金属可交换态的活性最强,具有较高的移动性和毒性,能被植物直接吸收;残渣态最稳定,不能被植物吸收利用;其他形态的活性较低,但在某些特定条件下会发生转化^[18]。锰氧化物是细小颗粒形状的晶体,其内部为层状结构或大的隧道结构,具有较大的内表面积和比表面积,同时电荷零点也较低,因此其对重金属有很强的吸附能力,可以通过吸附/共沉淀和氧化还原过程来影响土壤中重金属的形态和浓度^[19]。由图1可以看出,Mn的施加改变了土壤中Cd的赋存形态,可以提高铁锰氧化物结合态和残渣态Cd的含量,降低Cd的有效性。还有研究证明,锰氧化物在氧化还原过程中会对Cd产生吸附固定作用,从而降低土壤中Cd的有效性^[20]。施Mn还可以提高土壤胶体中锰氧化物的含量,从而增加土壤胶体表面的负电荷,增强Cd在铁锰氧化物中的吸附,降低Cd的活性^[21]。

2.2 Cd胁迫下不同浓度Mn处理对玉米根系形态的影响

表2为土壤Cd胁迫下施Mn对玉米根系形态的影响。由表2可知,在两种Cd污染土壤中,相比Mn0处理,Mn1处理的根长、根表面积、根体积以及根平均直径均显著增加,增幅为4.57%~30.69%;Mn3处理的根长、根表面积、根体积和根平均直径均低于对照,降幅为5.35%~19.90%。Cd1污染土壤中,与Mn0处理相比,Mn2处理根长显著增加,根表面积显著降低,但

在Cd2污染土壤中根长和根表面积均没有显著变化。

本研究结果表明,适量的Mn可以为玉米生长提供一定的Mn营养,促进玉米根系的生长,同时根系在吸收Cd和Mn上存在拮抗作用,Mn的施加可以缓解Cd对玉米根系的毒害;而过量的Mn对根系各形态参数产生了负面影响,可能是由于其破坏了玉米根系的完整性和质膜通透性^[22],从而产生毒害作用,这也可能在一定程度上促进玉米被动吸收Cd。在不同Cd污染土壤中施加等量的Mn,土壤的Cd污染程度越重,根系形态的各指标数值越低,说明Mn在低Cd污染土壤中更能显著减缓根部Cd的毒害作用。有研究表明,适量的Mn会对美洲商陆的根长和根体积有一定的促进作用^[23]。还有研究指出适量的MnSO₄促进了马铃薯根系的生长发育,但过量则会产生抑制效果^[24]。

2.3 Cd胁迫下不同浓度Mn处理对玉米产量和生物量的影响

玉米产量和不同部位的生物量可以直观地体现出玉米生长发育的状况。图2为Cd胁迫下不同浓度的Mn处理对玉米产量以及各部位生物量的影响。由图2A可知,Cd1土壤中,Mn1和Mn2处理的玉米产量均显著高于Mn0,Cd2土壤中,Mn1处理的玉米产量显著高于Mn0,而Mn3处理的玉米产量显著低于Mn0。由图2B可知,与Mn0相比,在两种Cd污染土壤中,Mn1处理下玉米根、茎和叶的生物量均显著增加;Mn2和Mn3处理下玉米根生物量显著增加,但叶的生物量却在Cd1土壤中显著降低。

