

土壤镉污染和叶面施锌对小麦不同部位镉锌含量的影响

何富豪, 田超, 户少武, 罗景升, 李通, 王云霞, 景立权, 黄建晔, 杨连新

引用本文:

何富豪, 田超, 户少武, 罗景升, 李通, 王云霞, 景立权, 黄建晔, 杨连新. 土壤镉污染和叶面施锌对小麦不同部位镉锌含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 741–751.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-1093>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

臭氧浓度升高和叶面施锌对小麦籽粒产量、锌浓度及有效性的影响

张庆, 贾一磊, 杨连新, 王余龙, 王云霞

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 728–736 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1043>

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>

叶面喷施不同浓度锌对水稻锌镉积累的影响

吕光辉, 许超, 王辉, 帅红, 王帅, 李佰重, 朱奇宏, 朱捍华, 黄道友

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1521–1528 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0709>

小麦株高和茎秆不同部位砷镉磷含量与籽粒砷镉磷含量的关系

史高玲, 马鸿翔, 娄来清, 蔡庆生

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 8–15 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1044>

叶面施锌对不同水稻品种稻米锌营养的影响及其机理

张欣, 户少武, 章燕柳, 牛玺朝, 邵在胜, 杨阳, 童楷程, 王云霞, 杨连新

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1450–1458 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1256>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何富豪, 田超, 户少武, 等. 土壤镉污染和叶面施锌对小麦不同部位镉锌含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 741–751.

HE F H, TIAN C, HU S W, et al. Effects of soil cadmium pollution and foliar zinc application on cadmium and zinc concentration in different organs of wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(4): 741–751.



开放科学 OSID

土壤镉污染和叶面施锌对小麦不同部位镉锌含量的影响

何富豪¹, 田超¹, 户少武¹, 罗景升², 李通², 王云霞^{2*}, 景立权¹, 黄建晔¹, 杨连新^{1*}

(1. 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州大学农学院, 江苏 扬州 225009; 2. 农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 为了探究土壤镉污染和叶面施锌对小麦地上部各器官镉锌含量的影响, 以宁麦 21、扬辐麦 4 号和镇麦 12 号为试材, 设置对照、土壤镉处理 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、叶面施锌 ($0.2\% \text{ ZnSO}_4$) 和土壤镉处理+叶面施锌 4 个处理, 研究镉锌互作对小麦生长和产量及植株各器官镉锌含量、积累与转运的影响。结果表明: 土壤镉污染、抽穗始期两次叶面施锌对不同品种小麦生长和产量性状 (SPAD 值除外) 均无显著影响。镉污染使供试小麦籽粒、茎秆、叶片、穗轴和颖壳的镉含量 (17~65 倍) 和累积量 (17~64 倍) 均大幅增加。叶面施锌显著增加了不同品种小麦各器官锌含量 ($>61\%$) 和累积量 ($>58\%$)。叶面施锌对小麦地上部总镉累积量无影响, 但改变了镉在不同器官间的分布情况, 喷锌使镉污染小麦籽粒镉含量显著降低 10%, 但使茎秆、叶片和穗轴镉含量显著增加 12%~55%。喷锌处理使镉污染植株麦草向籽粒镉转运系数显著下降 (15%~31%), 但镉污染对锌的转运系数无明显影响。统计分析表明, 镉处理、锌处理及其互作对小麦镉、锌含量的影响多存在不同程度的品种和部位依赖。综上所述表明, $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉污染对各供试品种小麦产量均无明显影响, 但籽粒及麦草镉含量均大幅增加, 叶面施锌在显著降低可食用部位镉含量的同时亦增加了饲用部位镉含量, 变幅多因品种而异。

关键词: 镉污染; 叶面施锌; 小麦; 品种; 部位

中图分类号: X53; S512.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)04-0741-11 doi:10.11654/jaes.2023-1093

Effects of soil cadmium pollution and foliar zinc application on cadmium and zinc concentration in different organs of wheat

HE Fuhao¹, TIAN Chao¹, HU Shaowu¹, LUO Jingsheng², LI Tong², WANG Yunxia^{2*}, JING Liqun¹, HUANG Jianye¹, YANG Lianxin^{1*}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Agricultural College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: To investigate the effects of soil Cd pollution and foliar Zn application on Cd and Zn concentrations in aboveground organs, a pot experiment using three wheat cultivars Ningmai 21, Yangfumai 4, and Zhenmai 12 were conducted. Four treatments with different Cd and Zn combination were prepared: control, soil-applied Cd ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), foliar-applied Zn ($0.2\% \text{ ZnSO}_4$), and soil-applied Cd ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) + foliar-applied Zn ($0.2\% \text{ ZnSO}_4$). The objective was to study the interactive effects of Cd and Zn application on the growth, yield, Cd and Zn concentration, accumulation and translocation in different organs of wheat. The results showed that the growth (except SPAD value) and yield traits of different wheat cultivars were not significantly impacted by soil Cd pollution and foliar Zn applications. Averaged across three wheat cultivars, soil Cd pollution significantly increased Cd concentration (17–65 fold) and accumulation (17–64 fold) in the grain, stem,

