

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

引用本文:

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. 镉与微量元素在小麦吸收过程中的相互影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(6): 1175–1183.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0866>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同小麦品种灌浆期生长和镉积累的差异研究

潘建清, 陆敏, 杨肖娥

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 756–765 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0967>

外源亚精胺对水稻吸收积累镉砷的影响

刘书锦, 黄益宗, 李颜, 魏祥东, 铁柏清

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2172–2180 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0828>

镉耐性固定细菌的筛选及其对不同品种小麦镉吸收的阻控效应

孙乐妮, 郭迎雪, 侯雪婷, 庄杰, 杨章泽, 陈兆进, 田伟

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1878–1887 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0291>

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>

外源硒对镉胁迫下菜心Fe、Mn、Cu、Zn吸收与转运的影响

刘帅, 吴志超, 赵亚荣, 张卫杰, 王富华

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 431–439 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1046>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚晨, 贾睿琪, 腊贵晓, 等. 镉与微量元素在小麦吸收过程中的相互影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1175–1183.

YAO C, JIA R Q, LA G X, et al. Interaction between cadmium and trace elements in the wheat absorption process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1175–1183.



开放科学 OSID

镉与微量元素在小麦吸收过程中的相互影响

姚晨¹, 贾睿琪¹, 腊贵晓², 王宁³, 陆夏梓¹, 郭子昂¹, 龚子阳⁴, 赵艳阳⁴, 郭虹妤¹, 李烜楨^{1*}

(1.河南农业大学林学院, 郑州 450002; 2.河南省农业科学院经济作物研究所, 郑州 450002; 3.河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002; 4.河南农业大学国际教育学院, 郑州 450002)

摘要:为开发小麦生理阻控降Cd材料,以郑麦1354和郑麦1860为供试小麦品种,通过水培试验方法,研究了不同Zn(1~10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和Mn(1~10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)供应量对小麦生物量和Cd/Zn/Mn含量的影响,以及不同Cd(1~50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫水平对小麦生物量和Cd/Zn/Mn含量的影响。结果表明,5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn和10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Mn处理显著提高了两种小麦的生物量。Mn(1~10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理使郑麦1354和郑麦1860小麦地上部Cd含量分别降低了22.8%~29.4%和15.2%~17.5%,地下部Cd含量分别降低了25.7%~30.0%和28.6%~31.6%,Zn(1~10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理使郑麦1354和郑麦1860小麦地下部Cd含量分别降低了20.3%~34.3%和18.9%~43.0%,此外还使郑麦1354地上部的Cd含量降低了10.1%~13.1%。不同Cd胁迫(1~50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)均有提高小麦生物量的趋势。随着Cd胁迫水平的提高,两个品种地上部和地下部Cd含量均呈升高趋势,地下部Zn含量呈先增加后降低的趋势,Mn含量呈逐渐降低的趋势,表明在小麦吸收金属元素过程中,Cd与Mn存在竞争关系,而与Zn的关系则较为复杂,且其竞争程度因品种而异。研究表明,适度提高Mn和Zn供应能显著降低小麦植株Cd含量,因此Mn和Zn是实现小麦降Cd的有效生理阻控材料。

关键词:小麦;镉;竞争;锌;锰

中图分类号:S512.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)06-1175-09 doi:10.11654/jaes.2021-0866

Interaction between cadmium and trace elements in the wheat absorption process

YAO Chen¹, JIA Ruiqi¹, LA Guixiao², WANG Ning³, LU Xiazi¹, GUO Ziang¹, GONG Ziyang⁴, ZHAO Yanyang⁴, GUO Hongyu¹, LI Xuanzhen^{1*}

(1.School of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2.Cash Crops Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3.School of Life Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 4.School of International Education, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract:To develop wheat physiological resistance control and Cadmium(Cd) reduction materials, the effects of different Zinc(Zn)(1~10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) and manganese(Mn)(1~10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) concentrations on wheat biomass and the Cd/Zn/Mn content were studied using hydroponic experiments with Zhengmai 1354 and Zhengmai 1860 wheat varieties. The effects of different Cd(1~50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) stress levels on wheat biomass and Cd/Zn/Mn uptake were examined. The results showed that the 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn and 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Mn treatments significantly increased the biomass of the two types of wheat. The Mn(1~10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) treatment reduced the Cd content in the aboveground parts of Zhengmai 1354 and Zhengmai 1860 by 22.8%~29.4% and 15.2%~17.5%, respectively, and reduced the Cd content

收稿日期:2021-08-02 录用日期:2021-11-19

作者简介:姚晨(1996—),女,河南驻马店人,在读研究生,主要研究方向为污染土壤安全利用技术。E-mail:943029047@qq.com

*通信作者:李烜楨 E-mail:xzli2015@sina.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800304);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(192102310234)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0800304); The Foundation for the Key Research and Promotion of Henan Province(Science and Technology)(192102310234)

in the underground parts by 25.7%~30.0% and 28.6%~31.6%, respectively. The Zn ($1\sim 10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) treatment reduced the Cd content in the underground parts of Zhengmai 1354 and Zhengmai 1860 by 20.3%~34.3% and 18.9%~43.0%, respectively, and reduced the Cd content in the aboveground parts of Zhengmai 1354 by 10.1%~13.1%. Different cadmium stress ($1\sim 50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) tended to increase the wheat biomass. As the Cd stress level increased, the Cd content in the aboveground and underground parts of both plant varieties increased, the Zn content in the underground parts decreased after first increasing, and the Mn content gradually decreased. The results showed that there was a competitive relationship between Cd and Mn, and the relationship between Cd and Zn was more complex. Moreover, moderately increasing the supply of Mn and Zn significantly reduced the Cd content in wheat plants. Therefore, Mn and Zn are effective physiological resistance control agents for reducing the Cd content in wheat.

