

施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响

姚澄, 周天宇, 易超, 史高玲, 沈文忠, 张绪美, 陈未, 樊广萍, 高岩

引用本文:

姚澄, 周天宇, 易超, 史高玲, 沈文忠, 张绪美, 陈未, 樊广萍, 高岩. 施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1955–1965.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1489>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小麦秸秆还田量对土壤Cd有效性及水稻Cd亚细胞分布的影响

黄界颖, 武修远, 佟影影, 曹森, 高越, 杨卉艳

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1503–1511 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0051>

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

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1635–1643 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0106>

镉与微量元素在小麦吸收过程中的相互影响

姚晨, 贾睿琪, 腊贵晓, 王宁, 陆夏梓, 郭子昂, 龚子阳, 赵艳阳, 郭虹好, 李烜桢

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1175–1183 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0866>

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, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1872–1881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0577>

镉在小麦各部位的富集和转运及籽粒镉含量的预测模型

刘克, 和文祥, 张红, 曹莹菲, 代允超, 吕家珑

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1441–1448 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚澄, 周天宇, 易超, 等. 施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1955–1965.

YAO C, ZHOU T Y, YI C, et al. Effects of manganese fertilizer on rhizosphere soil manganese availability and cadmium uptake and transport by wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 1955–1965.



开放科学 OSID

施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响

姚澄^{1,2,3}, 周天宇^{2,3}, 易超^{1,2,3}, 史高玲^{2,3}, 沈文忠⁴, 张绪美⁴, 陈未^{2,3}, 樊广萍^{2,3*}, 高岩^{2,3*}

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 4. 太仓市农业技术推广中心, 江苏 太仓 215400)

摘要:为探究施用锰肥对重度污染土壤中小麦Cd吸收的影响, 采用盆栽试验, 研究了施加不同浓度(13、26、66 mg·kg⁻¹)和不同种类(常规锰肥、缓释锰肥)锰肥对根际土壤Cd、Mn有效性和小麦Cd、Mn吸收转运的影响。结果表明:施用锰肥可显著增加土壤有效态Mn含量, 且缓释锰肥在小麦生长后期对土壤Mn的供给显著高于常规锰肥。与对照(不施锰肥)相比, 常规锰肥在小麦生长前期使土壤有效态Mn含量增加了8%~61%; 缓释锰肥在小麦生长后期使土壤中有效态Mn含量增加了6%~105%。施用常规锰肥显著增加了小麦拔节期根部Mn含量, 而施用缓释锰肥在小麦灌浆期和成熟期显著增加了小麦根部Mn含量。施用锰肥处理显著降低了小麦拔节期和孕穗期根部Cd含量和成熟期地上部Cd含量。所有处理中, 仅施用中、高浓度常规锰肥和中浓度缓释锰肥显著降低了小麦籽粒中Cd含量, 降幅分别为14%、27%和17%。相关性分析显示, 在小麦全生育期, 小麦根部Mn含量与地上部Cd含量、小麦根部向地上部Cd转移系数均呈负相关关系。研究表明, 施用锰肥可通过增加土壤有效态Mn含量, 促进小麦根部Mn吸收, 从而抑制小麦根部Cd吸收, 减少小麦根部Cd向地上部的转运。在中、重度Cd污染土壤中, 单施锰肥不能保证小麦的安全生产, 需要同时采取更多有效措施或综合农艺技术, 进一步降低Cd在小麦籽粒中的积累。

关键词:小麦; 镉; 锰肥; 镉吸收转运

中图分类号: S512.1; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)09-1955-11 doi:10.11654/jaes.2021-1489

Effects of manganese fertilizer on rhizosphere soil manganese availability and cadmium uptake and transport by wheat

YAO Cheng^{1,2,3}, ZHOU Tianyu^{2,3}, YI Chao^{1,2,3}, SHI Gaoling^{2,3}, SHEN Wenzhong⁴, ZHANG Xumei⁴, CHEN Wei^{2,3}, FAN Guangping^{2,3*}, GAO Yan^{2,3*}

(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 4. Taicang Agricultural Technology Extension Center, Taicang 215400, China)

Abstract: To explore the effect of manganese(Mn) fertilizer on cadmium(Cd) absorption by wheat in heavily polluted soil, pot experiments were conducted to study the effect of different concentrations of manganese fertilizers (13, 26 mg·kg⁻¹, and 66 mg·kg⁻¹) and different types of manganese fertilizers[conventional manganese fertilizer(CMF), slow-release manganese fertilizer(SMF)] on rhizosphere soil Cd and Mn

收稿日期: 2021-12-27 录用日期: 2022-05-31

作者简介: 姚澄(1997—), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 从事土壤重金属修复研究。E-mail: 13588262031@163.com

*通信作者: 樊广萍 E-mail: fanguangping@jaas.ac.cn; 高岩 E-mail: ygao@jaas.ac.cn

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)1010); 太仓市重点研发计划-社会发展项目(TC2021SF02)

Project supported: Agricultural Independent Innovation Fund of Jiangsu Province (CX(20)1010), Key Research and Development Program of Taicang-Social Development Program (TC2021SF02)

availability and Cd and Mn uptake and transport in wheat. The results showed that the application of Mn fertilizer could significantly increase the content of available soil Mn, and the supply of Mn to soil by SMF in the later stage of wheat growth was significantly higher than that of CMF. Compared with the control, CMF increased the content of available soil Mn by 8%~61% in the early stage of wheat growth; SMF increased the content of available soil Mn 6%~105% in the later stage of wheat growth. The application of CMF significantly increased the Mn content of wheat roots at the elongation stage. In contrast, the application of SMF significantly increased the Mn content of wheat roots at the grain-filling and mature stages of wheat. Mn fertilizer treatment significantly decreased the Cd content in roots at the elongation and booting stages and shoot Cd content at the maturity stage. Among all the treatments, only the application of medium- and high-concentration CMF and medium-concentration SMF significantly reduced the Cd content in wheat grains by 14%, 27%, and 17%, respectively. Correlation analysis showed that Mn content in wheat roots was negatively correlated with Cd content in the shoots and the Cd transfer coefficient from wheat roots to shoots during the entire growth period of wheat. The above results showed that the application of Mn fertilizer could increase the content of available Mn in soil and promote the uptake of Mn in the roots of wheat, thereby inhibiting the uptake of Cd by the roots of wheat and reducing the transport of Cd from wheat roots to shoots. In moderate and severe Cd-contaminated soils, the application of Mn fertilizer alone cannot guarantee the safe production of wheat, and more effective measures or comprehensive agronomic techniques need to be taken at the same time to reduce the accumulation of Cd in wheat grains further.

