

不同锌肥对土壤镉有效性及小麦镉吸收转运的影响

姚澄, 周天宇, 樊广萍, 周东美, 史高玲, 沈文忠, 张绪美, 陈未, 李江叶, 高岩

引用本文:

姚澄, 周天宇, 樊广萍, 周东美, 史高玲, 沈文忠, 张绪美, 陈未, 李江叶, 高岩. 不同锌肥对土壤镉有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 19-29.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0187>

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>

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

陶雪莹, 徐应明, 王林, 黄青青, 闫秀秀, 刘畅

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2181-2189 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0821>

硅素分期施用对土壤镉形态和水稻镉累积的影响

贺敏杰, 蔡昆争, 王维, 黄飞, 蔡一霞

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1651-1659 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0131>

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>

生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响

王风, 王梦露, 许堃, 董旭, 虞娜, 张玉龙, 党秀丽

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 907-914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1599>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚澄, 周天宇, 樊广萍, 等. 不同锌肥对土壤镉有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 19–29.

YAO C, ZHOU T Y, FAN G P, et al. Effects of different zinc fertilizers on soil cadmium availability and cadmium uptake and transport in wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(1): 19–29.



开放科学 OSID

不同锌肥对土壤镉有效性及小麦镉吸收转运的影响

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

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 3. 南京大学环境学院, 南京 210023; 4. 太仓市农业技术推广中心, 江苏 太仓 215400)

摘要:为探究施用锌肥对污染土壤中小麦Cd吸收转运的影响,采用盆栽试验,研究了两种锌肥(常规锌肥、缓释锌肥)及其不同用量(13、26、66 mg·kg⁻¹)对根际土壤Cd、Zn有效性和小麦Cd、Zn吸收转运的影响。结果表明:施用两种锌肥均可显著增加土壤有效态Zn含量,但施用缓释锌肥在小麦孕穗期、灌浆期和成熟期对土壤有效态Zn的贡献显著高于常规锌肥,且不同生育期小麦根部和地上部Zn含量高于相应浓度常规锌肥处理。在拔节期,施用常规和缓释锌肥均能有效降低小麦根部Cd含量,Cd含量分别比对照(未施锌肥)降低了23%~33%和3%~48%,且中、高浓度锌肥同时显著降低了根部-地上部Cd转移系数。常规和缓释锌肥对灌浆期和成熟期小麦地上部Cd含量的降幅分别为21%~54%和13%~43%。虽然高浓度缓释锌肥在小麦拔节期、孕穗期和灌浆期显著增加了土壤有效态Cd含量,但却显著降低了小麦灌浆期和成熟期根部-地上部Cd转移系数。施用高浓度常规锌肥也能显著降低小麦成熟期根部-地上部Cd转移系数。所有处理中,仅施用高浓度常规和缓释锌肥显著降低了小麦籽粒中Cd含量,降幅分别为19%和29%。相关性分析显示,在小麦全生育期,小麦根部Zn含量与地上部Cd含量呈负相关关系,并且缓释锌肥处理的小麦成熟期地上部-籽粒Cd转移系数随施Zn浓度的增加而减小,表明施用锌肥能有效抑制小麦对Cd的吸收和转运。施用高浓度锌肥抑制Cd从地上部向籽粒转移的效率仍较低,在中重度Cd污染土壤中单施锌肥不能保证小麦的安全生产,需在小麦Cd吸收关键期组合其他阻控技术措施,以进一步降低Cd在小麦籽粒中的积累。

关键词:小麦; 镉; 锌肥; 镉吸收转运

中图分类号: X53; X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)01-0019-11 doi:10.11654/jaes.2023-0187

Effects of different zinc fertilizers on soil cadmium availability and cadmium uptake and transport in wheat

YAO Cheng^{1,2}, ZHOU Tianyu^{1,2}, FAN Guangping^{1,2*}, ZHOU Dongmei³, SHI Gaoling^{1,2}, SHEN Wenzhong⁴, ZHANG Xumei⁴, CHEN Wei^{1,2}, LI Jiangye^{1,2}, GAO Yan^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Nanjing 210014, China; 3. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Taicang Agricultural Technology Extension Center, Taicang 215400, China)

Abstract: In this study, we sought to examine the effects of zinc (Zn) fertilizer on cadmium (Cd) absorption and transport by wheat in polluted soil. Pot experiments were conducted to study the effects of different concentrations (13, 26 mg·kg⁻¹, and 66 mg·kg⁻¹) and types [conventional zinc fertilizer (CZF) and slow-release zinc fertilizer (SZF)] of Zn fertilizers on Cd and Zn availability in rhizospheric soil and

收稿日期: 2023-03-14 录用日期: 2023-07-13

作者简介: 姚澄(1997—), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 从事重金属污染土壤修复研究。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)

the Cd and Zn uptake and transport in wheat. The results revealed that both types of Zn fertilizer promoted significant increases in the content of soil available Zn, although the availability of Zn in soil at the booting, filling and mature stages of wheat was significantly higher in soil treated with SZF than in CZF-treated soil. The application of CZF and SZF effectively reduced the Cd content in wheat roots at the jointing stage, which was 23% – 33% and 3% – 48% lower than that of the control, respectively, whereas only medium- and high-concentration CZF and SZF promoted a significant reduction in the root-shoot Cd transfer coefficient. Compared with the control, the application of CZF and SZF effectively reduced the Cd content in the shoots of wheat at the filling and mature stages, with reductions of 21% – 54% and 13% – 43%, respectively. Although high-concentration SZF significantly ($P < 0.05$) increased the soil available Cd content at the wheat jointing, booting, and filling stages, it promoted a significant reduction ($P < 0.05$) in the root-shoot Cd transfer coefficient at the wheat filling and mature stages. The application of high-concentration CZF also contributed to a significant reduction in the root-shoot Cd transfer coefficient of wheat at the mature stage. In all treatments, only the use of high-concentration CZF and SZF promoted significant reductions ($P < 0.05$) in the Cd content of wheat grains, by 19% and 29%, respectively. Correlation analysis revealed that during the whole growth period of wheat, the Zn content in wheat roots was negatively ($P < 0.05$) correlated with the Cd content in shoots, and that there was a decline in the Cd transfer coefficient from the shoots to grains in response to an increase in Zn concentration, thereby indicating that Zn fertilizers can effectively inhibit the uptake and transport of Cd by wheat. However, the efficiency with which high-concentration Zn fertilizers inhibited the transfer of Cd from the shoots to grains was still low. On the basis of these findings, it is apparent that the application of Zn fertilizer alone to moderately and severely Cd contaminated soil is not sufficient to ensure the safe production of wheat. Accordingly, it will be necessary to combine Zn fertilization with other measures to further reduce the accumulation of Cd in wheat grains at the critical period for Cd absorption by wheat.