收稿日期: 2023-12-21 录用日期: 2024-01-17

作者简介: 何富豪 (1999—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事农产品质量与安全研究。E-mail: fuhao_he@163.com

*通信作者: 王云霞 E-mail: yxwang@yzu.edu.cn; 杨连新 E-mail: lxyang@yzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31671618, 31101101); 江苏省高校优势学科建设工程项目

Project supported: National Natural Science Foundation of China (31671618, 31101101); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

leaf, rachis, and glumes. Foliar Zn application dramatically elevated Zn concentration (>61%) and accumulation (>58%) in all organs of all wheat cultivars. Foliar Zn application did not affect the total aboveground Cd accumulation, but it changed the Cd distribution among different organs of wheat. In Cd-polluted wheat, foliar Zn application significantly reduced Cd concentration in grains by 10%, but significantly increased that in stems, leaves and rachis by 12%–55%. Cd transport coefficients from wheat straw to grains in Cd-polluted plants were significantly reduced (15%–31%) by foliar Zn application, whereas Zn transport coefficients were not significantly affected by Cd treatments. Statistical analysis demonstrated that the effects of Zn and Cd treatments, as well as their interactions on Zn and Cd concentrations, in wheat varied with different wheat cultivars and organs with different degrees in most cases. The results suggested that although $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd pollution had no clear impact on wheat yield, the Cd concentration in grains and straws were substantially elevated. Foliar Zn application significantly reduced the Cd concentration in edible organs while increasing it in forage organs for livestock, with the magnitude of change varying within cultivars.

Keywords: cadmium pollution; foliar zinc application; wheat; cultivar; organ

镉污染是我国污染土壤面积最大,危害最严重的问题之一,涉及11个省市25个地区,面积超 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[1]。镉具有较高的生物有效性,易被生物体富集,并最终通过食物链造成人体慢性中毒^[2]。另外,镉的危害具有潜在性和隐匿性,可在不对作物造成肉眼可见的毒害症状下,使作物组织积累大量的镉,这无疑增加了镉污染粮食进入市场的潜在风险^[3]。小麦作为世界第二大粮食作物,养育了全球50%以上的人口。我国耕地资源有限,为保障粮食生产,在受酸化和轻中度污染的农田边种植边治理是部分地区农业生产的现状^[4]。因此在土壤受到镉污染或潜在镉污染情况下,如何降低粮食镉含量成为近年来农业研究的热点^[5–6]。

锌是小麦生长发育的必需微量元素,参与多种酶促反应^[7],适量施锌可提高小麦品质和锌含量,达到生物强化的效果^[8]。锌肥施用方式主要有土壤施锌和叶面施锌两种,研究表明,叶施锌肥的利用率显著高于土施,能更有效地提高小麦籽粒锌含量^[9]。目前叶面施锌已被公认为是一种速度快、污染小、肥效高的生物强化手段。

近年来,镉锌间复杂的交互作用受到研究人员的关注。镉、锌作为同族元素,二者化学性质相似,在土壤-植物体系中可竞争同一转运蛋白^[10]。已有大量文献^[11–13]表明,叶面施锌在降低小麦籽粒镉含量方面效果显著,但对其他器官尤其是穗轴和颖壳而言,锌与镉的互作研究较少且存在争论^[14–17]。Rizwan等^[18]报道,小麦籽粒、茎秆和根镉含量随着喷锌浓度的增加而降低;亦有研究^[15]表明,喷锌显著增加小麦叶片镉含量,但对籽粒及其他部位镉含量影响不大。此外,不同镉积累型小麦对喷锌的响应亦存在显著差异^[15,19]。因此,不同试验间镉锌互作效果的差异有可能与品种不同有关。但迄今为止,同时研究土壤施

镉、叶面喷锌和品种互作对小麦不同部位的影响未见报道。

本课题组最新研究^[20]发现, $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉污染使扬麦25籽粒各组分镉含量大幅增加,同时土施锌肥可显著降低籽粒镉含量,表现出明显的拮抗作用,但该研究只选用1个品种且没有测定植株其他部位镉、锌含量。另有研究^[21–22]表明,小麦对镉的吸收和累积表现为生长后期大于中前期,因此小麦生长后期叶面喷锌对镉污染小麦各部位镉的累积和转运值得进一步探明。鉴于此,于2021—2022年,选用春性小麦宁麦21、扬辐麦4号和镇麦12号为材料开展盆栽试验,设置土壤镉污染及抽穗始期叶面施锌处理,重点探究镉锌互作对不同品种成熟期小麦各器官镉、锌含量的影响,以期缓解小麦镉积累及促进小麦安全生产提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于2021—2022年在扬州大学农学院网室进行。塑料盆上口口径28 cm、下口径21 cm、高31 cm。每盆6 kg混合土壤,土壤以泥炭基质(德国维特集团0–10育苗泥炭与0–40种植泥炭以1:1质量比混合)和砂壤土按1:2混合而成,兼具肥力和通气性的特点。混合土壤具体理化性质为:pH 7.1,碱解氮 $167.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全锌 $33.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效锌 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效镉 $0.081 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验设置对照(CK)、土壤施镉(Cd, $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、叶面施锌(Zn, 0.2% ZnSO_4)和叶面施锌+土壤施镉(Zn+Cd)4个处理。混合土壤中添加的镉以镉离子计,以 $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3\text{H}_2\text{O}$ 的形式混入,基质进行镉处理后,在自然条件下培土2 d。叶面施锌用质量分数为0.2%的 ZnSO_4 溶液(浓度以锌离子计),于小麦抽穗始