Keywords: wheat; cadmium(Cd); manganese fertilizer; Cd uptake and translocation

镉(Cd)是我国农田土壤污染最严重的重金属元素之一^[1]。根据2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国19%的耕地土壤受到污染,其中Cd为首要污染物,其污染点位超标率达7.00%,每年生产的Cd含量超标农产品已超过 1.46×10^9 kg,形势十分严峻^[2-3]。小麦是我国仅次于水稻和玉米的主要粮食作物,在粮食生产中具有重要地位。近年来,我国一些小麦主产区的Cd污染问题引起了公众的广泛关注^[4]。例如,河南省开封市、新乡市部分区域小麦籽粒Cd超标率可达100%^[5]。长期Cd胁迫会影响小麦的正常生长,导致减产^[6]。小麦对Cd的吸收较为敏感,其根系对Cd向地上部的转运能力远高于水稻,平均是水稻的4倍左右^[7],因此极易通过根部吸收大量Cd,并将Cd转移到籽粒中,从而对我国居民身体健康构成严重威胁^[8]。然而,目前研发的Cd污染农田安全利用技术多针对水稻,Cd污染麦田的安全利用问题未受到足够重视,降低小麦体内Cd积累面临极大挑战^[9]。因此,亟待研发高效、经济、适用范围广的小麦降Cd技术。

锰(Mn)是植物必需的微量元素之一,主要以 Mn^{2+} 的形式被植物吸收,并参与植物体内多种生理过程^[10-11]。Mn与Cd在土壤环境及植物吸收转运过程中存在一定的交互作用。在土壤环境方面,施用锰肥可以提高土壤中有效态Mn的含量,减少小麦根系对Cd的吸收转运^[12]。在植物吸收转运方面,已有研究推测施用锰肥降低植物Cd吸收转运的主要机理有两个:一是通过Mn、Cd之间的拮抗作用抑制作物对Cd的吸收转运,Cd会借助Mn元素的转运蛋白或通道

(NRAMP和ZIP等)进入到植物体内^[13],因此Mn、Cd在作物体内吸收转运过程中常会发生拮抗作用^[14];二是Mn能够通过参与改善作物的氧化还原过程与呼吸作用,提高植物中超氧化物歧化酶等抗氧化物酶的含量,从而缓解Cd的毒害作用^[15]。目前,有关施Mn对植物吸收Cd的影响已有诸多报道,但是大多数集中在水稻、玉米、油菜和超积累作物^[16-18],关于小麦体内Cd/Mn拮抗作用及施用硫酸锰对小麦Cd吸收的影响研究相对较少。另外,缓控释肥料可保证功能元素肥料的长效释放,也是未来现代农业的发展方向^[19],而目前关于缓控释功能肥料对小麦Cd吸收的影响研究未见报道。

基于此,本研究通过盆栽试验,以小麦为研究对象,探究施用不同浓度的常规锰肥和缓释锰肥对小麦不同生育期根际土壤中有效态Cd/Mn含量以及小麦各部位对Cd/Mn吸收转运的影响,为探明Mn拮抗小麦吸收转运Cd的效果、潜力以及如何优化相关参数提供理论依据,同时为小麦安全生产技术的进一步提升提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自江苏省常熟市两处相邻重金属Cd污染农田,两处农田土壤Cd污染浓度分别为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $7.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤类型为黄泥土。取表层0~20 cm土壤,经风干去除杂物后,将低Cd污染土壤与高Cd污染土壤按质量比3:1充分混匀,过孔径2 mm筛备用。混匀后的土壤基本理化性质见表1。供试小麦品

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土壤pH Soil pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	总Cd Total Cd/ (mg·kg ⁻¹)	总Mn Total Mn/ (mg·kg ⁻¹)
6.0	29.1	1.6	70.8	15.1	170	2.0	218

种为扬麦16,属于长江中下游麦区主推品种。

供试锰肥分别为常规硫酸锰粉末($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)和缓释硫酸锰颗粒。缓释硫酸锰由硫酸锰颗粒(含量98%,购自山东金润梓生物科技有限公司)包膜而成。包膜材料为水性丙烯酸酯,包膜量为15%,另有包膜量为15%的缓释尿素,均由江苏艾萨斯新型肥料工程技术有限公司提供。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,将土壤风干后装入塑料盆中,每盆5.0 kg。基肥随土壤装盆时施入,每盆加入4 g氮磷钾复合肥(N 、 P_2O_5 、 K_2O 比例为15:15:15)和0.39 g缓释尿素,至盆栽试验结束不再追肥。Mn以常规硫酸锰粉末和包膜缓释硫酸锰颗粒的形式加入土壤,在表层5~10 cm土壤处充分混匀。设置Mn的添加浓度为13、26、66 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别记作Mn1、Mn2、Mn3(常规硫酸锰粉末)和SMn1、SMn2、SMn3(包膜缓释硫酸锰颗粒),未施加锰肥的处理作为对照,记作CK。试验共设7个处理,每个处理重复12次。小麦于2021年1月播种,每盆10株,一个月后间苗留8株,生长期定量浇水。

1.3 样品采集与处理

在小麦拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期分别采集7个处理、3个重复共21盆小麦植株和土壤样品。通过抖落法收集小麦根部附近的土壤,并按不同时期、不同处理分开进行风干、磨细,过10目筛后置于塑料封口袋中备用。将采集的植株样品分为地上部、根部和成熟期的籽粒,样品用自来水和去离子水清洗后置于烘箱105℃下杀青30 min,65℃烘干至恒质量,测定各部位干物质量。用不锈钢粉碎机粉碎烘干样品,过0.25 mm筛后供分析测试。

1.4 测试指标及方法

土壤(土水比1:2.5)pH采用pH计(梅特勒托利多,FE28,德国)测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用碳酸氢钠提取,钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用乙酸铵提取法测定。土壤有效态Cd、Mn含量采用DTPA

(二乙基三胺五乙酸)浸提法测定;土壤Cd、Mn含量采用王水消解,小麦各部位Cd含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比5:1)消解,土壤和植株消化液以及土壤提取液中的Cd、Mn含量采用电感耦合等离子体质谱(PerkinElmer, NexION-2000,美国)测定。

1.5 数据处理

采用Excel 2013进行数据统计处理和制图,使用SPSS 18.0进行统计分析。处理间差异显著性采用单因素方差分析(ANOVA),Duncan法检验。采用Pearson相关系数表征土壤有效态Mn含量与各检测指标之间的相关性。

小麦根部-地上部Cd转移系数=小麦地上部Cd含量/小麦根部Cd含量

小麦地上部-籽粒Cd转移系数=小麦籽粒Cd含量/小麦成熟期地上部Cd含量

2 结果与分析

2.1 施用锰肥对小麦生长的影响

小麦拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期地上部(不包含籽粒)干质量和根部干质量以及成熟期籽粒干质量变化如表2所示。施用不同浓度和不同种类锰肥对小麦生长的影响存在一定差异。与CK相比,常规锰肥对小麦拔节期的生物量未产生显著影响;在小麦灌浆期,Mn1、Mn2处理显著增加了小麦地上部生物量,相比CK增加了21%和17%;在成熟期,常规锰肥对小麦地上部生物量的提升效应减弱。Mn3处理自孕穗期开始抑制小麦根系的生长,根系生物量呈现显著降低趋势;而SMn3处理在成熟期显著增加了根部生物量,增幅为27%,但SMn3对小麦不同生育期的地上部生物量影响不显著。SMn1、SMn2处理在小麦拔节期、孕穗期和成熟期均显著降低小麦地上部生物量,但在灌浆期,与CK相比小麦地上部、根部生物量均无显著差异,生物量较前两个时期提升较快。