Keywords: wheat; Cd; Zn fertilizer; Cd uptake and translocation

小麦是我国主要粮食作物,在粮食生产中具有重要地位。前期研究通过Meta分析^[1]或野外调查^[2]发现小麦籽粒镉(Cd)的富集因子显著高于水稻,易导致小麦籽粒Cd含量超标^[3],影响作物的产量和品质^[4]。另外,Cd移动性强,可通过食物链传递给人体健康带来潜在风险^[5]。Cd进入人体累积后会对肺、肾脏、肝脏、心脑血管、生殖系统、骨骼和免疫系统造成严重损伤^[6]。Cd还会影响人体肠胃系统对钙、磷的吸收,导致骨质疏松、关节疼痛等问题^[7]。近年来,我国小麦主产区的Cd污染事件频繁发生^[8]。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%^[9]。目前研发的Cd污染农田安全利用技术多针对水稻,而降低小麦籽粒Cd积累面临极大挑战^[10]。因此,研发高效、经济、适用的小麦降Cd技术,对于保障农产品质量安全和维护民众身体健康意义重大。

锌(Zn)是植物所必需的微量元素,Zn可以通过减少植物氧化应激^[11]、改善光合作用^[12]、增强光合性能^[13]和促进营养平衡^[14]等方式促进作物生长并增强其抗逆性。另外,Zn和Cd具有相似的化学性质^[11-13],在土壤中,土壤胶体会对Zn²⁺和Cd²⁺进行选择性吸附,表现出竞争作用^[15]。同时,在作物根际和体内,Cd与Zn通过相同的阳离子转运蛋白或转运通道(ZIP、MTP等)进入作物根部并转移到地上部,具有一定的交互作用^[16]。当作物根际存在大量阳离子时,根系中Cd

的累积会减少^[17],进而减少作物对Cd的吸收。有研究表明,土壤中施Zn能抑制不同品种小麦对Cd的吸收,降低小麦地上部分Cd含量^[18]。也有研究表明,基施锌肥会增加小麦Cd累积量^[19]。而牛硕等^[20]的研究表明,施用低量Zn会降低小麦籽粒Cd含量,施用高量Zn会增加小麦籽粒Cd积累。前期研究结果的不一致可能与土壤Cd、Zn的含量和土壤理化性质及作物品种等有关。因此,基施锌肥对降低小麦籽粒Cd累积的效果和作用机制仍有待进一步明确。另外,缓控释肥料可保证作物生长过程中功能元素的长效释放,而目前关于缓控释功能肥料(如缓释锌肥)对小麦Cd吸收的影响研究未见报道。

本研究通过盆栽试验,对比研究施用不同量的硫酸锌肥料和包膜的缓释锌肥对小麦不同生育期根际土壤中有效态Cd、Zn含量以及小麦各部位对Cd、Zn吸收转运的影响,旨在探明不同类型与不同用量的锌肥拮抗小麦Cd吸收转运的效果和潜力,为进一步提升小麦安全生产的优化施肥技术提供理论依据和技术参考。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

供试土壤取自江苏省苏南某市两处相邻的重金属Cd污染农田,土壤Cd含量分别为0.4 mg·kg⁻¹和

7.27 mg·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详见表1。供试小麦品种为扬麦16,属于长江中下游麦区主推品种。

供试锌肥分别为常规硫酸锌粉末(ZnSO₄·7H₂O)和缓释硫酸锌颗粒。缓释硫酸锌由硫酸锌颗粒经包膜而成,硫酸锌颗粒含量98%,购自山东金润梓生物科技有限公司。缓释硫酸锌颗粒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,二者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,将土风干后装入直径22 cm,高24 cm的塑料盆中,每盆装土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:P₂O₅:K₂O=15:15:15)和0.39 g缓释尿素,至盆栽试验结束,不再追肥。Zn以常规硫酸锌粉末和包膜缓释硫酸锌颗粒的形式加入土壤,在表层5~10 cm中充分搅拌均匀。设置Zn的添加量为13、26、66 mg·kg⁻¹,分别记作Zn1、Zn2、Zn3(常规硫酸锌粉末)和SZn1、SZn2、SZn3(包膜缓释硫酸锌颗粒),未施加锌肥的处理作为对照,记作CK。试验设7个处理,每个处理重复12次。盆栽试验在江苏省农业科学院温室大棚内进行,小麦于2021年1月2日播种,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(2021年3月11日)、孕穗期(2021年3月30日)、灌浆期(2021年4月25日)和成熟期(2021年5月19日)采用破坏性取样方法分别采集7个处理3个重复的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(约1 kg),土壤风干、磨细、过10目尼龙筛后置于塑料自封袋中备用。分别采集小麦植株根部、地上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,然后用不锈钢粉碎机粉碎烘干样品,过0.25 mm尼龙

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,上海)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;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用碳酸氢钠提取,钼锑抗比色法测定;速效钾采用乙酸铵提取法测定。土壤有效态Cd、Zn含量采用DTPA(二乙基三胺五乙酸)提取;土壤Cd、Zn含量采用王水消解,小麦各部位Cd含量采用HNO₃-HClO₄(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、Zn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相关系数表征各指标之间的相关性。

小麦根部-地上部Cd转移系数为小麦地上部Cd含量与小麦根部Cd含量之比

小麦地上部-籽粒Cd转移系数为小麦籽粒Cd含量与成熟期小麦地上部Cd含量之比

2 结果与分析

2.1 锌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。在小麦灌浆期和成熟期,施用不同量的常规锌肥和缓释锌肥均未对小麦生长产生显著影响,对成熟期小麦籽粒干质量影响也不显著。在小麦孕穗期,Zn1、Zn2对小麦地上部和根部生物量产生了显著的负面影响;而SZn2、SZn3显著增加了孕穗期小麦根部的生物量,但未对小麦地上部生物量产生显著影响。

2.2 锌肥对土壤pH和Cd、Zn有效性的影响

从图1可以看出,施用锌肥在小麦拔节期和孕穗期对土壤pH的影响较为显著。在小麦拔节期,Zn3

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the used soils

土壤pH Soil pH	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alk-N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Avail. P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Avail. K/(mg·kg ⁻¹)	总Cd T Cd/(mg·kg ⁻¹)	总Zn T Zn/(mg·kg ⁻¹)
6.0	29.1	1.6	70.8	15.1	170.0	2.0	81.8