Mn不但是植物生长所需的营养元素,同时也是一种重金属元素,因此其会在植物体内产生两面性。本试验表明,低量Mn处理在不同Cd污染土壤中均能

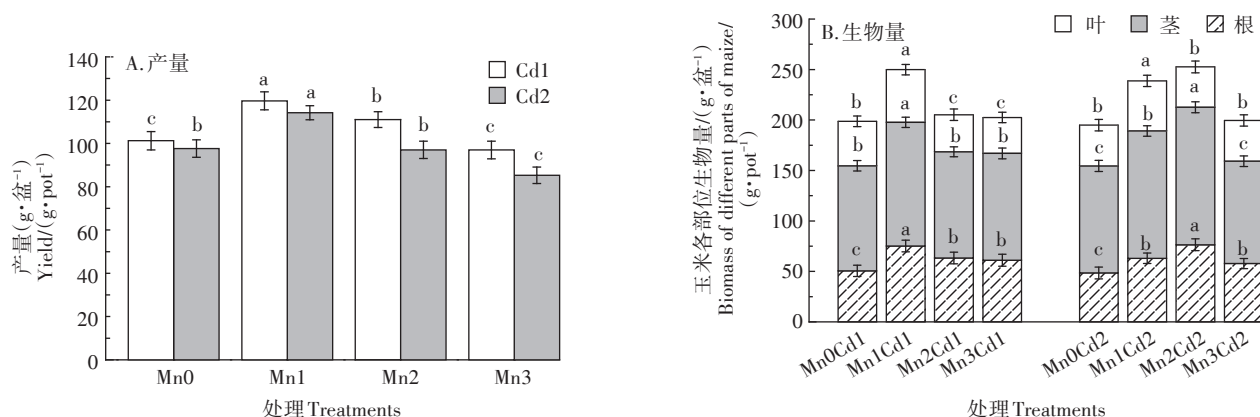
表2 玉米根系形态参数

Table 2 Morphological parameters of maize root

处理 Treatments	根长/(m·盆 ⁻¹) Root length/(m·pot ⁻¹)	根表面积/(cm ² ·盆 ⁻¹) Root surface area/(cm ² ·pot ⁻¹)	根体积/(cm ³ ·盆 ⁻¹) Root volume/(cm ³ ·pot ⁻¹)	根平均直径/(mm·盆 ⁻¹) Root mean diameter/(mm·pot ⁻¹)
Mn0Cd1	64.25±0.37c	6 062.54±69.75b	592.05±16.32b	15.38±0.21b
Mn1Cd1	73.17±0.44a	6 339.84±109.45a	628.24±4.55a	20.10±0.52a
Mn2Cd1	69.03±0.68b	5 710.80±81.96c	580.96±16.00bc	14.69±1.15b
Mn3Cd1	60.60±0.95d	5 454.45±67.70c	540.69±14.26c	12.32±0.56c
Mn0Cd2	60.30±0.38b	5 745.12±107.87b	588.81±6.27b	13.60±0.63b
Mn1Cd2	66.04±0.44a	6 318.94±91.64a	626.63±6.25a	16.25±0.86a
Mn2Cd2	57.96±0.68b	5 958.28±34.66ab	608.04±6.48ab	13.11±0.74b
Mn3Cd2	50.87±0.95c	5 250.32±170.21c	557.30±8.97c	11.65±0.66c

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母表示不同Mn处理间差异显著(P<0.05)。

Note: The data in the table are represented with mean±SD. Different lowercase letters indicate significant differences among different Mn treatments (P<0.05).



不同小写字母表示不同 Mn 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among different Mn treatments ($P < 0.05$). The same below

图2 Mn处理对玉米产量和各部位(根、茎、叶)生物量的影响

Figure 2 Effects of Mn treatments on maize yield and biomass of different parts (root, stem and leaf)

增加玉米产量和各部位生物量,但是高量 Mn 处理则出现了减产的现象,这很可能是因为植物遭受了过量的 Cd、Mn 双重胁迫,同时高量 Mn 处理抑制了根系生长。玉米对低量 Mn 和高量 Mn 的耐受力不同,当植物积累的 Mn 含量超过了自身的防御能力, Mn 就会对植物细胞造成伤害,破坏正常的生理代谢功能。低量 Mn 会减轻 Cd 对玉米的毒害作用,但超过一定浓度后玉米对 Mn 的耐受性就会降低,反而会对作物造成一定程度的毒害作用。有研究指出,逆境下重金属的胁迫会激活植物的代谢系统,增加植物本身对重金属的吸收,从而抑制了植物的代谢活动,导致毒害作用的产生^[25]。还有研究表明,过量施加 Mn 会抑制植物对 Fe、Zn 的积累,而 Fe、Zn 也是植物生长过程中的必要元素,从而影响植株的正常生长发育^[26]。此外, Mn 在植物光合作用、抗氧化体系及氮代谢过程中也有重要的作用,其还可以通过改善植物的各项生理功能来缓解植物 Cd 毒害,促进植株生长发育。

2.4 Cd 胁迫下不同浓度 Mn 处理对玉米 Cd、Mn 吸收的影响

图3为 Mn 处理对玉米各部位 Cd 吸收的影响,图4为 Mn 处理下玉米各部位对 Mn 的吸收。由图3可知,玉米各部位的 Cd 含量依次为籽粒<茎<叶<根,说明施 Mn 可以降低 Cd 在玉米体内的转运。Mn1、Mn2 和 Mn3 处理在 Cd1 土壤中使籽粒 Cd 含量分别比 Mn0 降低了 35.90%、53.85% 和 48.72%,在 Cd2 土壤中分别比 Mn0 降低了 50.00%、52.33% 和 38.37%。Cd1 土壤中 Mn1 和 Mn2 处理下叶、茎和根中 Cd 含量均比 Mn0 有不同程度的降低,但在 Cd2 土壤中 Mn1 和 Mn2 处理