期,即2022年3月23日和31日下午5时左右分别喷施一次,单次喷施量为 $800\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$,对照组喷施等量超纯水,所有喷施溶液中均加入体积分数为0.01%的Tween-20作为表面活性剂。

1.2 材料培育

本试验以长江中下游淮南麦区种植的生育期相近的3个春性小麦宁麦21(YM21)、扬辐麦4号(YFM4)和镇麦12号(ZM12)为供试材料。2021年11月5日播种,2022年5月9日收获,全生育期共175 d。全生育期施氮总量为 $2.4\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$,基肥、拔节肥和穗肥各占1/3;磷施用量为 $0.5\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$,钾施用量为 $1.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$,基肥和拔节肥分别占2/3和1/3。于2021年12月15日、2022年2月22日、2022年3月23日分别施入基肥、拔节肥和穗肥。其中基肥施用复合肥(N:P:K=15:15:15),拔节肥为复合肥和尿素(含氮率为46.7%)各占50%,穗肥施用尿素。

1.3 测定指标与方法

小麦生长指标的测定:在不同生育期间,每盆随机选取3穴代表性植株,测量地上部株高、分蘖数以及倒一完全展开叶1/3~1/2处的SPAD值。其中SPAD值用Chlorophyll Meter Model SPAD-502进行测定。

小麦最终产量性状的测定:成熟期每处理收获6株小麦。每株先将穗、茎秆和叶片分开,经超纯水润洗3遍,40℃烘干至恒质量后,手动将穗分为籽粒、穗轴和颖壳,然后分别称质量,测定每株穗数、各部位干量、总粒数和总粒质量,并计算籽粒产量、每穗粒数、粒质量、生物产量和收获指数等相关指标。具体计算公式如下:籽粒产量($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)=每株穗数×每穗粒数×粒质量/1 000;每穗粒数=总粒数/穗数;千粒质量(mg)=总粒质量(g)/总粒数×1 000;生物产量(g)=籽粒质量+茎秆质量+叶片质量+穗轴质量+颖壳质量;收获指数=籽粒产量/生物产量。

小麦籽粒镉、锌含量的测定:籽粒用磨粉机(盘式振动研磨仪TS1000,Siebtechnik,德国)磨粉。采用微波消解仪进行消解,称取面粉烘干样品0.45~0.46 g于内衬管中,依次加入5 mL浓硝酸、3 mL去离子水和2~3滴过氧化氢溶液。消解完成后定容至50 mL,过滤备用。用全谱直读等离子发射光谱仪(iCAP6300ICP-OES,Thermo Elemental,美国)测定籽粒样品滤液中镉、锌含量,同时用绿茶粉标准品[GWB(E)100721]进行质量控制,镉、锌回收率均在90%左右。

小麦茎秆、叶片、穗轴、颖壳中的镉、锌含量测定:茎秆、叶片、穗轴、颖壳分别用小型家用磨粉机(网购)

进行磨粉,分别称取0.200 g烘干样品,在马弗炉中480℃高温灰化6 h,待灰分完全冷却后依次加入15 mL 6%的硝酸进行溶解,静置24 h后过滤^[23-24]。元素含量测量方法与仪器同上。

麦草向籽粒镉、锌转运系数(TF)的测定:转运系数为小麦籽粒镉(锌)含量($C_{\text{籽粒}}$)与麦草镉(锌)含量($C_{\text{麦草}}$)的比值。其中麦草镉(锌)含量为小麦茎秆、叶片、穗轴、颖壳中镉(锌)含量(C)的加权平均,式中 M 表示相应部分质量。

具体计算公式如下:

麦草向籽粒的镉转运系数: $TF_{\text{Cd}}=C_{\text{籽粒 Cd}}/C_{\text{麦草 Cd}}$

麦草向籽粒的锌转运系数: $TF_{\text{Zn}}=C_{\text{籽粒 Zn}}/C_{\text{麦草 Zn}}$

麦草镉含量: $C_{\text{麦草 Cd}}=(C_{\text{茎秆 Cd}}\times M_{\text{茎秆}}+C_{\text{叶片 Cd}}\times M_{\text{叶片}}+C_{\text{穗轴 Cd}}\times M_{\text{穗轴}}+C_{\text{颖壳 Cd}}\times M_{\text{颖壳}})/(M_{\text{茎秆}}+M_{\text{叶片}}+M_{\text{穗轴}}+M_{\text{颖壳}})$