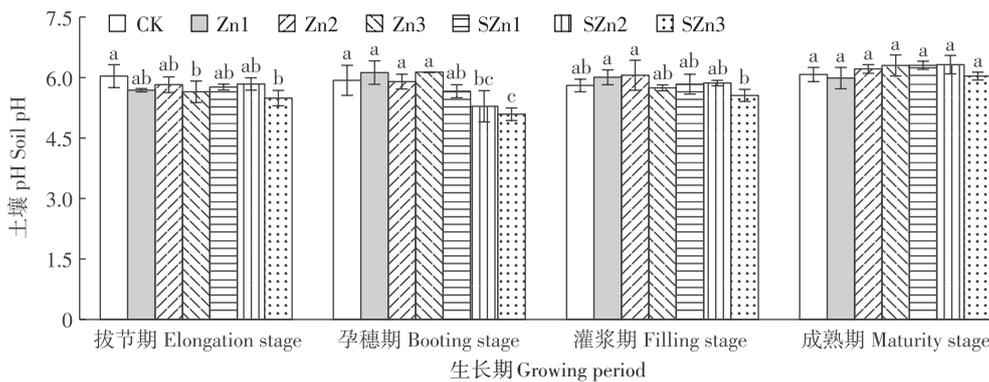
表2 锌肥对小麦生长的影响(g·盆⁻¹,干质量)

Table 2 Effects of zinc fertilizer treatments on the growth of wheat(g·pot⁻¹, dry weight)

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 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	籽粒 Grain
CK	11.30±2.24a	1.37±0.15a	40.88±2.16ab	2.83±0.20b	50.48±3.76abc	3.60±0.08ab	63.00±3.63a	3.32±0.20a	14.90±0.85a
Zn1	9.31±0.84abc	1.24±0.05ab	27.82±0.81c	1.76±0.08d	53.48±2.56ab	3.27±0.17b	53.20±5.47a	3.56±0.36a	14.19±1.19a
Zn2	10.60±0.80ab	1.09±0.08b	29.24±1.32c	1.60±0.06d	45.28±1.12c	3.21±0.25b	61.82±4.58a	3.08±0.28a	15.69±2.00a
Zn3	11.34±0.78a	1.21±0.12ab	43.88±4.13a	2.56±0.12bc	57.36±4.48a	3.56±0.06ab	57.04±7.71a	3.16±0.04a	14.06±0.50a
SZn1	8.60±0.56bc	1.27±0.04ab	37.52±5.28b	2.32±0.14c	49.44±7.23bc	3.92±0.16a	52.32±7.52a	3.40±0.20a	15.77±0.33a
SZn2	7.73±0.83c	1.30±0.18a	40.52±3.32ab	3.33±0.44a	43.81±4.35c	3.32±0.44b	62.16±9.05a	3.68±0.32a	14.55±1.01a
SZn3	9.52±0.82abc	1.08±0.07b	46.00±3.12a	3.32±0.28a	57.15±1.15a	3.28±0.10b	55.03±2.43a	3.28±0.01a	13.42±1.89a

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).



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 施用不同锌肥对小麦不同生长期土壤pH的影响

Figure 1 Effects of different zinc fertilizer on soil pH in different growing periods of wheat

和SZn3处理显著降低了土壤pH,分别比CK降低了0.39个和0.55个单位。在小麦孕穗期,施用缓释锌肥降低了土壤pH,且土壤pH随锌肥用量的增加而降低,SZn2、SZn3处理的土壤pH与CK相比分别降低了0.64个和0.84个单位。在小麦灌浆期和成熟期,施用锌肥处理的土壤pH逐渐提升,与CK无显著差异。

施用锌肥后小麦不同生长期土壤有效态Zn、Cd含量的变化如图2所示。CK处理中,土壤有效态Zn含量在小麦全生育期一直处于较低水平(低于2 mg·kg⁻¹)。常规锌肥处理中,仅Zn3在小麦拔节期和成熟期均显著增加了土壤有效态Zn含量,比CK增加了10倍和9倍。而SZn3处理在小麦孕穗期、灌浆期、成熟期均大幅增加了土壤有效态Zn含量(相比CK增加了46~131倍),且土壤有效态Zn含量随小麦生长呈逐渐下降趋势。但SZn3处理在小麦拔节期、孕穗期和灌浆期显著增加了土壤有效态Cd含量,比CK增加了8%~21%,这与SZn3处理影响土壤pH的变化规律相一致。在小麦孕穗期和灌浆期,SZn2处理也使土壤

有效态Zn含量分别增加了58倍和13倍,但对土壤Cd有效性无显著影响;Zn2处理也提高了土壤Zn的有效性,但未对土壤Cd有效性产生显著影响。在小麦成熟期,虽然施用Zn1、Zn2和SZn1未显著改变土壤Zn的有效性,但均显著(P<0.05)降低了土壤有效态Cd含量,与CK相比土壤有效态Cd含量降低了5%~11%。

2.3 锌肥对小麦根部和地上部Zn、Cd含量的影响

由图3a和图3c可知,小麦根部Zn、Cd含量随小麦生长总体呈下降趋势。在小麦全生育期,施用中、高浓度缓释锌肥处理小麦根部Zn含量均显著高于相应浓度常规锌肥处理。与CK相比,SZn2、SZn3和Zn3能显著提高小麦拔节期和灌浆期根部Zn含量,增幅为44%~147%和113%~762%。Zn1、Zn3和SZn3在小麦灌浆期显著降低了小麦根部Cd含量,降幅为22%~25%。而在小麦拔节期,施用常规锌肥和缓释锌肥均能有效降低小麦根部Cd含量,分别比CK降低了23%~33%和3%~48%。在小麦孕穗期,与CK相比,