下根中 Cd 含量却显著高于 Mn0。与 Mn0 相比,在两种 Cd 污染土壤中 Mn3 处理使根和茎中的 Cd 含量均显著升高。由图4可知, Mn 的施加可以显著提高玉米各部位中的 Mn 含量。

本研究结果表明,施 Mn 不但可以有效降低玉米体内的 Cd 含量,还可以提高玉米体内 Mn 的含量。玉米体内 Cd 含量的降低与施 Mn 能有效降低土壤中可交换态 Cd 含量有关(图1)。锰氧化物是土壤黏粒氧化物中最活跃的部分之一,也是土壤无机胶体的主要成分之一,土壤胶体的吸附作用也会影响重金属的迁移^[21], Mn 的施加可提高土壤 Eh,有利于促进土壤中锰氧化物形成,从而使土壤胶体表面的负电荷增加^[19],改变土壤中 Cd 的赋存形态,加强其对 Cd 的吸附固定,降低 Cd 的生物有效性。同时, Cd²⁺ 和 Mn²⁺ 在植物中会使用相同的载体蛋白,因此根附近的 Cd 与 Mn 存在拮抗作用,当 Cd、Mn 共存时, Mn²⁺ 会优先和细胞膜上的载体蛋白相结合,从而抑制 Cd²⁺ 在膜上的运输,减少 Cd 向植物地上部分的转运,缓解 Cd 对玉米的毒害^[26]。还有研究证明,施 Mn 有利于根表铁锰膜的的形成,从而提高对 Cd 的富集和固定,阻碍其向根系的迁移^[19]。

2.5 Cd 胁迫下不同浓度 Mn 处理对玉米不同部位亚细胞 Cd 分布的影响

Cd 在亚细胞中的分布会密切影响其对植物的危害程度。当植株受到重金属的胁迫时,细胞壁会与重金属离子结合或形成液泡区隔化,使重金属成为较低活性的解毒形态^[27]。由图5可知,总体看,在玉米籽粒、叶、茎和根中,其亚细胞各组分的 Cd 所占比例均表现为细胞壁>细胞器>可溶部分; Mn1 和 Mn2 处理