Keywords: wheat; cadmium; competition; zinc; manganese

Cd是植物的一种非必需元素,通常由污水灌溉、大气沉降以及化肥和农药施用等方式进入土壤环境中,是最具毒性的环境污染物之一^[1]。Cd能够降低植物对微量元素的吸收和转运^[2]。过量的Cd还会抑制植物生长发育,降低作物产量和品质,并蓄积在作物的可食用部分,最终通过食物链对动物和人类构成潜在危害^[3]。近年来,我国小麦Cd超标事件屡有发生,例如,有调查表明新乡市部分地区的农田Cd污染可达中度乃至重度污染水平,小麦籽粒Cd含量超标现象严重^[4]。因此研究小麦对Cd的吸收机制,开发阻控材料以降低小麦的Cd含量,具有重要的现实意义。

Zn和Mn均属典型的微量元素,也是作物生长的必需元素^[5]。在土壤中施加适宜浓度的微量元素可以促进作物生长和提高粮食产量,而微量元素的缺乏则可导致植物生长缓慢、产量下降等问题^[6]。大量研究表明,施加微量元素能够降低农作物对Cd的吸收^[7],例如HART等^[8]通过盆栽和水培实验发现,在土壤、水培营养液或叶面施Zn,均能够降低小麦籽粒中Cd的浓度;陶雪莹等^[9]研究发现,叶面喷施 MnSO_4 或 ZnSO_4 均能够显著降低小麦籽粒中的Cd含量,Zn/Mn复配处理则降Cd效果更为显著。

目前对于水稻等植物的研究较为深入,而对于小麦作物的研究较少。鉴于此,本研究通过水培实验,探究微量元素Zn和Mn对小麦Cd吸收的影响,以及Cd对小麦中微量元素吸收的影响,旨在阐明微量元素与Cd在小麦中积累的互作关系,为开发具有降Cd功能的生理阻控材料提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦品种为“郑麦1354”和“郑麦1860”,购于河南秋乐种业科技股份有限公司。

1.2 水培实验

挑选籽粒饱满的小麦种子,在5%的NaClO溶液中浸泡20 min,用去离子水反复冲洗后置于去离子水中浸泡5 h,将泡好的种子均匀地摆放在育苗盘上育苗3~4 d。挑选长势一致的小麦幼苗,在1/2 Hoagland营养液中培育至三叶期,将三叶期的小麦转移至以1/2 Hoagland营养液为基础的不同处理液中培养3 d。水培实验的整个过程均在人工气候室内完成(温度 $18\ ^\circ\text{C}$,湿度35%,光照12 h)。

为了分析不同浓度微量元素对小麦生长及Cd吸收的影响,进行第一组实验。实验共设10组处理,其中的Cd以 CdCl_2 形式加入,浓度均为 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,Zn和Mn的浓度设置如表1所示,其他金属元素含量为1/2 Hoagland营养液的离子浓度。每个处理重复3次,每个培养皿中种植15株小麦幼苗。

表1 实验一各处理中Zn和Mn的浓度($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 1 Concentrations of Zn and Mn in each treatment in Experiment 1 ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

处理 Treatment	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
CK	0.5	0.5
Zn1	1	0.5
Zn2	5	0.5
Zn3	10	0.5
Mn1	0.5	1
Mn2	0.5	5
Mn3	0.5	10

为了分析不同浓度Cd对小麦生长及微量元素吸收的影响,进行第二组实验。实验中Cd以 CdCl_2 形式加入,初始浓度设置为0、1、5、10、20、50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 6个水平,分别记作CK、Cd1、Cd5、Cd10、Cd20、Cd50处理。每个处理重复3次,每个培养皿中种植15株小麦幼苗。

1.3 样品采集

将收取的小麦幼苗先用 $5\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的EDTA- Na_2

溶液浸泡 20 min,再用去离子水将根系冲洗干净,以去除根系表面吸附的 Cd^{2+} 。置于 105 °C 烘箱中杀青 20 min 后,70 °C 烘干至恒质量,测定生物量,然后将样品地上部和地下部分别粉碎,测量各项指标。

1.4 测定项目及方法

Cd 、 Mn 、 Zn 含量采用高精度 X 射线荧光光谱仪测定。为确保分析质量,在每批分析中加入小麦标准物质(GBW-E-100494)进行仪器精度测试,每种元素的标准回收率为 90%~110%。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理分析。采用单因素分析法分析不同处理下小麦 Cd 、 Zn 和 Mn 含量的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同微量元素对小麦生物量的影响

图 1 为不同微量元素处理对小麦生物量的影响。随着施 Zn 浓度的提高,两种小麦的生物量均呈现出先升高后降低的趋势,并在 Zn2 处理下达到最高,郑麦 1354 和郑麦 1860 分别较对照组升高了 21.9% 和 11.9% ($P<0.05$)。施 Mn 处理后郑麦 1354 生物量均较对照组显著提高,并随着施 Mn 浓度的提高,呈现出先降低后升高的趋势;而郑麦 1860 的生物量只在 Mn3 处理下显著提高,较对照组升高了 17.9% ($P<0.05$)。上述结果表明施加 Zn 和 Mn 处理均显著提高了郑麦 1354 的生物量,而 Zn2 和 Mn3 处理显著提高了郑麦 1860 的生物量。

2.2 不同微量元素对小麦 Zn/Mn 含量的影响

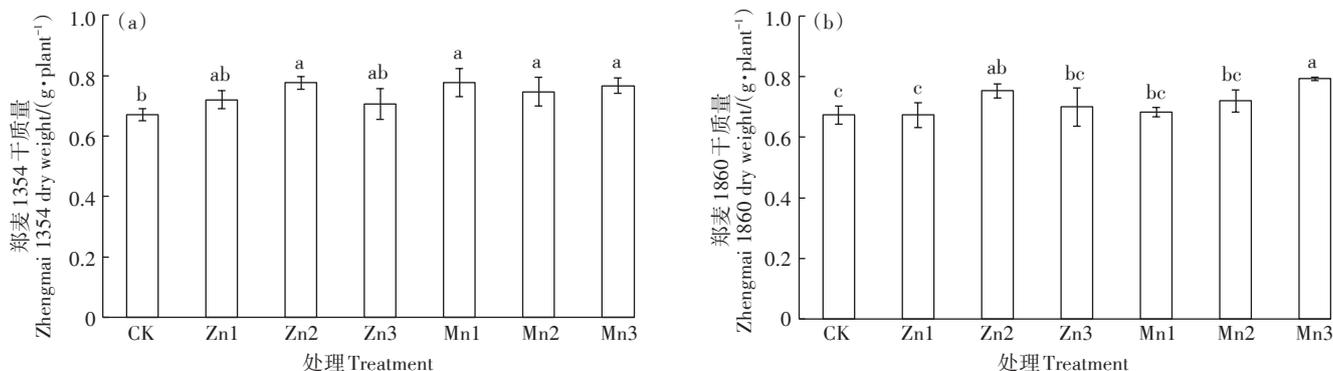
图 2 为不同微量元素处理对两种小麦 Zn/Mn 含量的影响。随着施 Zn 浓度的提高,两种小麦地上部