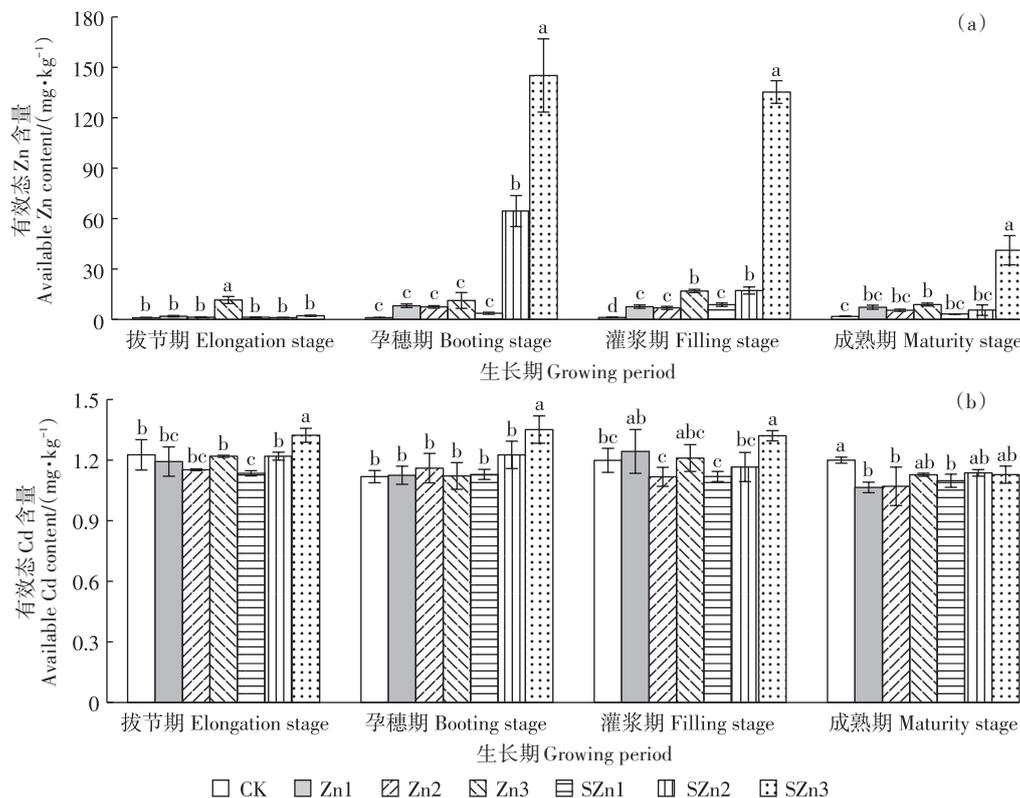


图2 锌肥对小麦不同时期土壤有效态Zn和Cd含量的影响

Figure 2 Effects of zinc fertilizer on soil available Zn and Cd contents in different periods of wheat

SZn1、SZn2、SZn3处理分别使小麦根部Zn含量增加了253%、342%和673%;其中,SZn1、SZn3处理显著降低了小麦根部Cd含量,分别比CK降低了20%和32%。在小麦成熟期,与CK相比,除Zn2外,其余处理均显著增加了小麦根部Zn含量,增幅为49%~251%。Zn1显著增加了成熟期小麦根部Cd含量,比CK增加了29%,而其余施用常规锌肥和缓释锌肥处理的小麦根部Cd含量与CK相比无显著差异。

由图3b和图3d可知,小麦地上部Zn、Cd含量随小麦生长呈先下降后上升的趋势。在小麦全生育期,缓释锌肥处理中小麦地上部Zn含量均高于常规锌肥处理。在小麦拔节期和孕穗期,SZn1、SZn2、SZn3均显著($P < 0.05$)增加了小麦地上部Zn含量,增幅分别为41%~56%、70%~196%和128%~326%;其中SZn2在拔节期和孕穗期能显著($P < 0.05$)降低小麦地上部Cd含量,相比CK降低了33%和12%。在小麦灌浆期,Zn3和SZn3均显著增加了小麦地上部Zn含量,相比CK分别增加了38%、188%。在小麦成熟期,除Zn2处理外,其余处理均显著增加了小麦地上部Zn含量,增幅为49%~230%。同时,在小麦灌浆期和成熟期,与CK相比,施用常规和缓释锌肥均能有效降低小麦地

上部Cd含量,降幅分别为21%~54%和13%~43%。

2.4 锌肥对小麦籽粒Zn、Cd含量的影响

小麦籽粒中Zn、Cd含量的变化如图4所示。由图4a可知,施用锌肥均显著增加了小麦籽粒中Zn含量,且常规锌肥处理中小麦籽粒Zn含量显著高于施用相应浓度缓释锌肥处理。与CK相比,施用常规锌肥使小麦籽粒Zn含量增加了167%~187%,而缓释锌肥处理中小麦籽粒Zn含量增幅分别为50%、125%和136%。由图4b可知,施用锌肥均能在一定程度上降低小麦籽粒中Cd含量,施用常规锌肥和缓释锌肥分别使小麦籽粒Cd含量降低了1%~19%和2%~29%。常规锌肥处理中,籽粒中Cd含量随施Zn含量的增加逐渐降低。所有处理中仅Zn3和SZn3显著降低了小麦籽粒中Cd含量,分别比CK降低了19%和29%。

2.5 锌肥对小麦Cd转移系数的影响

施锌肥对小麦根部-地上部、地上部-籽粒Cd转移系数的影响如图5所示,结果表明小麦在成熟期根部-地上部的Cd转移系数显著高于其他时期。施用常规或缓释锌肥均可有效降低小麦灌浆期和成熟期根部Cd向地上部的转运。在灌浆期,缓释锌肥降低小麦根部Cd向地上部转运的效果优于常规锌肥;在