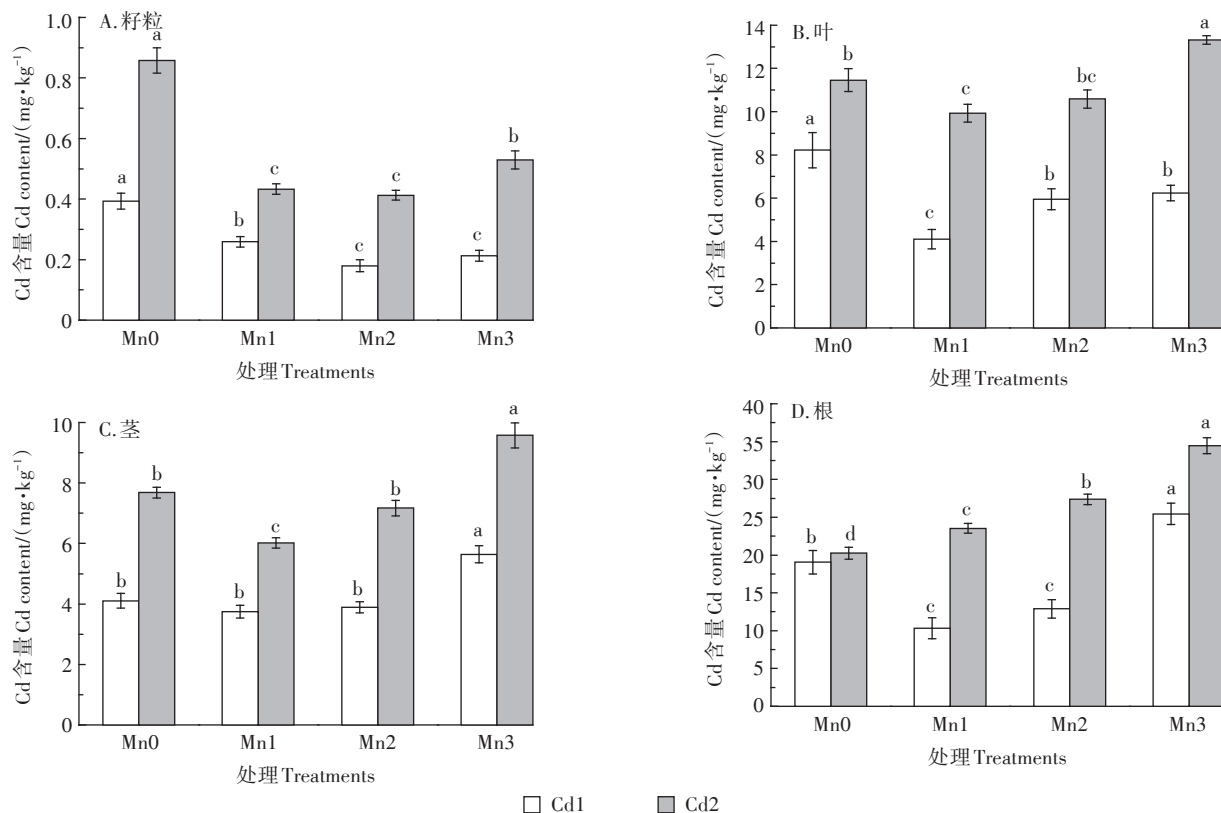


图3 Mn处理对玉米籽粒、叶、茎以及根吸收Cd的影响

Figure 3 Effects of Mn treatments on Cd uptake by grains, leaves, stems and roots of maize