和地下部的 Zn 含量均呈逐渐上升的趋势,并均在 Zn2 和 Zn3 处理下较对照组显著提高。随着施 Mn 浓度的提高,两种小麦地上部和地下部的 Mn 含量均呈逐渐上升的趋势,其中地上部 Mn 含量在 Mn2 和 Mn3 处理下较对照组显著提高,地下部则在 Mn1 、 Mn2 和 Mn3 处理下均较对照组显著提高。

2.3 不同微量元素对小麦 Cd 含量及转运系数的影响

图 3a 和图 3b 为不同微量元素处理对小麦地上部 Cd 含量的影响。在 Zn 和 Mn 处理下郑麦 1354 地上部 Cd 含量较对照组均显著降低 ($P<0.05$),其中,施 Zn 处理使 Cd 下降了 10.1%~13.1%,并随着施 Zn 浓度的提高, Cd 含量呈现微弱的上升趋势;施 Mn 处理使 Cd 含量下降了 22.8%~29.4%,并随着施 Mn 浓度的提高, Cd 含量呈现先升高后下降的趋势(图 3a)。施加 Zn 处理,郑麦 1860 地上部的 Cd 含量较对照组变化不显著,而施加 Mn 处理后,其地上部的 Cd 含量较对照组均显著降低(图 3b)。综上所述,施加 Mn 处理均能降低两种小麦地上部的 Cd 含量,施加 Zn 处理能降低郑麦 1354 地上部的 Cd 含量,但对郑麦 1860 地上部 Cd 含量无显著影响。

图 3c 和图 3d 为不同微量元素处理对小麦地下部 Cd 含量的影响。施加 Zn 和 Mn 处理均显著降低了郑麦 1354 地下部的 Cd 含量 ($P<0.05$);其中,施 Zn 处理使 Cd 含量下降了 20.3%~34.3%,并随着 Zn 浓度的提高, Cd 含量呈现降低趋势;施 Mn 处理使 Cd 含量下降了 25.7%~30.0%,并随着 Mn 浓度的提高, Cd 含量呈逐渐降低的趋势(图 3c)。施加 Zn 和 Mn 处理均显著降低了郑麦 1860 地下部 Cd 含量;其中,施 Zn 处理使 Cd 含量下降了 18.9%~43.0%,并随着 Zn 浓度的提高,



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 between treatments ($P<0.05$). The same below

图 1 不同微量元素对小麦生物量的影响

Figure 1 Effects of different trace elements on wheat biomass

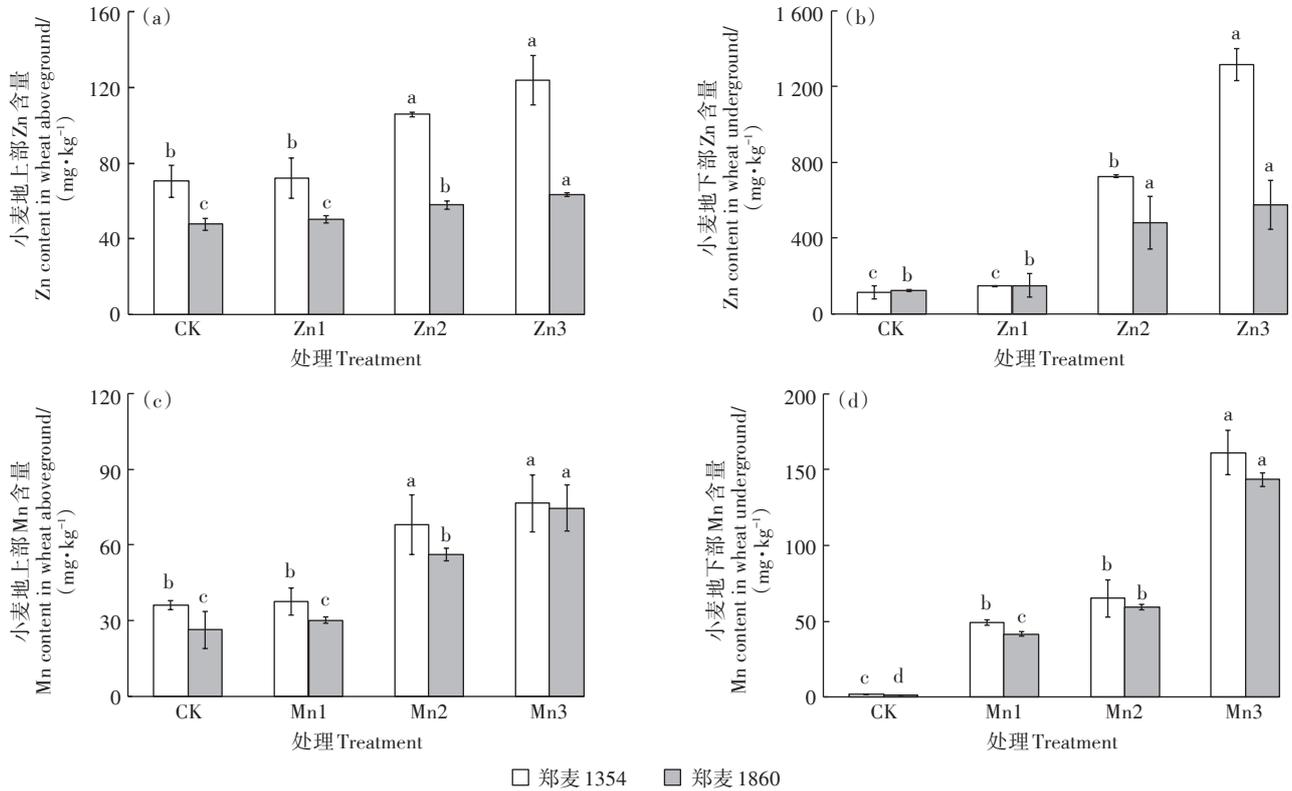


图2 不同微量元素对小麦Zn/Mn含量的影响

Figure 2 Effects of different trace elements on Zn/Mn content in wheat

Cd含量呈现降低趋势;施Mn处理使Cd含量下降了28.6%~31.6%,并随着Mn浓度的提高,Cd含量呈现先升高后降低的趋势(图3d)。综上所述,施加Zn和Mn处理均能够降低两种小麦地下部的Cd含量,其中以施加10 μmol·L⁻¹Zn处理效果最为显著。