与CK相比,常规锰肥处理均显著增加了小麦籽粒质量,增幅分别为12%、10%和9%,但随着Mn浓度的增加,籽粒质量增幅并未增加。SMn1、SMn2处理对小麦籽粒质量无显著影响,但SMn3处理显著降低

表2 施用锰肥对小麦生长的影响(g·盆⁻¹)
Table 2 Effects of manganese fertilizer treatments on the growth of wheat (g·pot⁻¹)

处理 Treatment	拔节期Elongation stage		孕穗期Booting stage		灌浆期Filling stage		成熟期Maturity stage		
	地上部干质量 Shoot dry weight	根干质量 Root dry weight	地上部干质量 Shoot dry weight	根干质量 Root dry weight	地上部干质量 Shoot dry weight	根干质量 Root dry weight	茎叶干质量 Shoot dry weight	根干质量 Root dry weight	籽粒干质量 Grain dry weight
CK	11.30±2.24a	1.37±0.15a	40.88±2.16a	2.83±0.20a	50.48±3.76b	3.60±0.08a	63.00±3.63a	3.32±0.20b	14.90±0.85b
Mn1	11.80±1.35a	1.16±0.03ab	29.12±0.08c	2.16±0.24b	60.92±5.68a	3.16±0.68ab	56.53±4.02b	1.84±0.08d	16.71±0.15a
Mn2	9.73±0.72ab	1.09±0.18ab	28.40±4.66c	2.28±0.36b	59.08±5.40a	3.72±0.44a	59.03±0.92ab	2.64±0.21c	16.42±0.16a
Mn3	11.73±0.87a	1.17±0.12ab	31.42±4.80bc	2.24±0.24b	50.88±1.28b	2.64±0.16b	55.04±3.00bc	2.60±0.20c	16.17±0.40a
SMn1	7.44±0.72c	1.28±0.28ab	31.84±3.52bc	2.20±0.04b	54.48±2.64ab	3.80±0.36a	51.00±2.64cd	3.24±0.28b	14.60±0.98b
SMn2	8.25±1.14bc	1.01±0.14b	22.56±2.44d	1.72±0.20b	46.51±5.56b	3.12±0.32ab	49.03±2.58d	3.40±0.12b	14.51±0.15b
SMn3	9.73±1.01ab	1.19±0.02ab	35.64±1.88ab	2.84±0.52a	49.89±4.24b	3.20±0.16ab	58.76±0.56ab	4.20±0.49a	11.29±0.50c

注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05).

了小麦籽粒质量,比CK降低了24%。

2.2 施用锰肥对土壤pH的影响

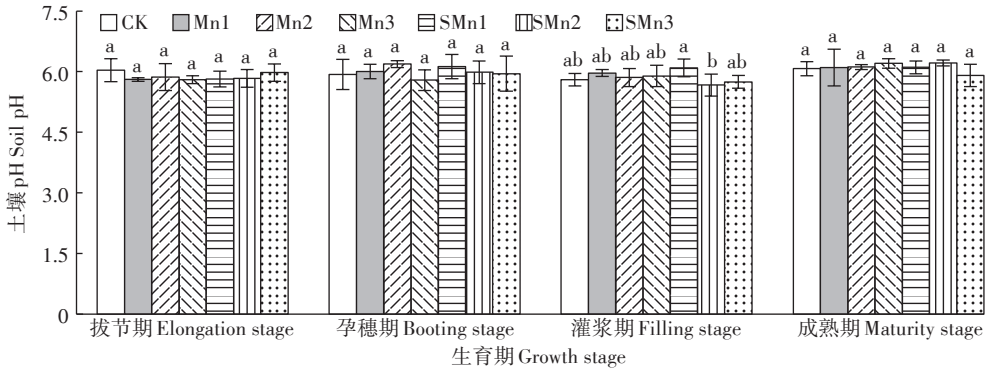
由图1可以看出,在小麦各个生育期,施用锰肥对土壤pH均未产生显著影响,但施用硫酸锰肥有降低土壤pH的效应,且常规锰肥对土壤pH的降低效果集中在小麦生长前期,缓释锰肥对土壤pH的降低效果集中在小麦生长后期。在小麦拔节期,施用常规锰肥使土壤pH与CK相比降低了0.17~0.24;在小麦灌浆期,SMn2、SMn3处理使土壤pH较CK降低了0.05~0.13。

2.3 施用锰肥对土壤Cd、Mn有效性的影响

小麦不同生育期土壤有效态Cd含量的变化如图2a所示。施用锰肥在小麦拔节期与孕穗期对土壤有效态Cd含量无显著影响。在小麦生长后期,施用常规锰肥降低了土壤有效态Cd含量,而施用缓释锰肥

则增加了土壤有效态Cd含量。在小麦灌浆期,SMn3处理显著增加了土壤有效态Cd含量,比CK增加了5%。在小麦成熟期,与CK相比,Mn2、Mn3处理显著降低了土壤中有效态Cd含量,降幅均为8%。

施用锰肥后小麦不同生长期土壤有效态Mn含量的变化如图2b所示。CK处理下,土壤有效态Mn含量随小麦的生长逐渐降低。施用常规锰肥在小麦生长前期显著增加了土壤中有效态Mn含量,但在小麦生长后期土壤中有效态Mn含量呈现下降趋势。与CK相比,Mn1、Mn3处理分别使拔节期和孕穗期土壤有效态Mn含量增加了57%、52%和45%、61%。施用缓释锰肥在小麦生长前期对土壤有效态Mn的供给明显低于常规锰肥,但SMn2、SMn3处理大幅增加了小麦灌浆期和成熟期土壤有效态Mn含量,分别是CK的3.40、7.25倍和1.27、10.50倍。



不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05). The same below

图1 施用锰肥对小麦不同时期土壤pH的影响

Figure 1 Effects of manganese fertilizer on soil pH in different growth stages of wheat