麦草锌含量: $C_{\text{麦草 Zn}}=(C_{\text{茎秆 Zn}}\times M_{\text{茎秆}}+C_{\text{叶片 Zn}}\times M_{\text{叶片}}+C_{\text{穗轴 Zn}}\times M_{\text{穗轴}}+C_{\text{颖壳 Zn}}\times M_{\text{颖壳}})/(M_{\text{茎秆}}+M_{\text{叶片}}+M_{\text{穗轴}}+M_{\text{颖壳}})$

1.4 数据分析

本试验用Excel 2016进行数据处理和图表绘制,用SAS 9.4进行方差分析,SAS混合模型^[25-26]中品种、锌处理、镉处理以及这些因素之间的互作为固定因子,盆和植株为随机因子。采用Tukey HSD检验对各品种不同镉、锌处理下的均值进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 小麦生长和产量性状

土壤镉污染和叶面施锌对3个供试小麦品种株高和叶片SPAD值的影响见表1。分析表明:镉污染对小麦株高和抽穗期及灌浆期SPAD值均无显著影响。叶面施锌对小麦株高没有影响,但使抽穗期和灌浆期SPAD值分别下降3%和10%,达显著和极显著水平。方差分析表明,锌处理×品种互作对两时期SPAD值的影响均达极显著水平。

镉、锌处理对供试品种籽粒产量及其构成因子的影响见表1。分析表明:每穗粒数和粒质量在品种间存在极显著差异,但籽粒产量和每株穗数无显著差异。平均而言,土壤 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉污染对小麦籽粒产量、每株穗数和粒质量均无显著影响,但使每穗粒数显著增加8%,后者主要与宁麦21每穗粒数明显增加有关。与不施锌相比,0.2%叶面施锌对小麦籽粒产量及其构成因素均无显著影响。方差分析表明,仅镉处理×品种互作对粒质量有显著影响。

籽粒产量也可分解为地上部生物产量与收获指数的乘积(表1)。分析表明:不同品种生物产量和收

表1 土壤镉污染和叶面施锌对不同品种小麦株高、SPAD值、籽粒产量及其构成因素、生物产量和收获指数的影响
Table 1 Effects of soil cadmium pollution and foliar zinc application on plant height, SPAD value, yield and yield-related factors, biomass, and harvest index of different wheat cultivars

品种 Cultivar	锌处理 Zn treatment	镉处理 Cd treatment	株高 Plant height/cm	抽穗期SPAD值 SPAD value at heading stage	灌浆期SPAD值 SPAD value at grain filling stage	籽粒产量/ (g·株 ⁻¹) Grain yield/ (g·plant ⁻¹)	每株穗数 Spikes per plant	每穗粒数 Kernels per plant	粒质量 Grain weight/mg	生物产量/ (g·株 ⁻¹) Biomass/ (g·plant ⁻¹)	收获指数 Harvest index
NM21	-Zn	-Cd	68.4±0.7	50.1±0.4	52.3±0.7a	11.2±1.1	5.2±0.2	39.2±4.2	56.1±1.0	22.9±1.5	0.48±0.02
		+Cd	69.2±0.1	50.2±1.6	51.6±2.1a	10.5±0.2	4.8±0.2	40.5±2.8	54.6±4.9	22.0±0.2	0.48±<0.01
	+Zn	-Cd	68.8±3.2	52.8±2.0	49.8±2.5a	10.0±<0.1	4.5±0.2	36.7±1.8	60.3±0.3	20.8±0.5	0.48±0.02
		+Cd	72.3±1.5	51.8±2.0	45.4±1.8b	12.7±0.2	5.2±0.5	50.2±2.0	50.1±1.6	24.3±1.1	0.52±0.02
YFM4	-Zn	-Cd	68.9±0.6	52.9±0.3	49.8±2.2	12.9±0.4	5.2±0.2	46.6±0.7	51.8±0.7	26.5±1.6	0.47±0.03
		+Cd	70.1±0.2	51.9±1.1	49.2±1.2	12.6±0.9	5.2±0.2	48.3±3.1	50.5±1.7	26.2±0.9	0.48±0.01
	+Zn	-Cd	68.4±0.4	50.7±3.3	50.5±0.3	13.4±0.6	5.5±0.2	48.0±0.9	50.9±1.7	27.5±1.3	0.49±<0.01
		+Cd	68.6±1.8	50.2±1.6	47.2±0.1	11.4±1.0	4.8±0.2	48.0±0.1	49.2±2.6	24.1±1.9	0.47±<0.01
ZM12	-Zn	-Cd	74.4±2.7	53.6±0.1a	54.9±0.6a	12.3±0.5	5.2±0.5	41.1±2.2	59.0±6.2	27.1±1.0	0.45±<0.01ab
		+Cd	73.2±2.0	54.4±1.4a	55.0±0.3a	14.2±1.6	5.3±0.3	41.7±1.7	62.8±0.2	29.6±2.6	0.47±0.01a
	+Zn	-Cd	73.8±0.6	48.6±2.1b	46.0±0.8b	11.1±1.2	5.2±0.2	35.6±2.5	60.0±1.2	26.0±1.7	0.43±0.02b
		+Cd	75.9±0.8	49.4±0.5b	44.1±0.4b	12.8±0.2	5.4±0.1	38.2±0.7	62.5±1.2	28.1±0.3	0.45±0.01ab
ANOVA 结果											
	Cd		0.197	0.848	0.061	0.405	0.949	0.029 ↑	0.262	0.659	0.051
	Zn		0.469	0.010 ↓	<0.001 ↓	0.562	0.848	0.857	0.873	0.643	0.870
	品种 (Cv)		<0.001	0.904	0.757	0.167	0.521	<0.001	<0.001	0.012	0.001
	Cd×Zn		0.336	0.848	0.143	0.807	0.815	0.229	0.193	0.945	0.411
	Cd×Cv		0.654	0.531	0.778	0.343	0.666	0.220	0.015	0.511	0.302
	Zn×Cv		0.374	<0.001	0.001	0.652	0.947	0.125	0.907	0.915	0.075
	Cd×Zn×Cv		0.513	0.855	0.918	0.346	0.411	0.141	0.310	0.524	0.125