图3e和图3f为不同微量元素处理对小麦转运系数的影响。郑麦1354在Zn3处理下Cd转运系数提高,较对照组提高了31.5%。郑麦1860在Zn2、Zn3和Mn3处理下Cd转运系数有所提高,较对照组分别提高了19.0%、34.9%和19.0%。其余处理下小麦的转运系数变化均不显著。

2.4 不同Cd胁迫水平对小麦生物量的影响

图4为不同Cd胁迫水平对小麦生物量的影响。随着Cd胁迫程度的提高,郑麦1354生物量分别在Cd1、Cd5和Cd50处理时较对照组分别显著增加了30.4%、41.3%和39.1%(*P*<0.05)。而随着Cd胁迫程度的提高,郑麦1860生物量变化较对照组均不显著(*P*>0.05)。综上所述,1~50 μmol·L⁻¹Cd胁迫水平均未显著抑制小麦生长。

2.5 不同Cd胁迫水平对小麦Cd含量的影响

图5为不同Cd胁迫程度对小麦Cd含量的影响。

在培养基中施加Cd处理后,郑麦1354和郑麦1860的地上部和地下部的Cd含量均较对照组显著提高(*P*<0.05),并随着Cd胁迫程度的提高,呈现出逐渐升高的趋势。

2.6 不同Cd胁迫水平对小麦Zn含量的影响

图6为Cd胁迫对小麦Zn含量的影响。随着Cd胁迫程度的提高,郑麦1354地上部和地下部的Zn含量均呈现出先升高后降低的趋势,并在Cd1处理下含量最高,较CK组分别提高了43.7%和32.5% (*P*<0.05)。随着Cd胁迫程度的提高,郑麦1860地上部和地下部的Zn含量均呈现出先升高后降低的趋势,其中地上部Zn含量以Cd5处理最高,较对照组显著提高了27.5% (*P*<0.05),地下部Zn含量以Cd10处理最高,较对照组提高了42.5% (*P*<0.05)。综上所述,当培养液中Cd浓度为0~50 μmol·L⁻¹时,随着培养液中Cd浓度的升高,郑麦1354和郑麦1860地上部和地下部的Zn含量均呈先升高后降低的趋势。

2.7 不同Cd胁迫水平对小麦Mn含量的影响

图7为Cd胁迫对小麦Mn含量的影响。在Cd1、Cd20和Cd50处理下,郑麦1354地上部Mn含量较对照组均显著降低;随着Cd胁迫程度的提高,郑麦1354

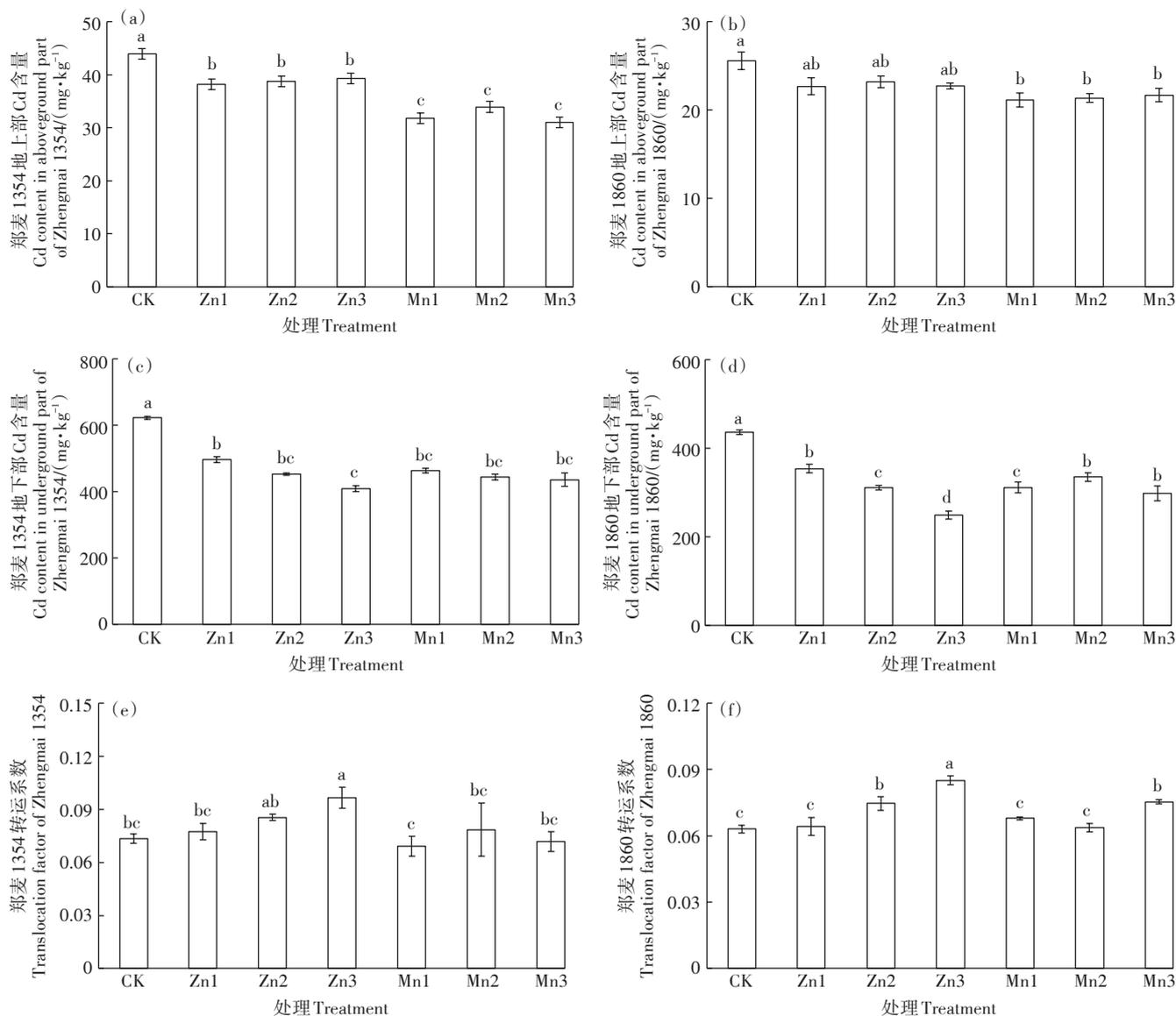


图3 不同微量元素对小麦Cd含量和转运系数的影响

Figure 3 Effects of different trace elements on Cd accumulation and translocation factor of wheat