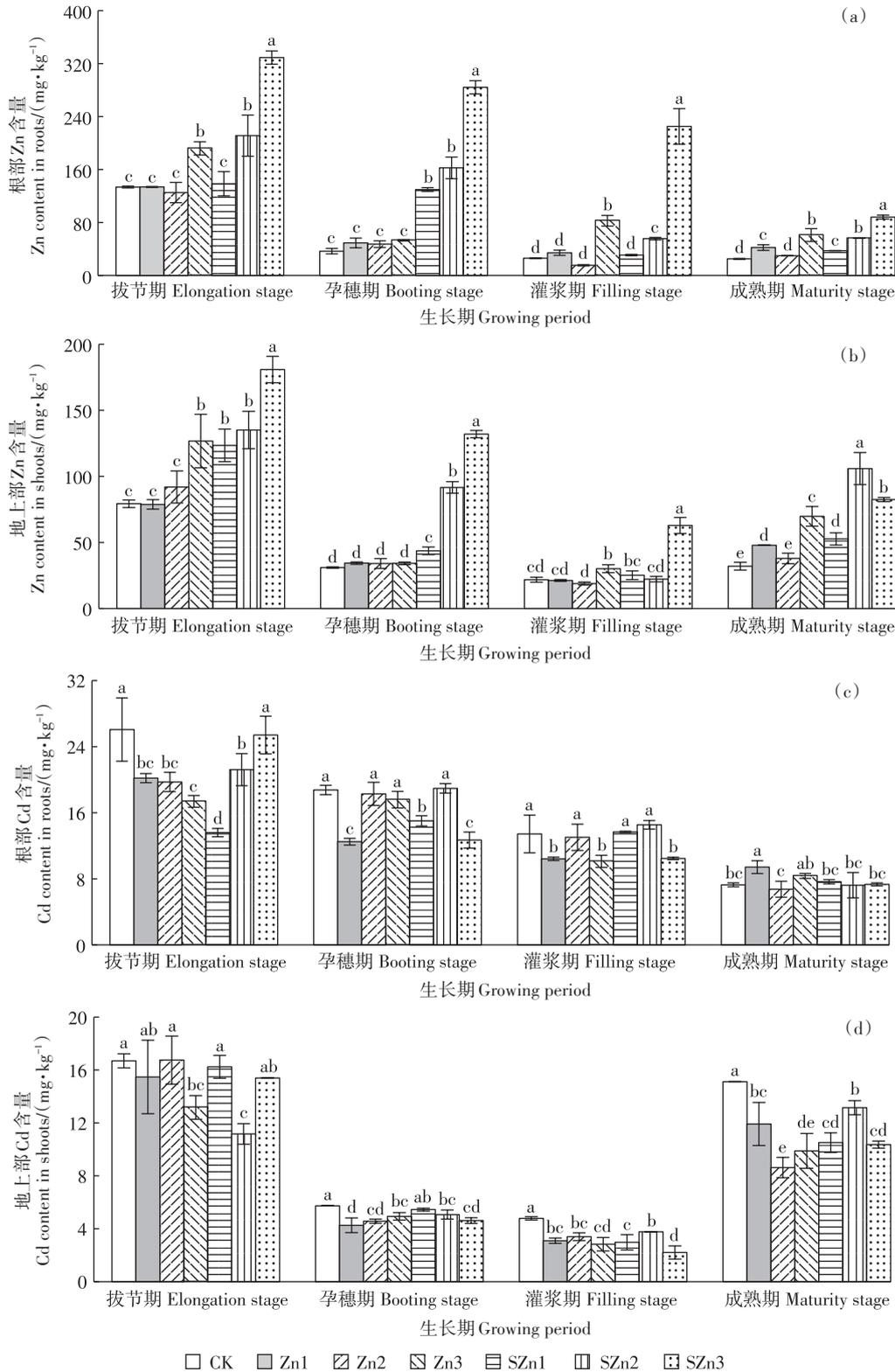


图3 施用锌肥处理对小麦各生长时期根部和地上部Zn和Cd含量的影响

Figure 3 Effects of zinc fertilizer application on Zn and Cd contents in roots and shoots of wheat in different growing periods

成熟期,常规锌肥以及SZn1、SZn3处理的根部-地上部Cd转移系数均显著低于CK。施用缓释锌肥处理

的地上部-籽粒Cd转移系数随Zn添加量的增加呈下降趋势。Zn2和SZn1显著提升了小麦地上部-籽粒

Cd转移系数,但其他处理并未显著增加地上部-籽粒Cd的转移系数。

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

由表3可知,在小麦全生育期,土壤有效态Zn含量与小麦地上部、根部Zn含量均呈正相关关系,其中孕穗期和灌浆期的土壤有效态Zn含量与小麦地上部、根部Zn含量的相关性达到极显著性水平($P < 0.01$),表明施用锌肥提高了土壤有效态Zn含量,并促进了小麦根部和地上部对Zn的吸收。在小麦全生

育期,土壤有效态Zn含量与小麦地上部和根部Cd含量均呈负相关,其中灌浆期的土壤有效态Zn含量与小麦地上部Cd含量的相关性达到极显著水平($P < 0.01$);并且在小麦全生育期,根部Zn含量均与小麦地上部Cd含量呈负相关。这表明施用锌肥在促进小麦根部Zn吸收的同时,可以拮抗小麦地上部的Cd吸收。

3 讨论

3.1 锌肥对土壤Cd、Zn有效性的影响

施入土壤中的微量元素可通过改变土壤性质和

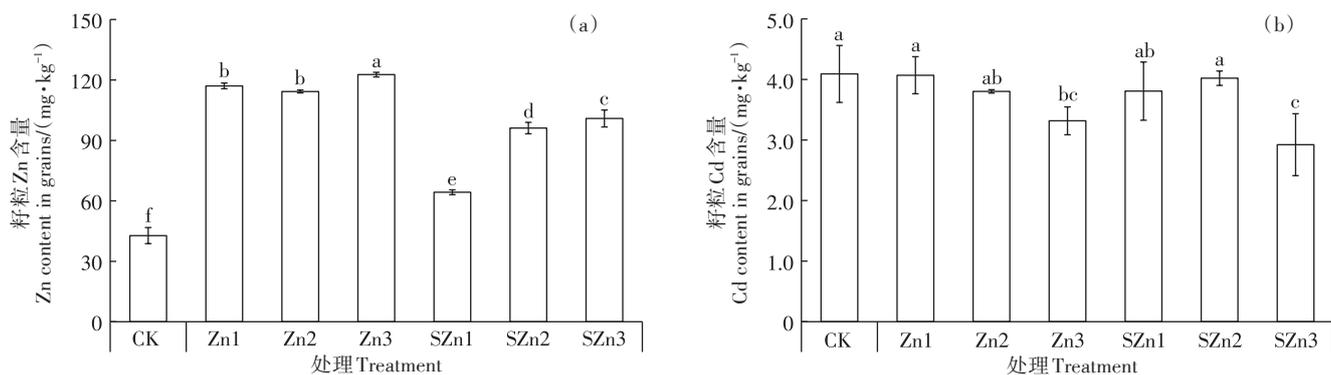


图4 施用锌肥处理对小麦籽粒Zn和Cd含量的影响

Figure 4 Effects of zinc fertilizer treatment on Zn and Cd content of wheat grain