注: NM21: 宁麦 21; YFM4: 扬辐麦 4 号; ZM12: 镇麦 12 号; -Zn: 无锌处理; +Zn: 叶面施锌; -Cd: 无镉处理; +Cd: 5 mg·kg⁻¹ 镉处理; 同一品种下不同字母表示处理间存在显著差异(α=0.05); 数据为平均值±标准误差; ↑, 表示处理使指标增幅达显著或极显著水平; ↓, 表示处理使指标降幅达显著或极显著水平。下同。
Note: NM21: Ningmai 21; YFM4: Yangfumai 4; ZM12: Zhenmai 12; -Zn: no zinc treatment; +Zn: foliar zinc application; -Cd: no cadmium treatment; +Cd: 5 mg·kg⁻¹ cadmium treatment; Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level between treatments under the same cultivar; Data are represented with means ± standard error; ↑, denotes significant increases of the parameter by the treatment; ↓, denotes significant decreases of the parameter by the treatment. The same below.

获指数存在显著和极显著差异。镉污染对生物产量和收获指数均无显著影响。锌处理对生物产量及收获指数均无显著影响。镉处理、锌处理和品种间均无交互效应。

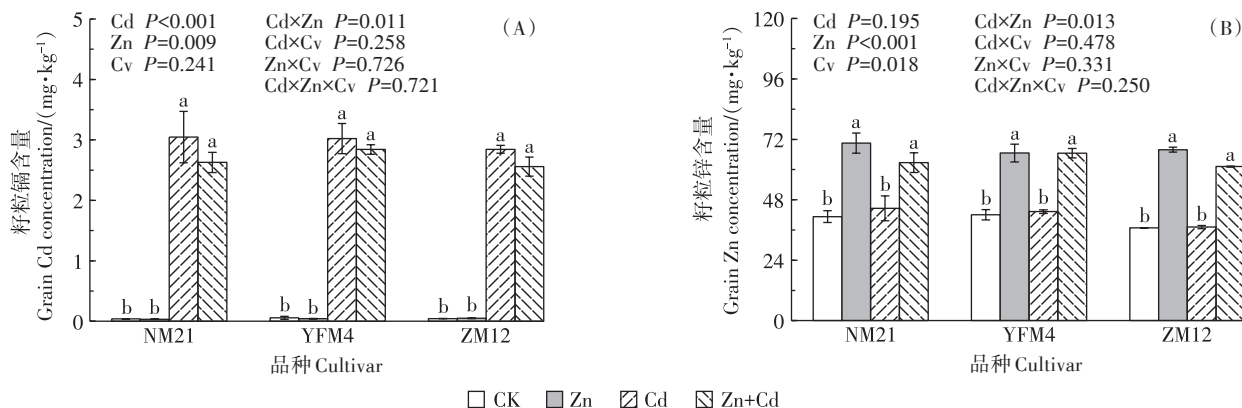
2.2 小麦籽粒、茎秆、叶片、穗轴、颖壳的镉和锌含量

镉、锌处理对供试小麦品种地上部各部位镉含量的影响见图 1A 和图 2。分析表明: 不同品种间茎秆、叶片和颖壳镉含量均存在极显著差异; 小麦不同部位间镉含量差异亦达极显著水平。与洁净土壤相比, 镉污染使小麦籽粒、茎秆、叶片、穗轴和颖壳镉含量平均极显著增加了 62、65、30、30 倍和 17 倍。镉污染对茎秆、叶片和颖壳镉含量的影响因品种而异。镉污染的影响亦与喷锌与否有关, 喷锌小麦茎秆、叶片和穗轴镉含量的增幅明显大于不喷锌小麦, 但籽粒部位则相