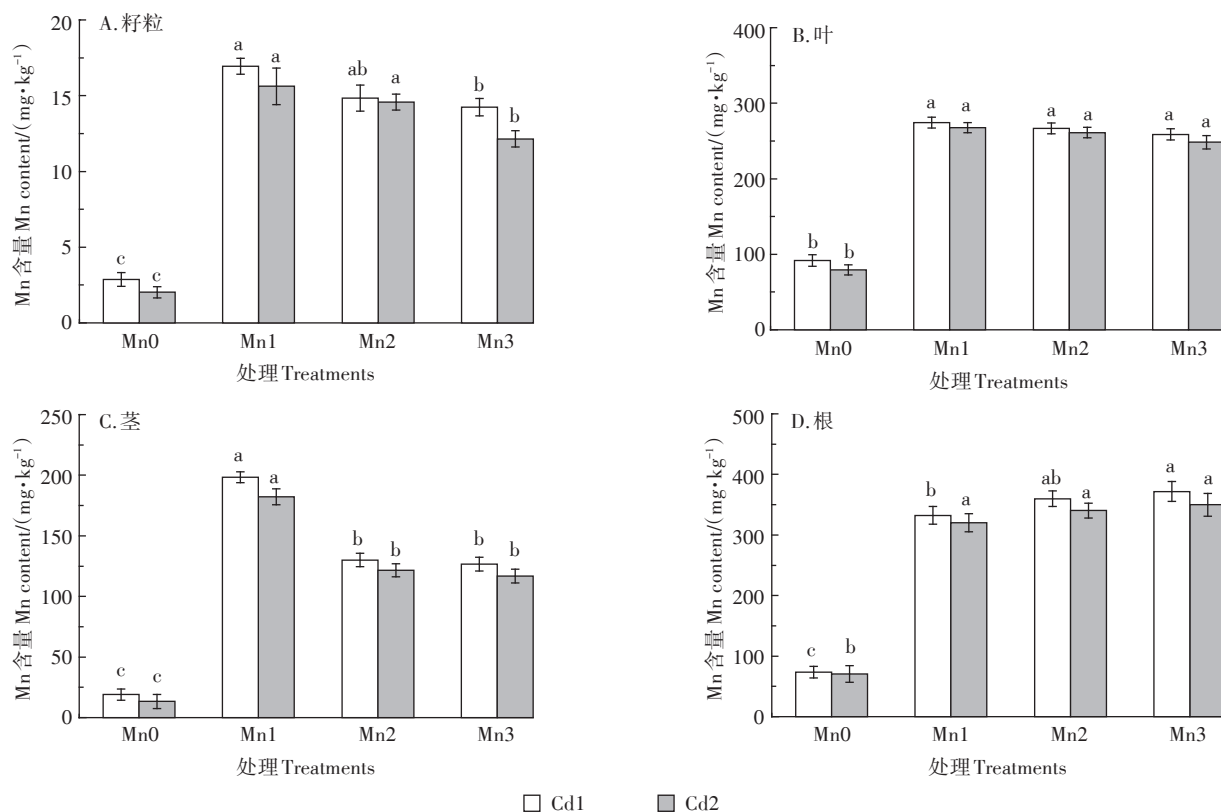
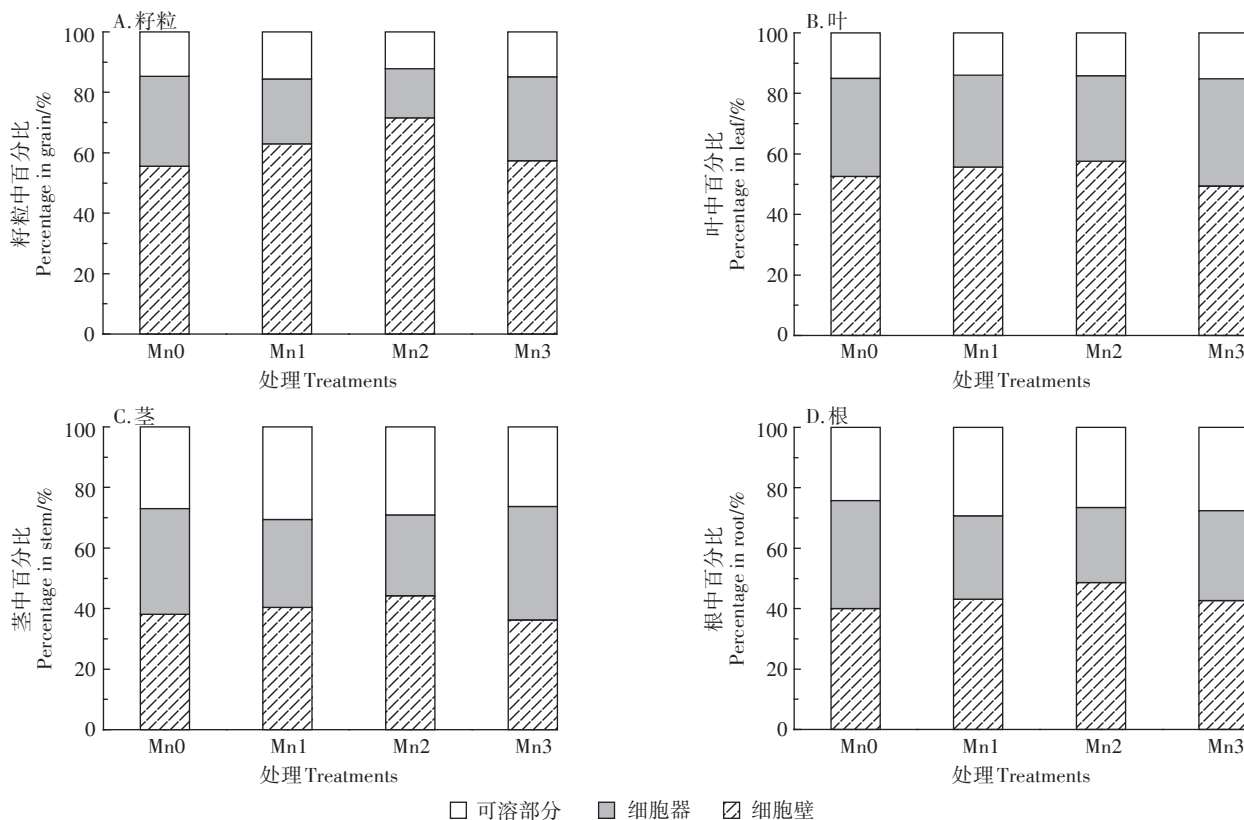


图4 Mn处理下玉米籽粒、叶、茎以及根对Mn的吸收

Figure 4 Mn uptake by maize grains, leaves, stems and roots under Mn treatments

图5 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤中玉米不同部位亚细胞Cd分布Figure 5 The distribution of subcellular Cd in different parts of maize in $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd contaminated soil

下,细胞壁中Cd的比例与Mn0相比分别增加了3.19%~15.96%,在细胞器中的比例与Mn0相比分别降低了2.12%~10.73%。由图6可知,在玉米籽粒和根中,大部分Cd存在于细胞壁,可溶部分的Cd含量最低;而在叶和茎中,Cd在细胞器中的含量最低。