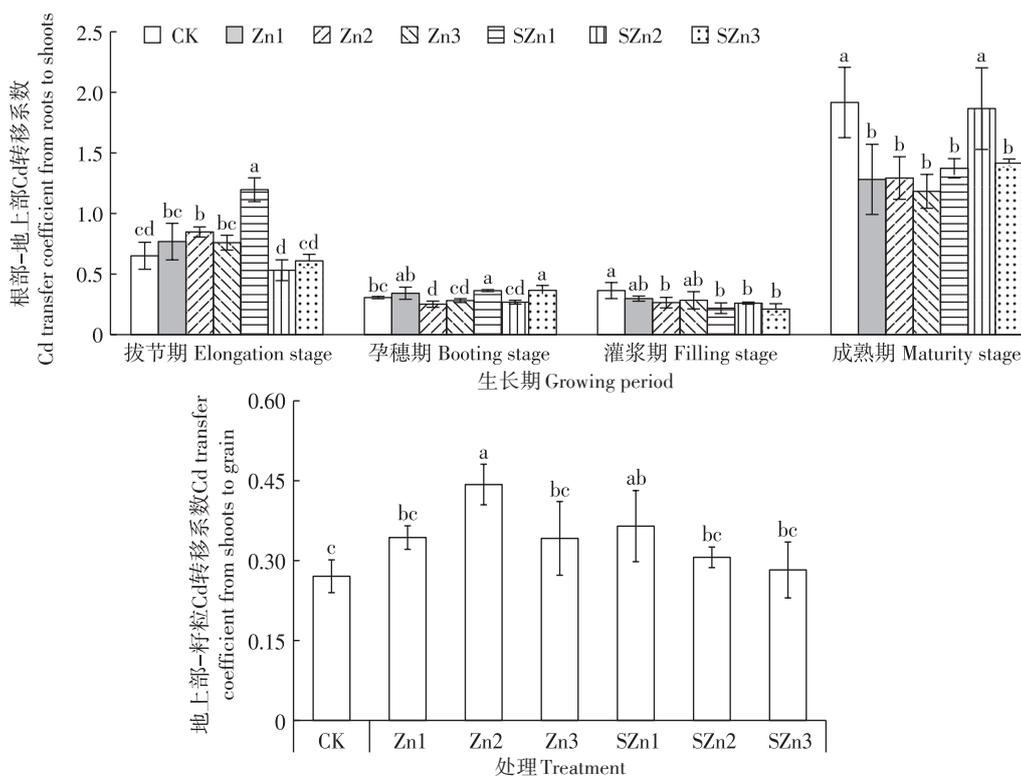


图5 施锌处理对小麦Cd转移系数的影响

Figure 5 Effects of zinc fertilization on Cd transfer coefficient

表3 土壤有效态Zn含量与小麦各部位Cd、Zn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 Zn content wheat Cd, Zn content and Cd transfer coefficient

生长期 Growing period	土壤有效态Zn Soil available Zn content	地上部Zn含量 Zn content in shoots	根部Zn含量 Zn content in roots	地上部Cd含量 Cd content in shoots	根部Cd含量 Cd content 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Zn	1	0.140	0.139	-0.326	-0.264
	地上部Zn含量		1	0.877**	-0.279	0.086
	根部Zn含量			1	-0.300	0.384
	地上部Cd含量				1	0.049
	根部Cd含量					1
	根部-地上部Cd转移系数					1
孕穗期 Booting stage	土壤有效态Zn	1	0.968**	0.922**	-0.243	-0.357
	地上部Zn含量		1	0.961**	-0.180	-0.312
	根部Zn含量			1	-0.125	-0.414
	地上部Cd含量				1	0.459*
	根部Cd含量					1
	根部-地上部Cd转移系数					1
灌浆期 Filling stage	土壤有效态Zn	1	0.958**	0.961**	-0.599**	-0.386
	地上部Zn含量		1	0.976**	-0.556**	-0.453*
	根部Zn含量			1	-0.582**	-0.451*
	地上部Cd含量				1	0.487*
	根部Cd含量					1
	根部-地上部Cd转移系数					1
成熟期 Maturity stage	土壤有效态Zn	1	0.410	0.838**	-0.280	-0.085
	地上部Zn含量		1	0.740**	0.029	-0.140
	根部Zn含量			1	-0.205	-0.052
	地上部Cd含量				1	0.214
	根部Cd含量					1
	根部-地上部Cd转移系数					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.

重金属形态影响植物重金属吸收。本研究发现, SZn3处理在小麦孕穗期和灌浆期大幅增加了土壤中有效态Zn含量(图2a), 同时也在小麦拔节期、孕穗期和灌浆期显著增加了土壤中有效态Cd含量(图2b)。施用锌肥增加了土壤中有效态Cd含量的结果与Sharif等^[21]的研究结果相一致。这可能是因为Zn与Cd具有极其相似的化学性质^[14-15], 而缓释锌肥在小麦孕穗期和灌浆期持续供应的Zn元素取代了土壤中Cd的吸附位点, 降低了土壤胶体对Cd的吸附, 从而增加了Cd的含量^[20-23]。另外, 由于硫酸锌属于生理酸性肥料, 硫酸盐会与作物代换吸收释放出来的 H^+ 结合形成硫酸从而使土壤pH降低^[24], 并且 SO_4^{2-} 在好氧条件下会与土壤中的 Cd^{2+} 形成 $CdSO_4$ 络合物, 也会导致土壤有效态Cd含量的增加^[25]。SZn3处理在小麦拔节期、孕穗期和灌浆期降低了土壤pH(图1), 这也会一

定程度上导致Cd的有效性提高。虽然SZn3处理在小麦孕穗期和灌浆期显著增加了土壤中有效态Cd含量, 但未显著增加小麦地上部和根部Cd含量(图3)。各施锌肥处理小麦成熟期土壤有效态Cd含量与CK相比均有所降低(图2b), 这与Zhou等^[13]的研究结果相一致。另外, 本研究中, SZn2、SZn3在小麦孕穗期和灌浆期大幅增加了土壤有效态Zn含量(图2a), 其远超土壤中Zn的添加量, 这与缓释肥的添加方式有关。缓释锌肥是以颗粒形式加入土壤, 其在土壤中呈颗粒状态分布, 取样时未释放的颗粒容易导致部分区域Zn含量偏高。

3.2 锌肥对小麦根部和地上部Cd累积及分配的影响

本研究中, 施用不同量、不同类型的锌肥均可增加小麦各部位Zn含量(图3a、图3b), 并降低了小麦拔节期根部Cd含量及孕穗期、灌浆期和成熟期小麦地

上部Cd含量(图3c、图3d)。小麦全生育期土壤中有有效态Zn含量与小麦地上部和根部Cd含量均呈负相关关系,并且小麦根部Zn含量均与小麦地上部Cd含量呈负相关关系,表明基施锌肥能降低小麦根部对Cd的吸收和向地上部的转运及分配,Zn、Cd之间具有拮抗作用,这与前人的研究结果一致^[11,26]。前期研究表明Zn与Cd均可通过质外体途径沿细胞壁中的空隙从表皮、皮层到内皮层,然后进入木质部和韧皮部中传输^[27-28];同时,Zn与Cd可从根毛细胞膜上的通道进入后,再利用细胞与细胞间的胞间连丝经由皮层、内皮层及周鞘进入根内导管细胞进行传输^[27,29-30]。目前,已经明确锌铁调控转运ZIP家族蛋白参与Cd的吸收和转运^[31-32]。Zn与Cd两者具有相同的吸收通道和转运蛋白,存在拮抗作用^[12,31]。韩潇潇^[33]的研究发现,施用不同浓度锌肥可以降低水稻各器官Cd含量。Zhou等^[26]的研究表明,在土壤中施加Zn可以抑制小麦根系Cd吸收并降低小麦籽粒Cd含量。另外,本研究发现,SZn3处理使土壤pH下降,根际土壤中的Cd活化导致土壤Cd有效性升高,但依然能够抑制小麦地上部Cd吸收,表明Zn与Cd之间的拮抗作用发挥了主要作用。