地下部Mn含量呈现出逐渐降低的趋势,并在Cd50处理下,小麦地下部Mn含量降低到最小值,较CK组降低了94.8%(图7a和图7c)。郑麦1860地上部和地下部的Mn含量较CK组均降低,且随着Cd胁迫程度的提高,地上部Mn含量呈现出先降低后升高的趋势,并在Cd20处理下降至最小值,较CK组显著降低了35.8%,其地下部Mn含量则呈现出逐渐降低的趋势,并在Cd50处理下降至最小值,较CK组显著降低了约89.5%(图7b和图7d)。综上所述,当培养液中Cd浓度为0~50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,随着培养液中Cd浓度的升高,郑麦1354和郑麦1860地下部的Mn含量均呈逐渐降低的趋势。同时,Cd胁迫均能够抑制郑麦1860小

麦地上部和地下部对Mn的吸收;1、20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫能抑制郑麦1354地上部对Mn的吸收,5~50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫能抑制郑麦1354地下部对Mn的吸收。

3 讨论

在本研究中,施加一定浓度的Zn/Mn能提高小麦的生物量,其中以5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn和10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Mn处理效果较为显著,这与前人的研究结果相似^[10-14],而该实验结果中施加某些浓度的Zn/Mn处理却未能显著提高小麦生物量,这可能与施加微量元素的处理时间较短有关^[2]。