从本研究结果可知,细胞的区隔化分布在降低植物Cd毒害中发挥着重要作用。玉米不同部位中,亚细胞Cd分布存在明显的差异,其主要分布在细胞壁,其次为细胞器和可溶部分。在亚细胞水平上,液泡区隔化和细胞壁沉积被认为是两种最重要的重金属解毒机制^[27]。有研究表明,水稻不同部位的Cd主要分布在细胞壁中,而细胞器中则相对较少^[28],这和本试验研究结果相似。徐蓓等^[29]的研究也发现,施加Mn能显著提高水稻地上部分Cd在细胞壁中所占的比例,降低其在可溶部分中的比例,从而降低植物的Cd毒害。Mn的施加改变了各组分中Cd的分配比例,有效提高了细胞壁中亚细胞Cd的比率,而细胞壁作为重金属离子进入植株的第一道屏障,其上的分子如多糖、蛋白质分子,拥有大量亲金属离子的配位基团(如醛基、氨基、羟基、羧基等),这些金属配位基团可以与细胞内的重金属离子相结合,使重金属离子的跨膜转

运减少^[30],从而降低细胞内重金属的浓度,减少重金属毒性。同时Mn进入植物体内后会形成高价态的锰氧化物附着在细胞壁上,从而有效增强细胞壁对Cd的固持^[31]。Cd在细胞器中比例的降低可能是由于进入到植物体内的大部分Cd被细胞壁所固持或者积聚在空液泡中,增强了细胞质的区隔化作用,从而可以有效抵御高浓度的Cd进入细胞器组分,抵抗Cd的迁移和转运,减轻Cd对细胞的伤害,维持植物的正常生理代谢功能^[32]。 Mn^{2+} 和 Cd^{2+} 具有相似的理化性质,使得它们可能具有相同的运输蛋白,在载体蛋白结合或者共用相关离子通道方面会存在一定的竞争关系^[32]。本研究表明可溶部分的Cd所占比例最低,说明细胞中的 Mn^{2+} 和 Cd^{2+} 在转运蛋白的结合上有明显的拮抗作用,Cd在细胞可溶组分中比例的降低可以有效减轻细胞的Cd毒害。

3 结论

(1)施Mn可以促进铁锰氧化物结合态Cd的形成,从而降低可交换态Cd含量。在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 两种Cd污染土壤中, $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的Mn处理下可交换态Cd含量降幅最大,分别为9.4%和30.81%;