反。与不施锌相比, 叶面施锌使小麦籽粒镉含量平均降低了 10%, 但使茎秆、叶片、穗轴和颖壳镉含量平均增加了 12%、53%、18% 和 14%, 除颖壳外均达极显著水平, 不同品种趋势基本一致。从镉处理看, 叶面施锌使镉污染小麦籽粒镉含量显著降低, 使茎秆、叶片和穗轴镉含量显著增加, 但无镉污染小麦各部位镉含量均无显著变化。

综合考虑镉处理、锌处理、品种和部位的四元方差分析表明(表 2), 除锌处理×品种×部位、镉处理×锌处理×品种×部位外, 不同主效应间对镉均存在极显著交互作用。

小麦地上部各部位锌含量的测定结果见图 1B 和图 3。分析表明: 籽粒、茎秆、穗轴和颖壳锌含量品种间均存在显著或极显著差异; 小麦不同部位间锌含量



NM21: 宁麦 21; YFM4: 扬辐麦 4 号; ZM12: 镇麦 12 号; CK: 对照; Zn: 叶面施锌; Cd: 5 mg·kg⁻¹ 镉处理; Zn+Cd: 叶面施锌+5 mg·kg⁻¹ 镉处理; 同一品种下不同字母表示镉、锌处理组间存在显著差异($\alpha=0.05$)。下同。

NM21: Ningmai 21; YFM4: Yangfumai 4; ZM12: Zhenmai 12; CK: control; Zn: foliar zinc application; Cd: 5 mg·kg⁻¹ cadmium treatment; Zn+Cd: foliar zinc application and 5 mg·kg⁻¹ cadmium treatment; Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level between different cadmium and zinc treatment combinations under the same cultivar. The same below.

图1 土壤镉污染和叶面施锌对不同品种小麦籽粒镉和锌含量的影响

Figure 1 Effects of soil cadmium pollution and foliar zinc application on the cadmium and zinc concentration in grains of different wheat cultivars

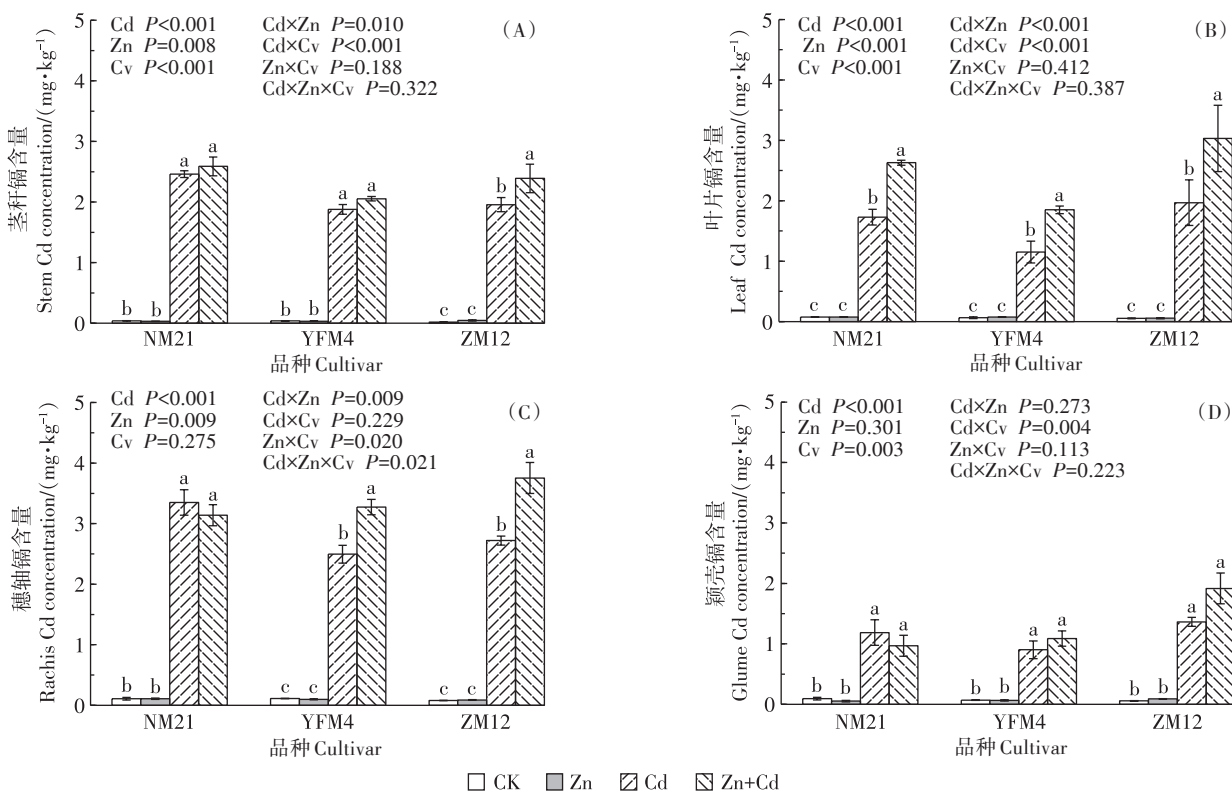


图2 土壤镉污染和叶面施锌对不同品种小麦茎秆、叶片、穗轴和颖壳镉含量的影响

Figure 2 Effects of soil cadmium pollution and foliar zinc application on cadmium concentration in stems, leaves, rachis and glumes of different wheat cultivars