本研究发现小麦根部累积的Cd向地上部转运的关键时期在拔节期,该时期小麦地上部Cd含量最高。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,发现拔节-抽穗期和灌浆期Cd²⁺吸收量及吸收速率显著高于其他时期。本研究中,在小麦拔节期各部位Zn含量最高,并且施用锌肥降低了小麦根部Cd含量(图3),这与小麦Zn吸收、分配特点较为匹配。相关研究表明,拔节期前小麦叶片中Zn的分配率占全株总积累量的50%以上,后期籽粒Zn的积累主要取决于各器官再分配^[35]。因此,小麦拔节期是调控小麦Cd吸收的关键时期,可通过基施锌肥抑制根系对Cd的累积。另外,本研究中施用不同量和不同类型的锌肥均显著降低了灌浆期小麦地上部Cd的含量(图3d),缓释锌肥与Zn2同时显著降低了根-地上部的转移系数(图5)。周振^[36]的研究结果表明Zn的营养迁移时期主要集中在抽穗期和灌浆期。本研究发现成熟期Cd向地上部和籽粒的转移能力均较高,基施锌肥并未降低小麦成熟期地上部-籽粒的Cd转移系数(图5b),仅Zn3和SZn3处理显著降低了小麦籽粒Cd含量(降幅分别为19%和29%)。本研究结果表明,在小麦成熟期,通过根部吸收至地上部的Cd快速向籽粒转移,此时仅通过基施锌肥拮抗

Cd向籽粒中转移的效果仍不理想。前期研究表明,基施锌肥对成熟期小麦籽粒Zn含量的提升效果比叶面喷施锌肥差^[37],叶面喷施锌肥能有效降低作物籽粒中Cd含量。Zhou等^[26]研究发现,对高积累品种小麦叶面喷施ZnSO₄能使小麦籽粒Cd含量降低25%~52%。Wu等^[11]的研究也表明叶面喷施锌和硒肥均能显著降低小麦籽粒Cd含量,降幅为13%~63%。因此,在小麦成熟期,叶面喷施锌肥可能对提高地上部与籽粒Zn含量的效果更好,更有利于抑制Cd向小麦籽粒中的转移。

不同锌肥用量对拮抗小麦不同生育期Cd吸收的效果差异较大。Zn3或SZn2对抑制拔节期小麦地上部Cd含量或降低拔节期根部-地上部Cd转移系数的效果明显优于低浓度锌肥。同时,在成熟期SZn3或Zn3均能显著降低地上部与籽粒中Cd的含量,虽然施用锌肥会导致部分土壤Cd的活化,但是高浓度锌肥处理下Zn和Cd表现出的拮抗作用是降低小麦Cd吸收的主要原因。但施Zn对抑制Cd从地上部向籽粒转移的效率仍较低。这可能是由于施Zn的同时也会导致小麦根部对Cd²⁺的被动运输增加,Zn含量的提高使小麦产生更多与Zn²⁺相关的转运蛋白,这些转运载体也会相应提高Cd²⁺的转运^[20]。周振^[36]的研究发现,在不同生育时期小麦对Cd的吸收表现出拮抗与协同两种截然相反的结果,缺Zn土壤适量施Zn有助于小麦的生长,减少Cd的吸收,但随着Zn水平的增大,Cd吸收出现先减少后增加的现象。Sarwar等^[38]的研究发现,基施锌肥对小麦籽粒Cd累积无明显影响,低浓度锌肥处理增加小麦旗叶Cd含量。因此,Zn对小麦Cd吸收的影响可能与外界Zn含量、土壤性质、作物生育期和施用方式有关,仍需进一步开展科学精准施Zn的相关研究。

3.3 锌肥对小麦籽粒Cd累积的影响

本研究中,施用锌肥均显著增加了小麦籽粒中Zn含量(图4a),这与以往的大量研究结果相一致^[13,21]。另外,本研究发现施用锌肥均能降低小麦籽粒Cd含量,但仅SZn3、SZn3显著降低了小麦籽粒中Cd含量(图4b)。通过进一步分析发现,SZn3能降低小麦灌浆期和成熟期根部-地上部Cd转移系数,Zn3能降低小麦成熟期根部-地上部Cd转移系数(图5a),并且施用缓释锌肥处理中小麦地上部-籽粒Cd转移系数随施Zn量的增加而减少(图5b),表明高浓度锌肥可以缓解小麦Cd根部-地上部-籽粒的转移,从而降低小麦籽粒Cd含量,这与前人的研究结果不一致。

Zhou等^[13]的研究表明,缺Zn土壤适量施Zn有助于降低小麦籽粒Cd吸收,其作用效果与Zn的施用量密切相关,施Zn 40 mg·kg⁻¹时效果最好,80 mg·kg⁻¹时效果最差。牛硕等^[20]通过田间试验探究了不同用量Zn对两地小麦籽粒Cd累积的影响,发现土壤Zn小于200 mg·kg⁻¹时,土壤Zn是土壤-小麦系统Cd富集的主要影响因子,Zn和Cd表现出拮抗作用;而土壤Zn大于200 mg·kg⁻¹时,土壤Cd的活化是影响小麦籽粒Cd富集的主要原因,Zn和Cd表现出协同效果。本研究中,供试土壤为弱酸性土壤,不同于前两个研究中的弱碱性土壤,另外,本研究中土壤Zn添加量最高为66 mg·kg⁻¹,低于文献中的Zn施用量,因此,未出现高含量Zn提高小麦Cd吸收的现象。但研究中施用锌肥显著降低了小麦地上部-籽粒Cd转移系数(图5b),虽然高浓度锌肥对降低小麦籽粒Cd含量效果最好,但由于土壤中Cd的含量较高而仍难达到国家食品安全标准。因此,施用锌肥抑制小麦Cd累积的作用效果与土壤Cd含量直接相关,可能存在保障小麦安全生产的土壤Cd含量阈值,这有待进一步系统研究明确。