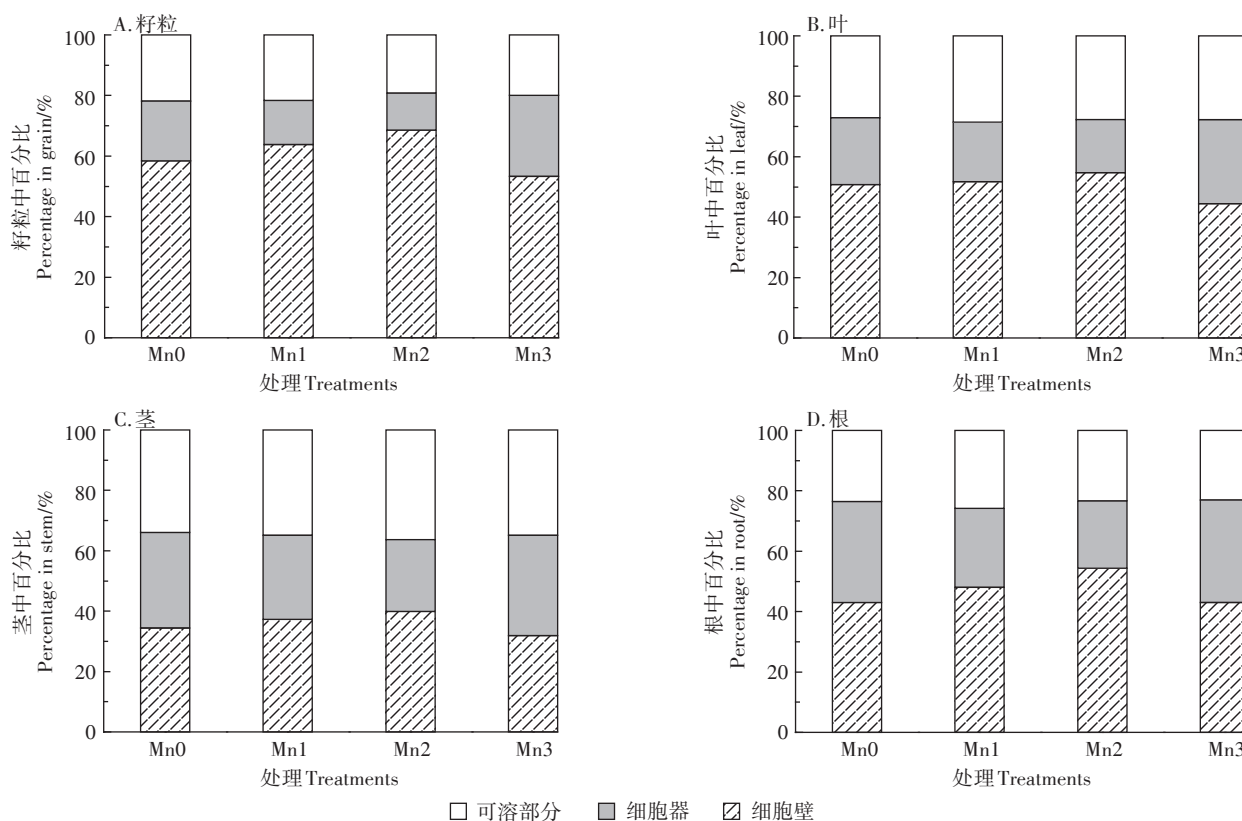


图6 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤中玉米不同部位亚细胞Cd分布

Figure 6 The distribution of subcellular Cd in different parts of maize in $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd contaminated soils

相同 Mn 施用量下,随土壤 Cd 浓度的增加,可交换态 Cd 含量降幅增大。

(2)适量的 Mn 促进了玉米根系的生长,增加了玉米各部位生物量和产量,但高量的 Mn 会抑制根系的生长,对植株产生一定的毒害,导致玉米减产。

(3)施 Mn 可以阻碍 Cd 向根系迁移,从而降低玉米各部位对 Cd 的吸收和转运;同时 Mn 还提高了根部细胞壁对 Cd 的固持,降低了细胞器中 Cd 的所占比例,有效抑制玉米体内的 Cd 活性。随着 Cd 浓度的增加, Mn 对玉米地上部 Cd 吸收的抑制作用也增强。

参考文献:

- [1] SHI L, GUO Z H, PENG C, et al. Immobilization of cadmium and improvement of bacterial community in contaminated soil following a continuous amendment with lime mixed with fertilizers: A four-season field experiment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171: 425-434.
- [2] HAJEB P, SLOTH J J, SHAKIBAZADEH S, et al. Toxic elements in food: Occurrence, binding, and reduction approaches[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food*, 2014, 13(4): 457-472.
- [3] HU Y M, ZHANG P, YANG M, et al. Biochar is an effective amendment to remediate Cd-contaminated soils: A meta-analysis[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(11): 3884-3895.
- [4] 纪艺凝, 徐应明, 王农, 等. 鱼骨粉对土壤 Cd 污染钝化修复效应及其理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 312-319. JI Y N, XU Y M, WANG N, et al. Effect of fish bone meal on immobilization remediation of cadmium contaminated soil and its physiochemical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 312-319.
- [5] LI P, WANG X X, ZHANG T L, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4): 449-455.
- [6] 张萍, 宋锋惠, 史彦江. 树干注射锰肥对新疆灰枣生长和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 1018-1024. ZHANG P, SONG F H, SHI Y J. Effects of trunk injection of Mn on yield and quality of *Ziziphus Jujuba* cv. Huizao in Xinjiang[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(4): 1018-1024.
- [7] MARU K K, CYRIL B. Potassium and manganese fertilization and the effects on millet seed yield, seed quality, and forage potential of residual stalks[J]. *Agricultural Sciences*, 2018, 9(7): 888-900.
- [8] 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.
- [9] 侯秀, 王祖伟. 铁锰氧化物添加对土壤镉有效态及生物效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2313-2317. HOU X,