差异亦达极显著水平,叶片和穗轴明显高于其他部位。与不施镉相比,镉污染使小麦所有测定部位锌含量一致下降,其中茎秆(下降了12%)和叶片降幅(下

降了24%)达显著和极显著水平。镉污染使叶面施锌小麦的籽粒锌含量(下降了7%)和叶片锌含量(下降了24%)显著降低,但不施锌小麦均无显著变化。叶

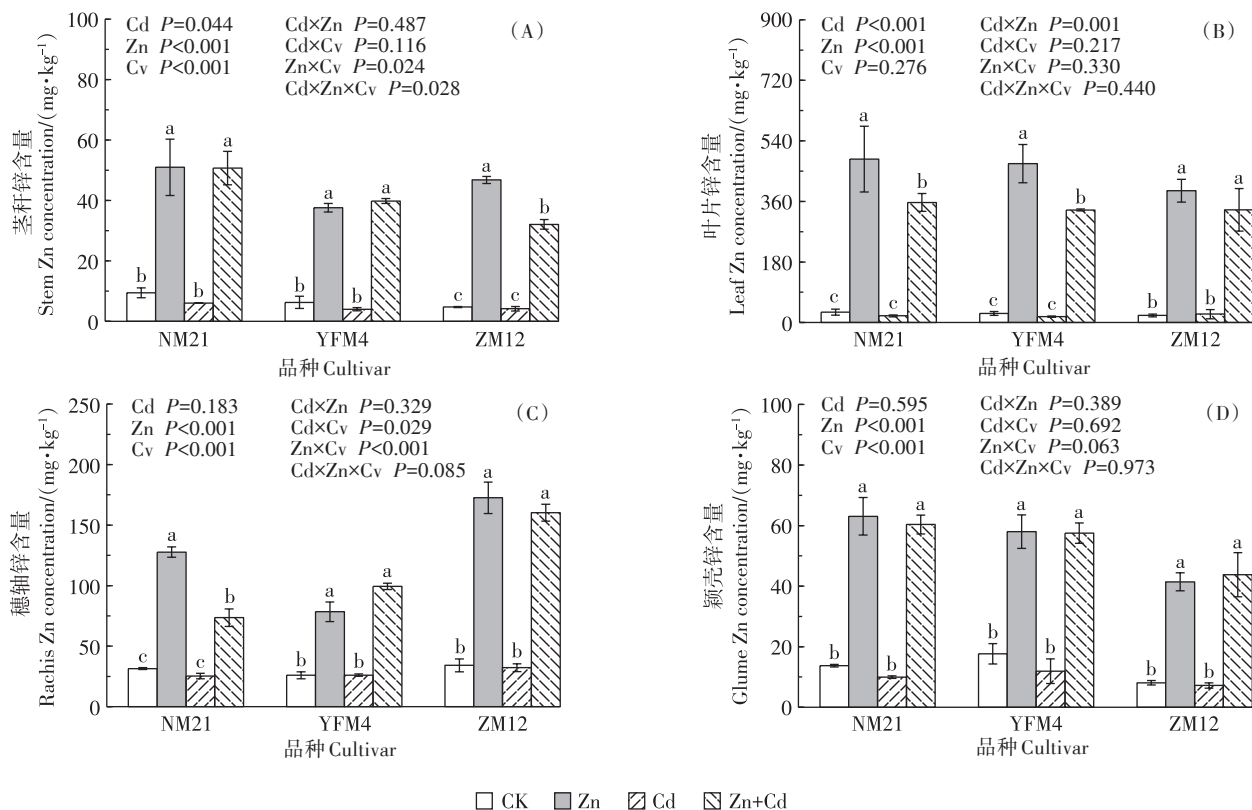


图3 土壤镉污染和叶面施锌对不同品种小麦茎秆、叶片、穗轴和颖壳锌含量的影响

Figure 3 Effects of soil cadmium pollution and foliar zinc application on zinc concentration in stems, leaves, rachis and glumes of different wheat cultivars

面施锌使小麦籽粒、茎秆、叶片、穗轴和颖壳锌含量平均增加了61%、7倍、16倍、3倍和4倍,均达极显著水平。叶面施锌对茎秆和穗轴锌含量的影响因品种而异。另外喷锌对无镉污染小麦籽粒和叶片锌含量的影响显著大于镉污染小麦。综合方差分析表明(表2),镉处理、锌处理、部位及其互作,以及品种×部位、锌处理×品种×部位的影响均达极显著水平。