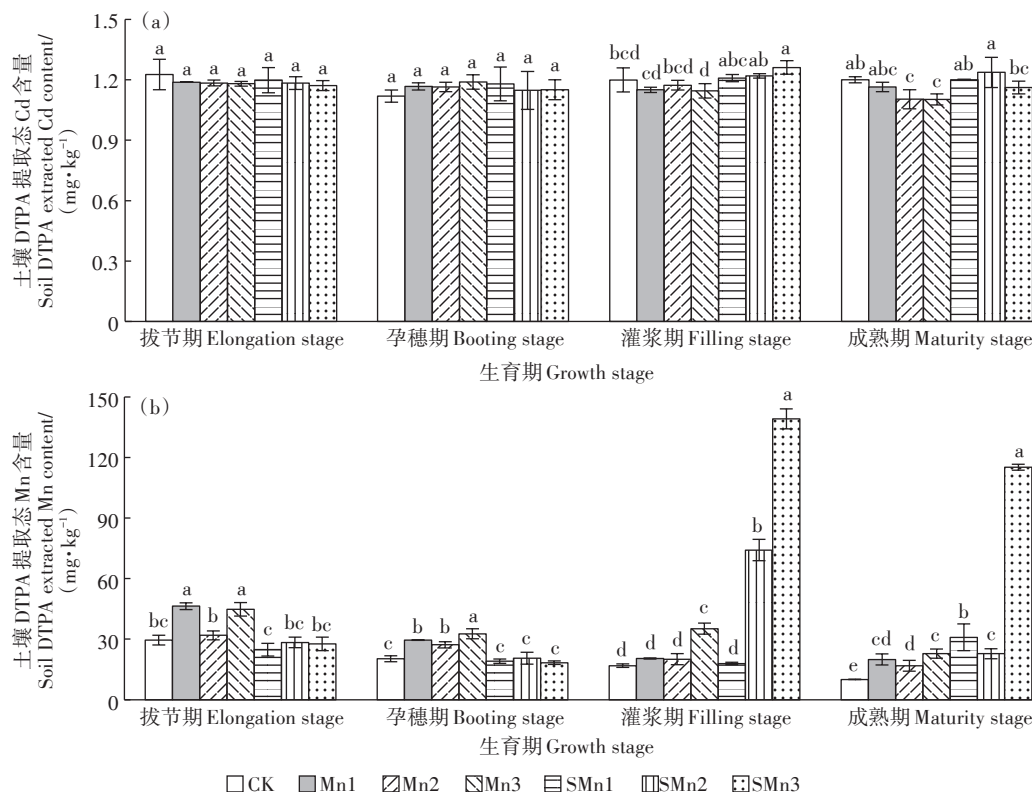


图2 施用锰肥对小麦不同时期土壤有效态Cd和Mn含量的影响

Figure 2 Effects of manganese fertilizer on soil available Cd and Mn contents in different growth stages of wheat

2.4 施用锰肥对小麦根部和地上部Cd、Mn含量的影响

小麦不同生长时期各部位Cd、Mn含量的变化如图3所示。由图3a可知,小麦根部Cd含量随着小麦生长呈下降趋势。施用常规锰肥和缓释锰肥在小麦拔节期和孕穗期均显著降低了小麦根部Cd含量,分别比CK降低了13%~33%和27%~39%。但在小麦生长后期,施用常规锰肥和缓释锰肥均增加了小麦根部Cd含量。在小麦灌浆期,仅SMn1处理显著降低了小麦根部Cd含量,比CK降低了31%;在小麦成熟期,仅Mn3处理显著降低了小麦根部Cd含量,比CK降低了32%,并且施用不同浓度缓释锰肥处理的小麦根部Cd含量均显著高于施用相应浓度常规锰肥的处理。

由图3b可知,小麦地上部Cd含量随小麦生长呈先下降后上升的趋势。地上部Cd含量在小麦拔节期时最高,灌浆期时降到最低,成熟期时又显著增加。在小麦拔节期,施用中、高浓度的常规和缓释锰肥均能显著降低小麦地上部Cd含量,其中SMn2、SMn3处理降幅最高,相比CK均降低31%。在小麦灌浆期,缓释锰肥处理使小麦地上部Cd含量相比CK显著降低了15%~26%,且缓释锰肥处理的小麦地上部Cd含量低于相应浓度常规锰肥处理。在小麦成熟期,施用常

规锰肥和缓释锰肥均显著降低了小麦地上部Cd含量,分别比CK降低了19%~43%和26%~35%,且小麦地上部的Cd含量均随施Mn量的增加呈增加趋势。

由图3c可知,CK处理下,小麦根部Mn含量随小麦生长呈下降趋势。施用常规锰肥能显著提高小麦拔节期根部Mn含量,增幅为20%~88%。在小麦生长前期,施用缓释锰肥处理的根部Mn含量低于常规锰肥处理,但能显著提高小麦灌浆期和成熟期根部Mn含量,且其对小麦根部Mn含量的影响显著高于常规锰肥处理。在小麦灌浆期和成熟期,SMn1、SMn2、SMn3处理下,小麦根部Mn含量分别为CK的1.54、3.84、4.38倍和2.48、3.78、3.24倍。

不同生育期小麦地上部Mn含量的变化如图3d所示。小麦地上部Mn含量在拔节期、孕穗期和灌浆期变化不明显,而在成熟期大幅上升。在小麦生长前期,地上部Mn含量随常规锰肥施用量的增加而增加,但仅Mn3处理在小麦孕穗期显著增加了地上部Mn含量。在小麦成熟期,施用常规锰肥和缓释锰肥均显著增加了小麦地上部Mn含量,比CK增加了47%~103%;施用缓释锰肥处理的小麦地上部Mn含量显著高于相应浓度的常规锰肥处理,且随着施用锰肥浓度