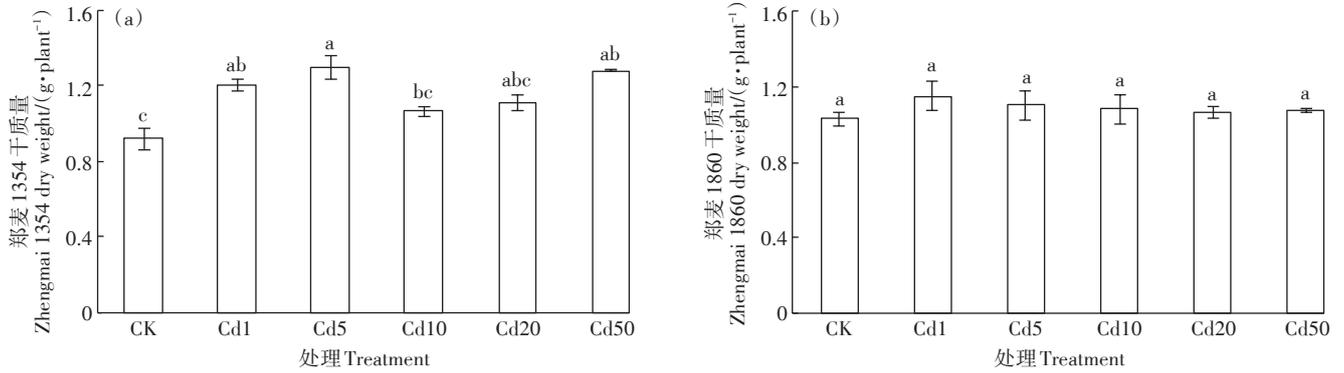


图4 不同Cd胁迫水平对小麦生物量的影响

Figure 4 Effects of different Cd stress levels on wheat biomass

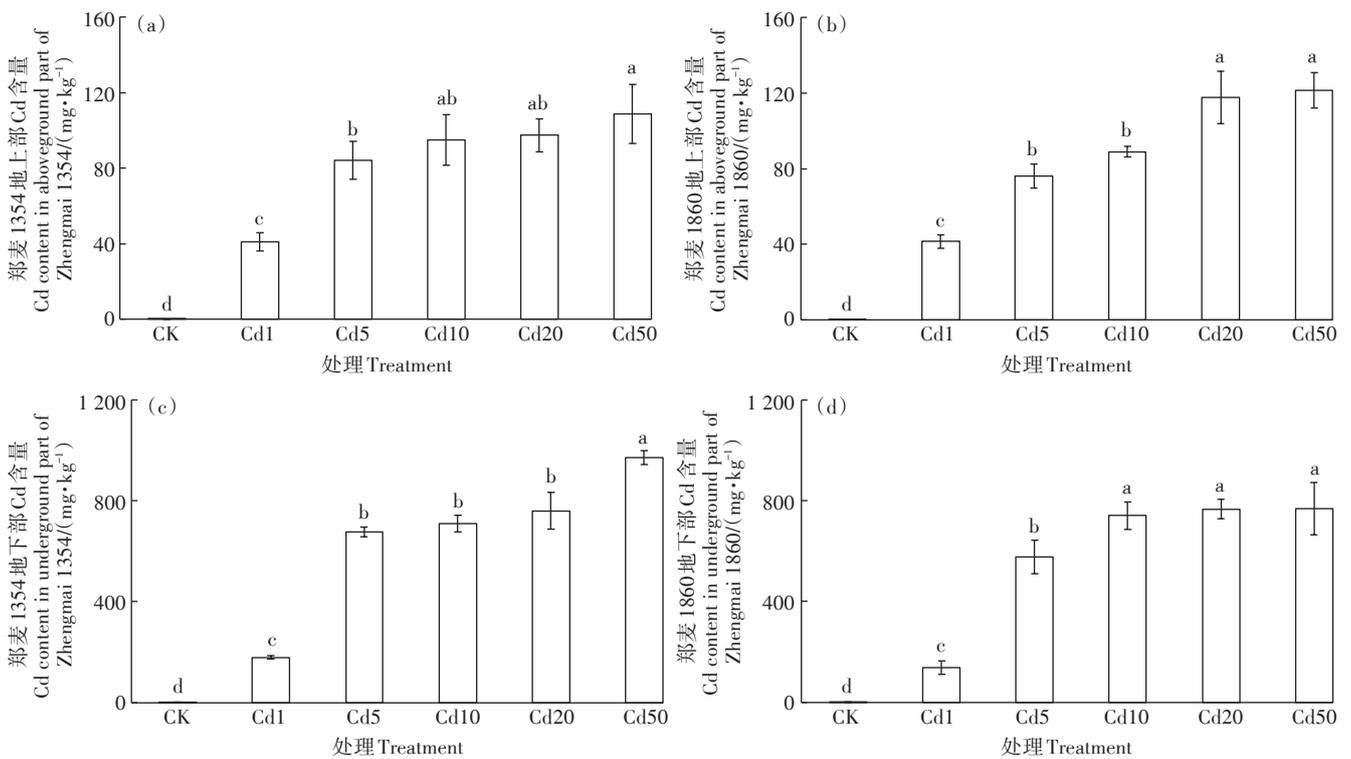


图5 不同Cd胁迫水平对小麦Cd含量的影响

Figure 5 Effects of different Cd stress levels on Cd content in wheat

本研究发现,施加1~10 μmol·L⁻¹的Zn处理均能降低两种小麦地下部的Cd含量,且随着Zn供应量的提高Cd含量呈现出下降趋势,这表明在小麦根部Zn和Cd之间存在竞争效应,且这种竞争效应会随Zn浓度的提高而加强,YANG等^[15]通过数据建模也证明了这一点。由此推测,外源施Zn能抑制小麦根系中与Cd²⁺吸收相关的蛋白的表达(例如TaLCT1),从而降低小麦根系对Cd的吸收量^[3,15-16]。同时,随着施Zn浓度的提高,小麦植株能产生更多与Zn²⁺相关的转运载体来促进Zn²⁺从地下部到地上部的转运,而这些载体在

转运Zn²⁺的同时也会提高对Cd²⁺的转运,因此小麦对Cd的转运系数也有所提高^[17-19]。此外,本研究发现,施Zn处理后郑麦1354地上部的Cd含量均降低,而郑麦1860地上部的Cd含量并未显著降低,这可能与小麦的基因型有关,因此在施加Zn处理时应考虑小麦品种差异^[20]。

本研究表明施加1~10 μmol·L⁻¹的Mn处理均能降低两种小麦地下部的Cd含量,且随着Mn供应量的提高Cd含量呈现出下降趋势,同时,随着外源施Mn浓度的提高,两小麦地上部和地下部的Mn含量均呈