综上所述,施用高浓度锌肥可以提升土壤有效态Zn含量,增加小麦地上部和根部Zn含量,降低小麦孕穗期、灌浆期和成熟期地上部Cd含量及Cd向地上部的转移,从而减少小麦籽粒Cd含量。但在成熟期锌肥抑制籽粒Cd累积的效率仍有待提升,建议基施高含量锌肥的同时在小麦Cd吸收关键期组合叶面喷施锌肥,一方面调控小麦生长后期对Zn的需求,另一方面通过喷施叶面锌肥在小麦灌浆期和成熟期进一步控制Cd向小麦籽粒的迁移。

4 结论

(1)施用66 mg·kg⁻¹缓释锌肥会降低土壤pH,显著提高小麦拔节期、孕穗期和灌浆期土壤有效态Cd含量,同时显著提高小麦生长中后期土壤中有效态Zn含量。缓释锌肥在小麦孕穗期、灌浆期和成熟期对土壤有效态Zn的供给高于常规锌肥。

(2)基施锌肥促进了小麦各部位对Zn的吸收,缓释锌肥处理中小麦不同时期根部和地上部Zn含量高于相应含量的常规锌肥处理。

(3)施用锌肥处理在灌浆期和成熟期有效降低了小麦地上部Cd含量,减少了小麦根部Cd向地上部转运,Cd和Zn呈拮抗作用。66 mg·kg⁻¹缓释锌肥显著降低了小麦灌浆期和成熟期根部-地上部Cd转移系数。

(4)66 mg·kg⁻¹常规锌肥和缓释锌肥显著降低了小麦籽粒中Cd含量,降幅分别为19%和29%。但在中、重度Cd污染土壤中,单独施用锌肥不能保证小麦的安全生产,需在小麦Cd吸收关键期组合其他阻控技术措施,进一步降低Cd在小麦籽粒中的积累。

参考文献:

- [1] LI X F, ZHOU D M. A Meta-analysis on phenotypic variation in cadmium accumulation of rice and wheat: implications for food cadmium risk control[J]. *Pedosphere*, 2019, 29(5):545-553.
- [2] YANG J L, CANG L, WANG X, et al. Field survey study on the difference in Cd accumulation capacity of rice and wheat in rice-wheat rotation area[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4):2082-2092.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] TAYEBEH A, AMIN M. Cadmium uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.): an overview[J]. *Plants*, 2020, 9(4):500.
- [6] MÉNDEZ-ARMENTA M, RÍOS C. Cadmium neurotoxicity[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2007, 23(3):350-358.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] WU C, DUN Y, ZHANG Z J, et al. Foliar application of selenium and zinc to alleviate wheat (*Triticum aestivum* L.) cadmium toxicity and uptake from cadmium-contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 190:110091.
- [12] LIU W X, SHANG S H, FENG X, et al. Modulation of exogenous selenium in cadmium-induced changes in antioxidative metabolism, cadmium uptake, and photosynthetic performance in the 2 tobacco genotypes differing in cadmium tolerance[J]. *Environmental Toxicology and*

- Chemistry*, 2015, 34(1):92-99.
- [13] ZHOU Z, ZHANG B, LIU H T, 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.
- [14] RIZWAN M, ALI S, HUSSAIN A, et al. Effect of zinc-lysine on growth, yield and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment[J]. *Chemosphere*, 2017, 187:35-42.
- [15] KHAN Z S, RIZWAN M, HAFEEZ M, et al. The accumulation of cadmium in wheat (*Triticum aestivum*) as influenced by zinc oxide nanoparticles and soil moisture conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(19):19859-19870.
- [16] YANG Y, LI Y L, CHEN W P, 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, 267:115613.
- [17] TAKAHASHI R, ISHIMARU Y, SHIMO H, et al. OshMA2 transporter is involved in root-to-shoot translocation of Zn and Cd in rice[J]. *Plant Cell and Environment*, 2012, 35(11):1948-1957.
- [18] 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*, 2005, 167(2):391-401.
- [19] NAN Z R, LI J J, ZHANG J M, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 285(1):187-195.
- [20] 牛硕, 王天齐, 杨阳, 等. 田间施用锌肥对小麦籽粒镉累积的影响及施用风险[J]. *环境科学*, 2023, 44(2):984-990. NIU S, WANG T Q, YANG Y, et al. Effect of zinc fertilizer application in wheat grain and its application risk[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2):984-990.
- [21] SHARIF A S, SUZELLE F B. Effect of soil fertility and transpiration rate on young wheat plants (*Triticum aestivum*) Cd/Zn uptake and yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 82(1):177-192.
- [22] 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.
- [23] LIU J G, LI K Q, XU J K, et al. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(3):271-281.
- [24] 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.
- [25] WANG K, FU G P, YU Y, et al. Effects of different potassium fertilizers on cadmium uptake by three crops[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(26):27014-27022.
- [26] 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 (Pt A):115045.
- [27] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. *生态学报*, 2015, 35(23):7921-7929. WANG X J, WANG W B, YANG L, et al. Transport pathways of cadmium (Cd) and its regulatory mechanisms in plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23):7921-7929.
- [28] SEREGIN I V, KOZHEVNIKOVA A D. Roles of root and shoot tissues in transport and accumulation of cadmium, lead, nickel, and strontium[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, 55(1):1-22.
- [29] LIU X Q, OENG K J, WANG A G, et al. Cadmium accumulation and distribution in populations of *Phytolacca americana* L. and the role of transpiration[J]. *Chemosphere*, 2009, 78(9):1136-1141.
- [30] VAN B F, CUYPERS A, SEMANE B, et al. Subcellular localization of cadmium in roots and leaves of *Arabidopsis thaliana*[J]. *The New Phytologist*, 2007, 173(3):495-508.
- [31] WU X, SU N, YUE X, et al. IRT1 and ZIP2 were involved in exogenous hydrogen-rich water-reduced cadmium accumulation in *Brassica chinensis* and *Arabidopsis thaliana*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 407:124599.
- [32] 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 and Pollution Research*, 2016, 23(16):16432-16439.
- [33] 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. HAN X X. Effects of zinc and manganese on cadmium absorption and transport in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019:15.
- [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] 党红凯, 李瑞奇, 孙亚辉, 等. 高产冬小麦对锌的吸收、积累与分配[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(9):1791-1799. DANG H K, LI R Q, SUN Y H, et al. Absorption, accumulation and distribution of zinc in high-yielding winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9):1791-1799.
- [36] 周振. 锌对小麦镉吸收累积特性的影响及其作用机理[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019. ZHOU Z. Effects of zinc on cadmium absorption and accumulation characteristics of wheat and its mechanism[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.
- [37] CAKMAK I, KALAYCI M, KAYA Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(16):9092-9102.
- [38] SARWAR N, ISHAG W, FARID G, et al. Zinc-cadmium interactions: impact on wheat physiology and mineral acquisition[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122:528-536.