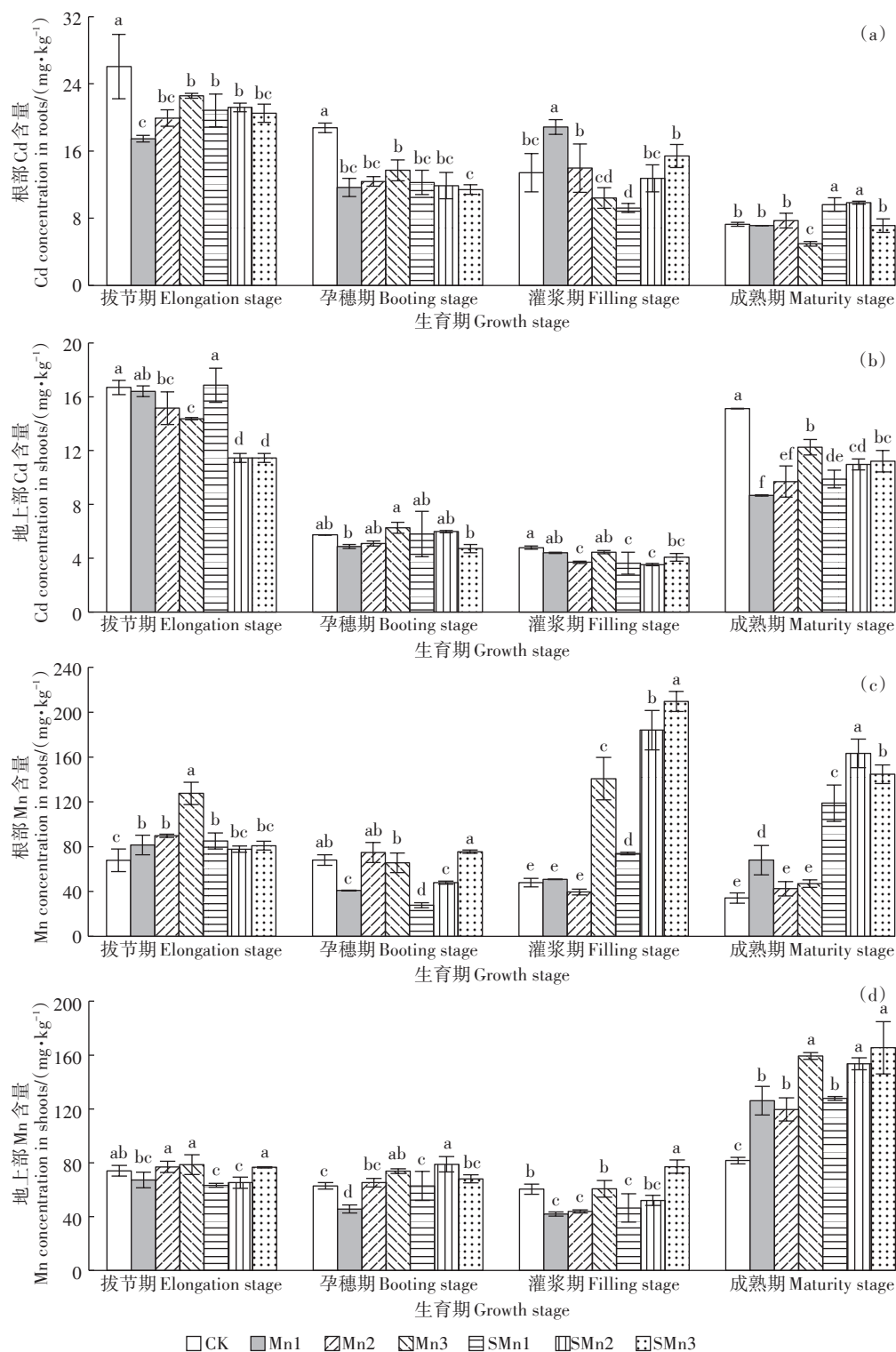


图3 施用锰肥处理对小麦各时期根部和地上部Cd和Mn含量的影响

Figure 3 Effects of manganese fertilizer application on Cd and Mn contents in roots and shoots of wheat in different growth stages

的增加而增加。

2.5 施用锰肥对小麦籽粒Cd、Mn含量的影响

小麦籽粒中Cd、Mn含量的变化如图4所示。由图4a可知,施用锰肥均能降低小麦籽粒中Cd含量,

施用常规锰肥和缓释锰肥分别使小麦籽粒Cd浓度降低了2%~27%和5%~17%。施用常规锰肥处理中,小麦籽粒中Cd含量随着Mn施用量的增加而逐渐降低。所有施锰处理中,仅Mn2、Mn3和SMn2处理显著降低

了小麦籽粒中Cd含量,分别比CK降低了14%、27%和17%。

由图4b可知,施用锰肥均显著增加了小麦籽粒中Mn含量。与CK相比,施用常规锰肥处理使小麦籽粒Mn含量增加了10%~37%,施用缓释锰肥处理小麦籽粒Mn含量增加了18%~55%。除SMn1处理中小麦籽粒Mn含量显著低于施用相应浓度常规锰肥处理外,SMn2、SMn3处理中小麦籽粒Mn含量均显著高于相应浓度常规锰肥处理。

2.6 土壤有效态Mn含量、小麦各部位Cd、Mn含量和Cd转移系数的相关性分析

对土壤有效态Mn含量与小麦各部位Cd、Mn含量和小麦根部-地上部Cd转移系数进行相关性分析,结果见表3。在小麦拔节期、灌浆期和成熟期,土壤有效态Mn含量与小麦地上部与根部Mn含量均呈正相关关系,其中灌浆期和成熟期的土壤有效态Mn含量与小麦地上部与根部Mn含量的相关性达到显著性水平($P<0.05$),尤其在小麦灌浆期,土壤有效态Mn含量与小麦根部Mn含量呈极显著正相关($P<0.01$),表明施用锰肥提高了土壤有效态Mn含量,并促进了小麦根部和地上部对Mn的吸收。在灌浆期,小麦根部

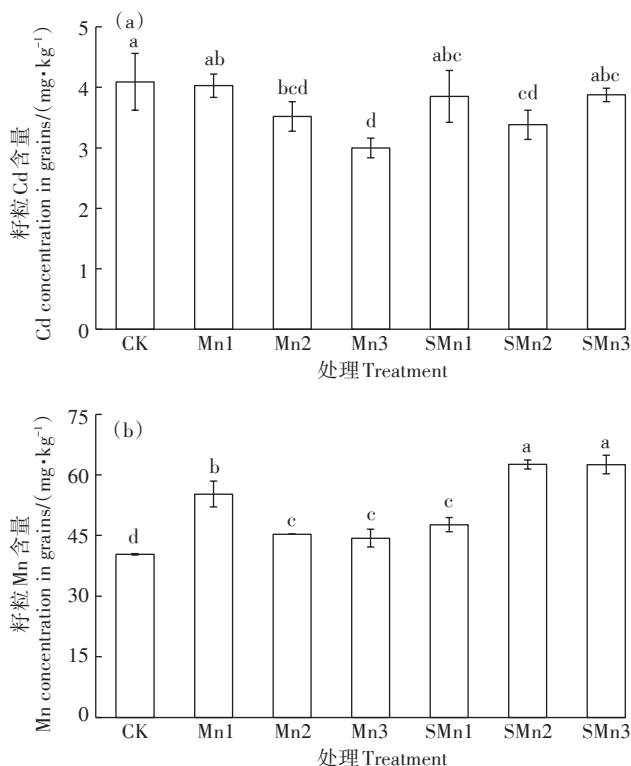


图4 施用锰肥处理对小麦籽粒Cd、Mn含量的影响

Figure 4 Effects of manganese fertilizer treatments on Cd and Mn contents of wheat grains

Mn含量与小麦地上部和根部Cd含量呈负相关关系;在小麦成熟期,土壤有效态Mn含量与小麦地上部和根部Cd含量均呈负相关关系,且小麦地上部Mn含量与小麦根部Cd含量呈负相关关系。在小麦4个生育期,根部Mn含量均与小麦地上部Cd含量和根部-地上部Cd转移系数呈负相关关系,表明施用锰肥在促进小麦根部Mn吸收的同时,可以拮抗小麦地上部对Cd的吸收。但在成熟期,小麦根部Mn含量与根部Cd含量呈极显著正相关($P<0.01$),通过分析小麦籽粒Cd含量与小麦地上部Mn含量以及和小麦地上部-籽粒Cd转移系数的相关性(图5),发现小麦籽粒Cd含量与小麦地上部Mn含量呈显著负相关关系($P<0.05$),与小麦地上部-籽粒Cd转移系数呈显著正相关关系($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 施用锰肥对小麦生物量的影响