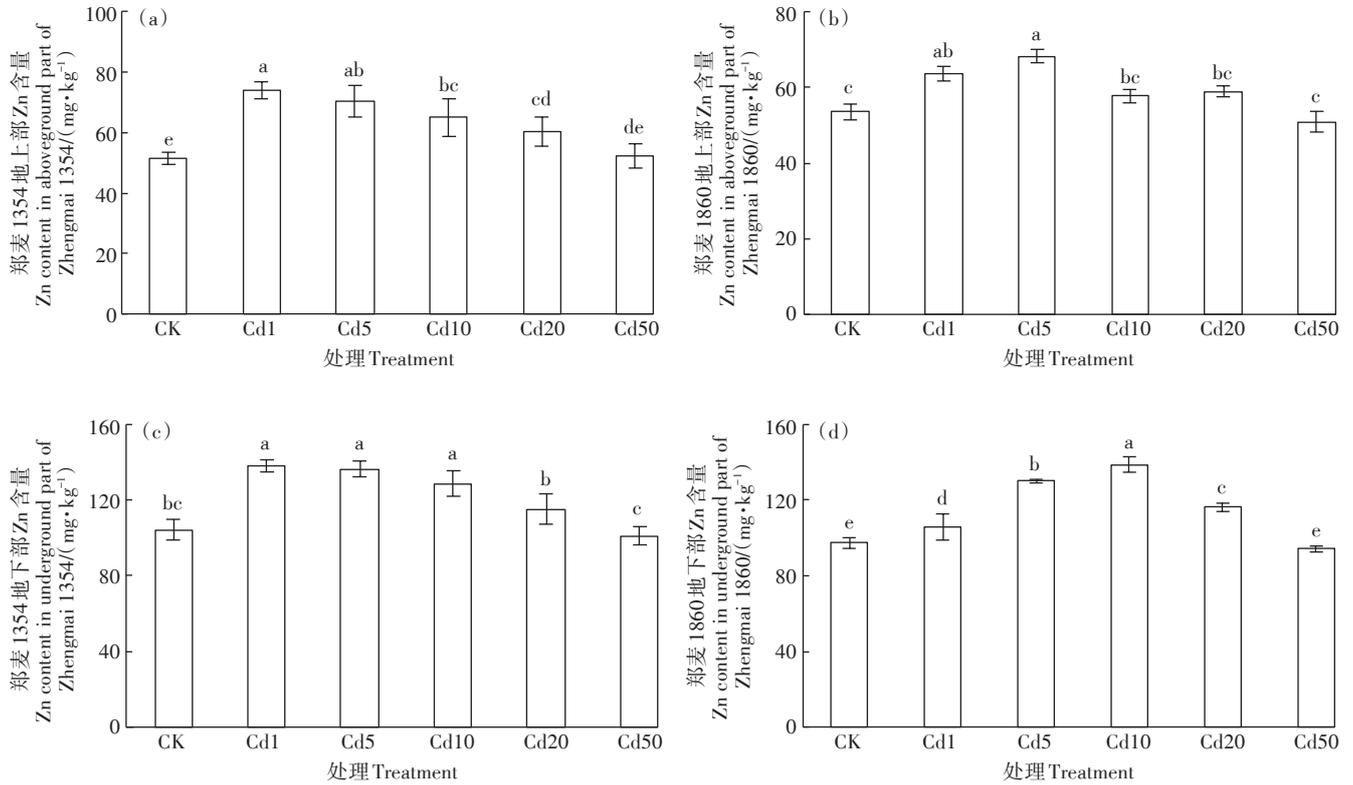


图6 不同Cd胁迫水平对小麦Zn含量的影响

Figure 6 Effects of different Cd stress levels on Zn content in wheat

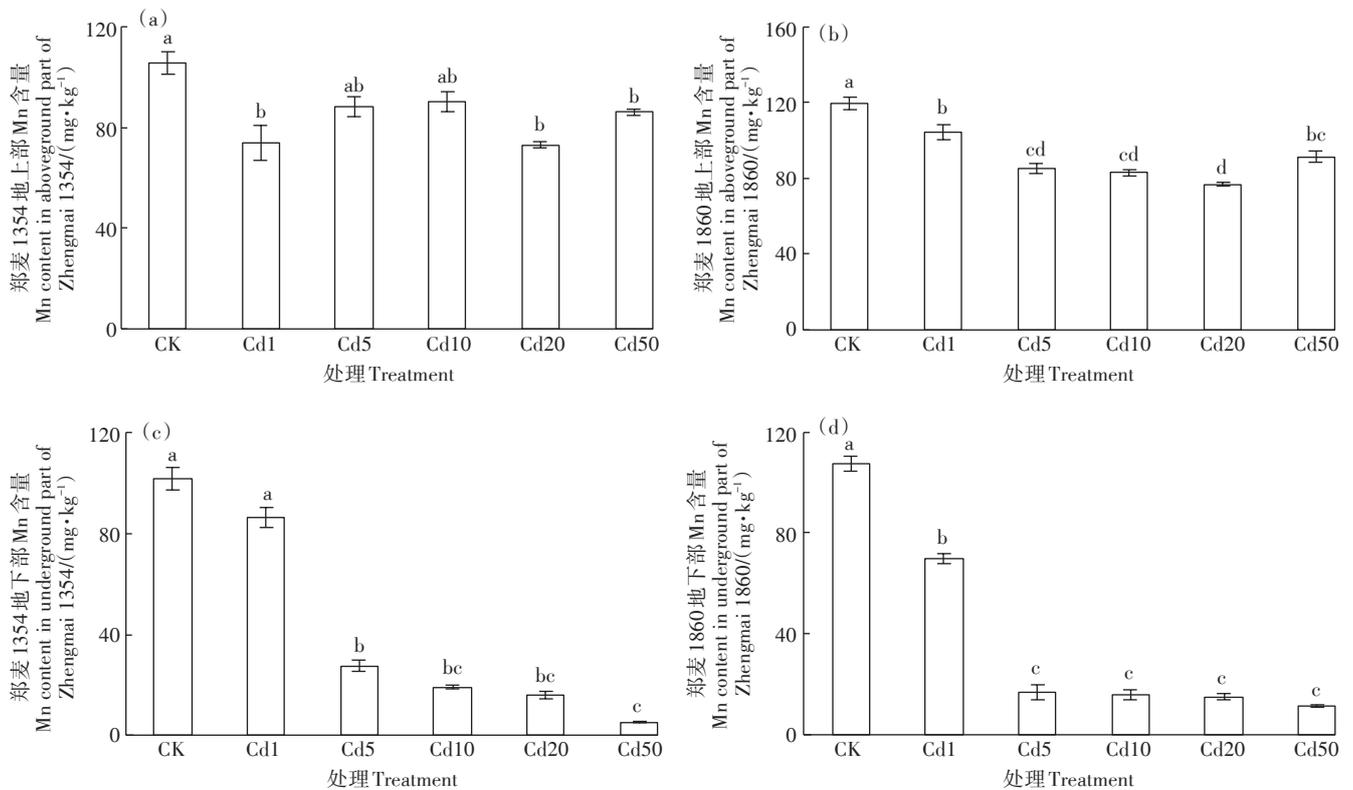


图7 不同Cd胁迫水平对小麦Mn含量的影响

Figure 7 Effects of different Cd stress levels on Mn content in wheat

上升趋势。由此推测,在根系环境中Mn能够通过和Cd竞争根部的转运蛋白来降低小麦对Cd的吸收^[14,21-22]。此外,研究发现施加Mn处理对郑麦1860地上部Cd含量未造成显著影响,这表明Mn对Cd的抑制效果也会因小麦品种的不同而异^[12]。

Cd能够影响植物的光合作用,同时还能抑制植物体内酶的合成与活性,进而影响植物的生长发育以及对微量元素的吸收^[3],而本研究发现 $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cd胁迫处理对两种小麦的生物量没有显著的抑制作用,表明小麦对Cd具有较强的耐受能力,对此WU等^[23]也有类似发现,这可能与植物的“低促高抑”现象有关,即低浓度的Cd促进植物生长,而高浓度的Cd则抑制植物生长^[24]。该现象可能是植物自身产生了应激效应用来中和与Cd相关的毒性^[24]。

在本研究中,施加Cd($1\sim 50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫处理均能提高小麦地上部和地下部Cd含量,并随着Cd胁迫程度的提高小麦植株Cd含量呈逐渐升高的趋势。低浓度的Cd($1\sim 10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫能一定程度上提高小麦地上部或地下部Zn含量,但对Zn的富集能力因小麦品种不同而异^[25-27],这可能是Cd能够上调小麦中Zn吸收和转运相关基因(如*TaCNR5*)的表达所致^[28-31]。研究还发现, $1\sim 50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cd胁迫能降低小麦地上部和地下部Mn含量,且随着Cd胁迫水平的提高,这种抑制作用有加强的趋势。这可能是小麦植株内Cd和Mn竞争载体(如*OSNRAMP5*)造成的^[21-22]。

最近,夏亦涛^[32]发现小麦籽粒Cd含量与苗期地下部至地上部的Cd迁移系数呈显著正相关,表明苗期小麦对Cd的吸收状况可表征籽粒中Cd的积累状况^[32]。并且苗期实验具有快速、廉价、条件可控的优势,是进行生理阻控剂筛选的有效手段。本研究发现Zn和Mn可在一定程度上降低苗期小麦对Cd的富集能力,从而为开发以Zn和Mn为基础的生理阻控材料提供了科学依据。

4 结论

(1)适度提高Mn和Zn供应能显著降低郑麦1354和郑麦1860植株Cd含量。因此,Mn和Zn是实现小麦降Cd的有效生理阻控材料。

(2)Cd胁迫对小麦生长具有“低促高抑”现象。随着Cd胁迫水平的提高,两种小麦各部分Cd含量均呈逐渐上升的趋势。

(3)Cd胁迫使小麦植株的Zn含量有所提高,但随着Cd胁迫程度的提高,小麦植株Zn含量呈现先增

加后降低的趋势。而Cd胁迫基本降低了小麦植株Mn含量。由此可见,在小麦吸收金属元素过程中,Cd与Mn存在着竞争关系,而与Zn的关系则较为复杂。

参考文献:

- [1] CHANEY R L. How does contamination of rice soils with Cd and Zn cause high incidence of human Cd disease in subsistence rice farmers [J]. *Current Pollution Reports*, 2015, 1(1):13-22.
- [2] ZHOU Z, ZHANG B, LIU H, et al. Zinc effects on cadmium toxicity in two wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) differing in grain cadmium accumulation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 183: 109562.
- [3] ZHOU J, ZHANG C, DU B, 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(Pt A):115045.
- [4] 陈兆进, 李英军, 邵洋, 等. 新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果[J]. *环境科学*, 2020, 41(6):2889-2897. CHEN Z J, LI Y J, SHAO Y, et al. Bacterial community composition in cadmium-contaminated soils in Xinxiang City and its ability to reduce cadmium bioaccumulation in pak choi (*Brassica chinensis* L.)[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6):2889-2897.
- [5] LI L, ZHANG Y, IPPOLITO J A, et al. Cadmium foliar application affects wheat Cd, Cu, Pb and Zn accumulation[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114329.
- [6] SAIFULLAH, JAVED H, NAEEM A, et al. Timing of foliar Zn application plays a vital role in minimizing Cd accumulation in wheat[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2016, 23(16):16432-16439.
- [7] CHAO W, YU D, ZHANG Z, 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.
- [8] HART J J, WELCH R M, NORVELL W A, et al. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration[J]. *New Phytologist*, 2006, 172(2):261-271.
- [9] 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. 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.
- [10] JOY E, AHMAD W, ZIA M H, et al. Valuing increased zinc (Zn) fertilizer-use in Pakistan[J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1):139-150.
- [11] 汪丹丹. 叶面喷施铁和镁微肥对玉米和小麦幼苗生理代谢及生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016. WANG D D. Effects of spraying iron and magnesium solutions on physiological metabolism and growth of maize and wheat seedlings[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

- [12] 刘学军, 吕世华, 张福锁, 等. 施锰对不同基因型小麦锰营养与根际锰动态的影响[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(3):77-80. LIU X J, LÜ S H, ZHANG F S, et al. Effect of Mn fertilization on Mn nutrition and dynamics of available Mn in rhizosphere of two wheat genotypes[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1999, 4(3):77-80.
- [13] 王振红, 罗专溪, 颜昌宙, 等. 纳米氧化锌对绿豆芽生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4):619-624. WANG Z H, LUO Z X, YAN C Z, et al. Effects of nano-ZnO particles on the growth of green bean sprouts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4):619-624.
- [14] WEI T, LIU X, DONG M, et al. Rhizosphere iron and manganese-oxidizing bacteria stimulate root iron plaque formation and regulate Cd uptake of rice plants (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278:111533.
- [15] YANG Y, LI Y, CHEN W, et al. Dynamic interactions between soil cadmium and zinc affect cadmium phytoavailability to rice and wheat: Regional investigation and risk modeling[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267:155613.
- [16] FAROOQ M, ULLAH A, USMAN M, et al. Application of zinc and biochar help to mitigate cadmium stress in bread wheat raised from seeds with high intrinsic zinc[J]. *Chemosphere*, 2020, 260:127652.
- [17] BABAR H. 硫、氯、铁、锰和有机肥对水稻重金属镉积累及转运的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. BABAR H. Effects of sulfur, chlorine, iron, manganese and organic fertilizer on uptake and transfer of soil cadmium (Cd) by rice plant[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [18] TAKAHASHI R, ISHIMARU Y, SENOURA T, et al. The *OsNRAMP1* iron transporter is involved in Cd accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(14):4843-4850.
- [19] CHEN Z, TANG Y, ZHOU C, et al. Mechanisms of Fe biofortification and mitigation of Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown hydroponically with Fe chelate fertilization[J]. *Chemosphere*, 2017, 175:275-285.
- [20] 马欢欢, 高峰, 樊向阳, 等. 锌对镉胁迫下黄菖蒲抗氧化酶系统及富集镉的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11):104-111. MA H H, GAO F, FAN X Y, et al. The effects of Zn on antioxidant enzymes and accumulation of cadmium in *Iris pseudacorus* under Cd stress[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11):104-111.
- [21] GAO H, XIE W, YANG C, et al. *NRAMP2*, a trans-Golgi network-localized manganese transporter, is required for *Arabidopsis* root growth under manganese deficiency[J]. *New Phytologist*, 2018, 217(1):179-193.
- [22] SUI F Q, CHANG J D, TANG Z, et al. *Nramp5* expression and functionality likely explain higher cadmium uptake in rice than in wheat and maize[J]. *Plant and Soil*, 2018, 433(1/2):377-389.
- [23] WU J, MOCK H P, GIEHL R, et al. Silicon decreases cadmium concentrations by modulating root endodermal suberin development in wheat plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364:581-590.
- [24] CARVALHO M E A, CASTRO P R C, AZEVEDO R A. Hormesis in plants under Cd exposure: From toxic to beneficial element?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384:121434.
- [25] 孙琴, 王超. 土壤 Cd Zn 复合污染对小麦根系植物络合素和谷胱甘肽合成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5):1913-1918. SUN Q, WANG C. Phytochelatin and glutathione synthesis in roots of wheat (*Triticum aestivum* L.) under combined pollution of Cd and Zn in a pot trial[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5):1913-1918.
- [26] 华璐, 陈世宝, 白玲玉, 等. 土壤腐殖酸与¹⁰⁹Cd、⁶⁵Zn及其复合存在的络合物稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(2):187-191. HUA L, CHEN S B, BAI L Y, et al. Studies on stability of ¹⁰⁹Cd, ⁶⁵Zn complex with humic acids[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2001, 34(2):187-191.
- [27] FORSTER S M, RICKERTSEN J R, MEHRING G H, et al. Type and placement of zinc fertilizer impacts cadmium content of harvested durum wheat grain[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(11):1-11.
- [28] QIAO K, WANG F, LIANG S, et al. Improved Cd, Zn and Mn tolerance and reduced Cd accumulation in grains with wheat-based cell number regulator *TaCNR2*[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1):870.
- [29] SUN Q, WANG X R, DING S M, et al. Effects of interactions between cadmium and zinc on phytochelatin and glutathione production in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Environmental Toxicology*, 2005, 20(2):195-201.
- [30] QIAO K, TIAN Y B, HU Z L, et al. Wheat cell number regulator *CNR10* enhances the tolerance, translocation, and accumulation of heavy metals in plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 53(2):860-867.
- [31] QIAO K, WANG F, LIANG S, et al. New biofortification tool: Wheat *TaCNR5* enhances zinc and manganese tolerance and increases zinc and manganese accumulation in rice grains[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(35):9877-9884.
- [32] 夏亦涛. 小麦镉高低积累品种筛选及其镉吸收转运的差异机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. XIA Y T. Selection of high and low accumulation cultivars of cadmium and differential mechanism of cadmium uptake and transport in wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.

(责任编辑:叶飞)