- WANG Z W. Influence of Fe-Mn oxides in contaminated soil on bio-availability and effective form of Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2313-2317.
- [10] SUDA A, MAKINO T. Functional effects of manganese and iron oxides on the dynamics of trace elements in soils with a special focus on arsenic and cadmium: A review[J]. *Geoderma*, 2016, 270:68-75.
- [11] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(14):4289-4296. ZHOU X Y, FENG W Q, QIN Y S, et al. Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14):4289-4296.
- [12] XU W, LAN H C, WANG H J, et al. Comparing the adsorption behaviors of Cd, Cu and Pb from water onto Fe-Mn binary oxide, MnO₂, and FeOOH[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, 9(3):385-393.
- [13] ZUZANA M, MICHAEL K, HANA S, et al. Evaluating the potential of three Fe- and Mn-(nano) oxides for the stabilization of Cd, Cu and Pb in contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146(15):226-234.
- [14] 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.
- [15] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particular trace elements[J]. *Environmental Technology*, 1979, 15(1):844-851.
- [16] 史静, 潘根兴. 外加镉对水稻镉吸收、亚细胞分布及非蛋白巯基含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(5):853-859. SHI J, PAN G X. Effects of Cd-spiking treatment on Cd accumulation, subcellular distribution and content of nonprotein thiols in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(5):853-859.
- [17] ZHANG G X, GUO X F, ZHAO Z H, et al. Effects of biochars on the availability of heavy metals to ryegrass in an alkaline contaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218:513-522.
- [18] 顾明华, 李志明, 陈宏, 等. 施锰对土壤锰氧化物形成及镉固定的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2):360-368. GU M H, LI Z M, CHEN H, et al. Effects of manganese application on the formation of manganese oxides and cadmium fixation in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2):360-368.
- [19] CHEN H, LEI J, TONG H, et al. Effects of Mn(II) on the oxidation of Fe in soils and the uptake of cadmium by rice(*Oryza sativa*)[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, 230(8):190.
- [20] BRADL H B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2004, 277(1):1-18.
- [21] 张健平, 吴玉环, 刘鹏, 等. 锰对美洲商陆和小飞蓬根系形态及根系分泌物的影响[J]. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 33(3):322-326. ZHANG J P, WU Y H, LIU P, et al. The effects of manganese stress on root exudates and root morphology of *Phytolacca americana* and *Comynza canadensis*[J]. *Journal of Zhejiang Normal University(Natural Science Edition)*, 2010, 33(3):322-326.
- [22] 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.
- [23] 马光恕, 廉华, 林晓影, 等. 硫酸锰叶面喷施对马铃薯根系生长的影响[J]. *吉林农业*, 2010(7):44-45. MA G S, LIAN H, LIN X Y, et al. Effect of foliar spraying manganese sulfate on root growth of potato[J]. *Jilin Agricultural*, 2010(7):44-45.
- [24] ZHAO Y, WU J, SHANG D, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in the edible seaweed, *Porphyra yezoensis*[J]. *Food Chemistry*, 2015, 168:48-54.
- [25] 覃都, 陈铭学, 周蓉, 等. 锰-镉互作对水稻生长和植株镉、锰含量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2010, 24(2):189-195. QIN D, CHEN M X, ZHOU R, et al. Effects of interaction between manganese and cadmium on plant growth and contents of cadmium and manganese in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24(2):189-195.
- [26] 陶雪莹, 徐应明, 王林, 等. 喷施硫酸锰和硫酸锌对小麦籽粒镉、锌生物可给性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10):2181-2189. TAO X Y, XU Y M, WANG L, et al. Effects of foliar application of manganese sulfate and zinc sulfate on bioaccessibility of cadmium, manganese, and zinc in wheat grains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2181-2189.
- [27] HE J Y, ZHU C, REN Y F, et al. Uptake, subcellular distribution, and chemical forms of cadmium in wild-type and mutant rice[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3):371-377.
- [28] 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 sub-cell distribution in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):320-326.
- [29] 徐薇, 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 Y, YANG Y X, LI W H, 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] 杨亚洲, 张春华, 郑青松, 等. 碱蓬和滨藜对镉和钠吸收、转运及亚细胞分布特性的比较研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4):619-626. YANG Y Z, ZHANG C H, ZHENG Q S, et al. Uptake, translocation and subcellular distribution characteristics of cadmium and sodium in *Suaeda salsa* and *Atriplex triangularis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):619-626.
- [31] RAMOS I, ESTEBAN E, LUCENA J J, et al. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca* sp. Cd-Mn interaction[J]. *Plant Science*, 2002, 162:761-767.
- [32] 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 X X, XU Y M, WANG L, 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.