Mn是植物生长发育必需的微量元素,主要以 Mn^{2+} 的形式被植物吸收。在本试验中,施用锰肥对小麦生长没有明显的促进作用,特别是缓释锰肥处理对小麦

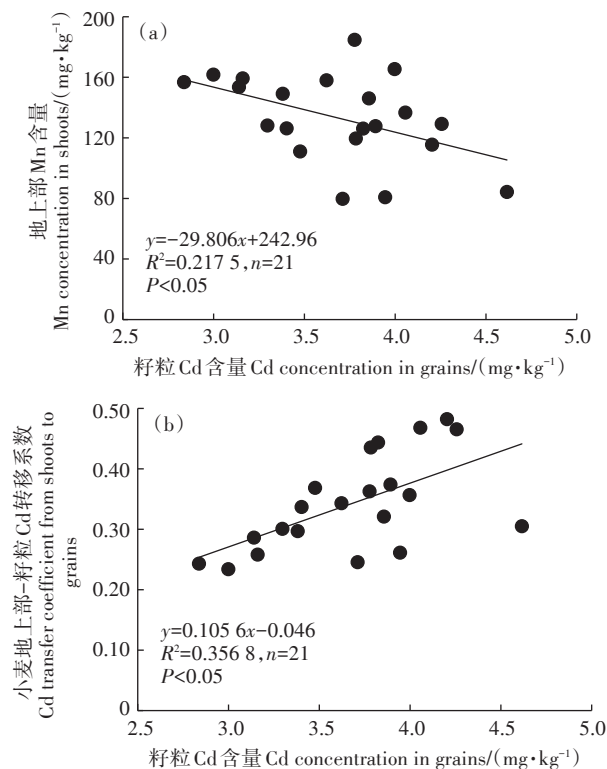


图5 小麦籽粒Cd含量与成熟期小麦地上部Mn含量、地上部-籽粒Cd转移系数的相关性分析

Figure 5 Correlation analysis of wheat grain Cd content with aboveground Mn content and Cd transfer coefficient from shoots to grains in mature wheat

表 3 土壤有效态 Mn 含量与小麦各部位 Cd、Mn 含量和根部-地上部 Cd 转移系数的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between soil available Mn content, wheat Cd, Mn content and Cd transfer coefficient from roots to shoots

生育期 Growth stage	指标 Index	土壤有效态 Mn 含量 Soil available Mn content	地上部 Mn 含量 concentration in shoots	根部 Mn 含量 Mn concentration in roots	地上部 Cd 含量 Cd concentration in shoots	根部 Cd 含量 Cd concentration in roots	根部-地上部 Cd 转移系数 Cd transfer coefficient from roots to shoots
拔节期 Elongation stage	土壤有效态 Mn 含量 Soil available Mn content	1	0.201	0.520*	0.180	-0.282	0.388
	地上部 Mn 含量 Mn concentration in shoots		1	0.283	-0.124	0.347	-0.338
	根部 Mn 含量 Mn concentration in roots			1	-0.063	-0.105	-0.011
	地上部 Cd 含量 Cd concentration in shoots				1	0.116	0.741**
	根部 Cd 含量 Cd concentration in roots					1	-0.571**
	根部-地上部 Cd 转移系数 Cd transfer coefficient from roots to shoots						1
孕穗期 Booting stage	土壤有效态 Mn 含量 Soil available Mn content	1	-0.172	0.118	0.118	-0.036	0.060
	地上部 Mn 含量 Mn concentration in shoots		1	0.298	0.615**	0.023	0.496*
	根部 Mn 含量 Mn concentration in roots			1	-0.125	0.267	-0.357
	地上部 Cd 含量 Cd concentration in shoots				1	0.373	0.443*
	根部 Cd 含量 Cd concentration in roots					1	-0.647**
	根部-地上部 Cd 转移系数 Cd transfer coefficient from roots to shoots						1
灌浆期 Filling stage	土壤有效态 Mn 含量 Soil available Mn content	1	0.712**	0.880**	-0.184	0.174	-0.299
	地上部 Mn 含量 Mn concentration in shoots		1	0.655**	0.393	-0.047	0.187
	根部 Mn 含量 Mn concentration in roots			1	-0.219	-0.081	-0.078
	地上部 Cd 含量 Cd concentration in shoots				1	0.172	0.392
	根部 Cd 含量 Cd concentration in roots					1	-0.815**
	根部-地上部 Cd 转移系数 Cd transfer coefficient from roots to shoots						1
成熟期 Maturity stage	土壤有效态 Mn 含量 Soil available Mn content	1	0.562**	0.546*	-0.075	-0.084	-0.024
	地上部 Mn 含量 Mn concentration in shoots		1	0.576**	-0.354	-0.081	-0.038
	根部 Mn 含量 Mn concentration in roots			1	-0.268	0.599**	-0.506*
	地上部 Cd 含量 Cd concentration in shoots				1	-0.319	0.744**
	根部 Cd 含量 Cd concentration in roots					1	-0.834**
	根部-地上部 Cd 转移系数 Cd transfer coefficient from roots to shoots						1

注: *表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关; * *表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。
Note: * indicates significant correlation at $P<0.05$ level, and ** indicates significant correlation at $P<0.01$ level.

根部生长产生了抑制作用。这与 WANG 等^[12]和 HUANG 等^[20]在碱性土壤上施用高量硫酸锰肥的研究结果不一致。这可能是因为本试验的供试土壤为酸性土壤,土壤 Mn 有效态含量相对较高,对小麦生长有一定的负面影响。在灌浆期,SMn3 处理会在短时期内释放大量硫酸锰,土壤有效态 Mn 含量显著增加,从而影响了小麦的正常生长。

3.2 施用锰肥对土壤 Cd、Mn 有效性的影响

土壤中重金属有效态含量是影响小麦根部重金属吸收的重要因素。本研究发现,施用缓释锰肥在小麦灌浆期增加了土壤中有效态 Cd 含量,这可能与小麦生长后期缓释锰肥大量释放硫酸锰有关,而常规锰肥在小麦成熟期降低了土壤有效态 Cd 含量(图 2a)。有研究表明,在 aerobic 条件下,土壤中 Cd 与硫酸根离子能形成可溶于水的 CdSO_4 络合物,提高 Cd 的有效性^[21]。此外,硫酸盐可以降低土壤的 pH 值^[22],Mn 氧化和水解也会降低土壤的 pH 值^[23],从而增加土壤中 Cd 的有效性,这与本试验的结果相一致。本研究中 SMn2、SMn3 处理在小麦灌浆期降低了土壤 pH 值(图 1)。常规锰肥处理在小麦成熟期降低了土壤有效态 Cd 含量,可能是因为在旱地条件下,施用的常规锰肥随小麦生长转化为氧化锰,增强了对土壤中 Cd 的吸附。有研究表明,外源施加 Mn 能增加土壤中氧化锰的含量,增强对 Cd 固定的能力,改变土壤中 Cd 的赋存形态,从而降低土壤中 Cd 的生物有效性^[24]。本研究还发现,施用锰肥显著提高了土壤中有效态 Mn 含量,其中施用常规锰肥在小麦生长前期能显著提高土壤中有效态 Mn 含量,在小麦生长后期明显低于缓释锰肥(图 2b)。这与缓释肥的释放特征有关,基施的缓释锰肥在小麦生长前期对土壤中 Mn 的供给较常规锰肥少,随着缓释锰肥不断将 Mn 释放到土壤中,在小麦生长后期会向土壤供给大量的有效态 Mn。而施用常规锰肥的处理中,基施的硫酸锰容易转化成氧化锰,从而降低小麦生长后期土壤中有效态 Mn 的含量。

3.3 施用锰肥对小麦根部和地上部 Cd、Mn 含量的影响

本研究发现,施用锰肥显著增加了土壤中有效态 Mn 的供给,促进了小麦拔节期、灌浆期和成熟期根部对 Mn 的吸收(图 3c),进而抑制了小麦地上部和根部对 Cd 的吸收。这与 WANG 等^[12]的研究结果一致,基施硫酸锰肥促进了小麦根部 Mn 吸收,显著降低了小麦 Cd 吸收。大量研究表明,土壤中 Cd^{2+} 主要被小麦根系吸收,然后从根部向地上部转运。 Mn^{2+} 与 Cd^{2+} 在

作物根细胞中具有共同的转运系统^[25-26],即主要借助位于作物根部表皮细胞质膜上的转运蛋白(Nramp5)从土壤进入小麦根部细胞中^[27],随后 Cd 主要通过木质部(转运蛋白 TaHMA3 等)从根部向地上部转运^[28-29]。由于转运蛋白(Nramp5)基因的表达量在作物体内数量有限,且不受 Mn 浓度的影响,所以过量的 Mn^{2+} 会和 Cd^{2+} 竞争这些载体^[30-31]。本试验中,基施锰肥显著降低了小麦根部 Cd 吸收,可能是因为 Mn 与 Cd 会竞争同一转运蛋白,并且在 Mn 和 Cd 共存条件下, Mn^{2+} 会优先结合细胞膜上的载体蛋白,从而对 Cd^{2+} 的吸收产生拮抗作用,进而抑制小麦对 Cd 的吸收^[32-33]。相关性分析结果发现,在小麦全生育期,根部 Mn 含量与地上部 Cd 含量、根部-地上部 Cd 转移系数均呈负相关关系,进一步表明施用锰肥对小麦 Cd 吸收具有良好的拮抗效果。

从不同生育期小麦地上部 Cd 含量的变化趋势来看,拔节期小麦地上部 Cd 含量最高,在孕穗期和灌浆期逐渐降低,在灌浆期至成熟期又逐渐上升(图 3b)。这表明小麦拔节期和灌浆期至成熟期是抑制其 Cd 吸收的关键时期,与前人的研究结果一致。姜丽娜等^[34]通过大田试验研究 Cd 在小麦体内的吸收、分配和积累规律,结果表明,灌浆期和拔节-抽穗期 Cd^{2+} 吸收量及吸收速率显著高于其他时期,是 Cd 污染控制的关键时期。

3.4 施用锰肥对小麦籽粒 Cd、Mn 含量的影响

本研究中,施用锰肥均显著增加了小麦籽粒中 Mn 含量(图 4b),这与以往大量的研究结果相一致^[20]。另外,本研究发现施用锰肥均能降低小麦籽粒 Cd 含量,但降低效果不明显,仅 Mn2、Mn3 和 SMn2 处理显著降低了小麦籽粒中 Cd 含量(图 4a)。这很可能与本研究的供试土壤为 Cd 重度污染土壤,且土壤偏酸性有关。此外,也可能是施用锰肥抑制了小麦生长,导致小麦组织损伤,运输机能受损,从而减少了 Cd 向地上部和籽粒的转运。WANG 等^[12]的研究表明,在重度碱性 Cd 污染土壤上基施 500、1 000、2 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硫酸锰能显著降低小麦籽粒中 Cd 含量,但仍不能达到国家食品安全标准,说明在重度污染土壤中,单一施用锰肥无法实现小麦安全生产。

进一步分析本研究小麦籽粒中 Cd 含量降低的原因,发现常规锰肥处理中,籽粒中 Cd 含量与成熟期土壤中有效态 Cd 含量呈正相关关系,证明常规硫酸锰主要通过提高土壤中氧化锰的含量来降低土壤中 Cd 有效态,进而降低籽粒中 Cd 含量。缓释锰肥处理中,

籽粒中Cd含量与小麦地上部Mn含量呈显著负相关关系($P<0.05$),说明缓释锰肥主要通过后期释放大量的 Mn^{2+} ,与Cd产生拮抗作用,降低小麦籽粒Cd含量。因此可以推测,在小麦Cd吸收的关键时期(即拔节期和灌浆-成熟期),可通过施用锰肥来达到降低土壤中Cd有效性和拮抗小麦Cd吸收的双重效果。在以后的研究中需要进一步优化锰肥的施用方式和施用时期,以实现Cd污染土壤的安全利用。此外,虽然土施锰肥可以降低作物籽粒Cd含量^[12,20,23],但是单独基施锰肥无法保证小麦籽粒的Cd含量达到国家Cd安全限量标准。目前有大量研究表明叶面喷施锰肥、锌肥能有效降低作物籽粒中Cd含量^[35]。陶雪莹等^[36]发现叶面喷施4、8、12 mmol·L⁻¹的 $MnSO_4$ 和 $ZnSO_4$ 能使小麦籽粒Cd含量降低9.28%~35.25%;尹晓辉^[37]发现喷施叶面锰肥可以有效增强叶面光合作用,调节多种酶的活性,增强作物的抗逆性,从而减少地上部Cd向籽粒的转运。因此,建议在小麦Cd吸收关键期(拔节期以及灌浆-成熟期)组合叶面喷施锰肥和锌肥,既能抑制小麦根系Cd向地上部的迁移,也能抑制Cd向小麦籽粒的转移。

4 结论

(1)施用锰肥可降低土壤pH值,同时显著提高土壤中有有效态Mn含量。常规锰肥在小麦生长前期对土壤有效态Mn的供给高于缓释锰肥;缓释锰肥在生长后期显著提高了土壤中有有效态Mn含量。

(2)基施锰肥促进了小麦根部对Mn的吸收,降低了小麦根部对Cd的吸收,减少了小麦根部Cd向地上部的转移。

(3)施用26、66 mg·kg⁻¹常规锰肥和26 mg·kg⁻¹缓释锰肥显著降低了小麦籽粒中Cd含量,降幅分别为14%、27%和17%。

(4)在中、重度Cd污染土壤中,单施锰肥不能保证小麦的安全生产,需要同时采取更多有效措施或综合农艺技术,进一步降低Cd在小麦籽粒中的积累。

参考文献:

[1] 李义纯,王艳红,陈勇,等.基于土壤质量的改良剂修复镉污染稻田综合效果评价[J].农业环境科学学报,2021,40(6):1219-1228. LI Y C, WANG Y H, CHEN Y, et al. A comprehensive evaluation of remediation effects on cadmium contamination in paddy fields based on soil quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1219-1228.

[2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环

保产业,2014(5):10-11. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National soil pollution status survey bulletin[J]. *China's Environmental Protection Industry*, 2014(5):10-11.

[3] ZHAO F J, MA Y, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49:750-759.

[4] 管伟豆,肖然,李荣华,等.土壤镉污染北方小麦生产阈值及产区划分初探[J].农业环境科学学报,2021,40(5):969-977. GUAN W D, XIAO R, LI R H, et al. Investigations on the derivation of a safe wheat-producing threshold of soil Cd content and classification of Cd contaminated wheat-producing areas in northern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5):969-977.

[5] LI X. Technical solutions for the safe utilization of heavy metal-contaminated farmland in China: A critical review[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(15):1773-1784.

[6] 孟自力,贾斌,尹海燕,等.镉胁迫对小麦生长发育的影响[J].中国农学通报,2018,34(23):26-32. MENG Z L, JIA B, YIN H Y, et al. Effects of cadmium stress on the growth and development of wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(23):26-32.

[7] 史高玲,周东美,余向阳,等.水稻和小麦累积镉和砷的机制与阻控对策[J].江苏农业学报,2021,37(5):1333-1343. SHI G L, ZHOU D M, YU X Y, et al. Mechanisms of cadmium and arsenic accumulation in rice and wheat and related mitigation strategies[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(5):1333-1343.

[8] TAYEBEH A, AMIN M. Cadmium uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.): An overview[J]. *Plants*, 2020, 9(4):500.

[9] ZHOU J, ZHANG C, DU B Y, et al. Effects of zinc application on cadmium (Cd) accumulation and plant growth through modulation of the antioxidant system and translocation of Cd in low- and high-Cd wheat cultivars[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265(Part A):15045.

[10] 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.

[11] 韩潇潇. 锌和锰对水稻镉吸收转运特性的影响[D].北京:中国农业科学院,2019:15. HANG X X. Effects of zinc and manganese on cadmium absorption and transport in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019:15.

[12] WANG Y L, XU Y M, LIANG X F, et al. Soil application of manganese sulfate could reduce wheat Cd accumulation in Cd contaminated soil by the modulation of the key tissues and ionic of wheat[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770:145328.

[13] UIIAH 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.

[14] 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 pakchoi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1872-1881.

- [15] FAN J L, HU Z Y, ZIADI N, et al. Excessive sulfur supply reduces cadmium accumulation in brown rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 158(2):409-415.
- [16] YUAN K, WANG C R, ZHANG C B, et al. Rice grains alleviate cadmium toxicity by expending glutamate and increasing manganese in the cadmium contaminated farmland[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114236.
- [17] 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.
- [18] YU Z H, QIU W W, WANG F, et al. Effects of manganese oxide-modified biochar composites on arsenic speciation and accumulation in an indica rice (*Oryza sativa* L.) cultivar[J]. *Chemosphere*, 2017, 168:341-349.
- [19] 王兴刚, 吕少瑜, 冯晨, 等. 包膜型多功能缓/控释肥料的研究现状及进展[J]. 高分子通报, 2016(7):9-22. WANG X G, LÜ S Y, FENG C, et al. Research status and progress of coated multifunctional slow/controlled release fertilizer[J]. *Polymer Bulletin*, 2016(7):9-22.
- [20] HUANG Q Q, WANG Y L, QIN X, et al. Soil application of manganese sulfate effectively reduces Cd bioavailability in Cd-contaminated soil and Cd translocation and accumulation in wheat[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 814:152765.
- [21] SHI G L, LU H Y, LIU H, et al. Sulfate application decreases translocation of arsenic and cadmium within wheat (*Triticum aestivum* L.) plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713:136665.
- [22] LI X Z, YU H, SUN X W, et al. Effects of sulfur application on cadmium bioaccumulation in tobacco and its possible mechanisms of rhizospheric microorganisms[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368:308-315.
- [23] 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.
- [24] VAN GROENINGEN N, CHRISTLL I, KRETZSCHMAR R. The effect of aeration on Mn(II) sorbed to clay minerals and its impact on Cd retention[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(3):1650-1658.
- [25] 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.
- [26] PILAR Z, BEATRIZ S P, RAMÓN O C. Interaction and accumulation of manganese and cadmium in the manganese accumulator *Lupinus albus*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(13):1027-1032.
- [27] URAGUCHI S, MORI S, KURAMATA M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9):2677-2688.
- [28] 王效瑾, 高巍, 赵鹏, 等. 小麦幼苗根系形态对镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6):1218-1225. WANG X J, GAO W, ZHAO P, et al. Changes to wheat seeding root morphology in response to cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1218-1225.
- [29] ZHOU J, ZHANG C, DU B Y, et al. Soil and foliar applications of silicon and selenium effects on cadmium accumulation and plant growth by modulation of antioxidant system and Cd translocation: Comparison of soft vs. durum wheat varieties[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402:123546.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] DENG X, CHEN Y X, YANG Y, et al. Cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) alleviated by basal alkaline fertilizers followed by topdressing of manganese fertilizer[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114289.
- [34] 姜丽娜, 邵云, 李春喜, 等. 镉在小麦植株体内的吸收、分配和累积规律研究[J]. 河南农业科学, 2004(7):13-17. JIANG L N, SHAO Y, LI C X, et al. Studies on uptake, distribution and accumulation of Cd in wheat plant[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2004(7):13-17.
- [35] LV G H, WANG H, XU C, et al. Effectiveness of simultaneous foliar application of Zn and Mn or P to reduce Cd concentration in rice grains: A field study[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(9):9305-9313.
- [36] 陶雪莹, 徐应明, 王林, 等. 喷施硫酸锰和硫酸锌对小麦籽粒镉锰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. Effect 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.
- [37] 尹晓辉. 施锰对水稻镉吸收和积累的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017:12-13. YIN X H. Effects of manganese on cadmium absorption and accumulation in rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017:12-13.

(责任编辑:宋潇)