2.3 小麦地上部不同部位镉和锌的累积量

小麦不同部位镉累积量为对应部位镉含量与其质量的乘积,计算结果见图4A和表3。分析表明:不同品种茎秆、叶片和颖壳镉累积量存在显著或极显著差异;小麦不同部位间镉累积量差异亦达极显著水平,大部分镉累积在籽粒和茎秆中。平均而言,镉污染使小麦籽粒、茎秆、叶片、穗轴、颖壳以及总镉累积量平均极显著增加了62、64、30、29、17倍和51倍。镉处理对茎秆、叶片和颖壳镉累积量的影响因品种而异。叶面施锌使小麦籽粒镉累积量平均降低了11%,但其他部位镉累积量均呈增加趋势,其中叶片增幅(增加了53%)达极显著水平。从镉处理看,喷锌仅使镉污染小麦叶片镉累积量显著增加,但无镉污染小麦各部位均无显著变化。表2表明,镉处理、品种、部

位、镉处理×品种和镉处理×部位对小麦镉累积量的影响均达显著或极显著水平。

小麦各部位锌累积量的计算结果见图4B和表3。穗轴和颖壳锌累积量品种间存在极显著差异;小麦不同部位间锌累积量差异亦达极显著水平,籽粒和叶片中锌含量明显高于其他部位。除籽粒外,镉污染使小麦其他部位锌累积量一致下降,其中叶片降幅(下降了24%)达显著水平,这主要与喷锌小麦叶片锌累积量显著下降有关。叶面施锌使小麦籽粒、茎秆、叶片、穗轴、颖壳和总锌累积量极显著增加了58%、6倍、16倍、3倍、4倍和2倍。另外,无镉处理小麦叶片锌累积量的增幅显著大于镉处理小麦。表2显示,锌处理、部位、镉处理×锌处理、镉处理×部位和锌处理×部位对小麦锌累积量的影响均达显著或极显著水平。

2.4 麦草向籽粒的镉和锌转运系数

麦草向籽粒的镉转运系数为籽粒与麦草镉含量的比值,计算结果见图5A。分析表明:镉污染下,麦草向籽粒的镉转运系数品种间存在极显著差异,扬辐麦4号镉转运能力最强,宁麦21最低,镇麦12号则介于两者之间。与不施锌相比,叶面施锌使镉污染小麦

表2 镉处理、锌处理、品种和部位对小麦镉锌含量和累积量影响的显著性检验(*P*值)

Table 2 ANOVA results of cadmium treatments, zinc treatments, cultivar, organ and their interactions on wheat cadmium, zinc concentrations and accumulations

变异来源 Source	镉含量 Cd concentration	锌含量 Zn concentration	镉累积量 Cd accumulation	锌累积量 Zn accumulation
镉处理Cd	** ↑	** ↓	** ↑	ns
锌处理Zn	** ↓	** ↑	ns	** ↑
品种Cv	**	ns	*	ns
部位Organ(O)	**	**	**	**
Cd×Zn	**	**	ns	*
Cd×Cv	**	ns	*	ns
Cd×O	**	**	**	*
Zn×Cv	**	ns	ns	ns
Zn×O	**	**	ns	**
Cv×O	**	**	ns	ns
Cd×Zn×Cv	**	ns	ns	ns
Cd×Zn×O	**	**	ns	ns
Cd×Cv×O	**	ns	ns	ns
Zn×Cv×O	ns	**	ns	ns
Cd×Zn×Cv×O	ns	ns	ns	ns

注:*,表示达显著水平(*P*<0.05);**,表示达极显著水平(*P*<0.01);ns,表示不显著;↑,表示处理使指标增幅达显著或极显著水平;↓,表示处理使指标降幅达显著或极显著水平。下同。
Note:*, denotes significant at *P*<0.05; **, denotes significant at *P*<0.01; ns, denotes not significant; ↑, denotes significant increases of the parameter by the treatment; ↓, denotes significant decreases of the parameter by the treatment. The same below.

麦草向籽粒的镉转运系数平均降低了22%,其中宁麦21、扬辐麦4号和镇麦12号分别下降了15%、19%和

31%,均达显著或极显著水平。方差分析表明,锌处理与品种处理对小麦镉转运系数的影响均达极显著水平。

麦草向籽粒的锌转运系数的计算结果见图5B。分析表明:叶面施锌下麦草向籽粒的锌转运系数没有显著的品种差异。与不施镉相比,镉处理对叶面施锌小麦麦草向籽粒锌元素的转运无显著影响。方差分析显示,镉处理、品种及其互作对小麦锌转运系数均无显著影响。

3 讨论

3.1 土壤镉污染和叶面施锌对不同品种小麦生长和产量的影响

本试验土壤总镉处理的施镉量(5 mg·kg⁻¹)大于农用地土壤镉污染风险管制值(3 mg·kg⁻¹)^[27],但对3个供试品种小麦最终生物产量和籽粒产量均无显著影响,每穗粒数和收获指数甚至还有增加趋势,表现出微弱的促进作用(表1),类似现象在其他小麦研究中亦有报道^[28-29]。

锌参与小麦多种酶促反应,适量施用可提高籽粒产量和品质^[30],但过量施用会影响光合作用,抑制生长发育^[31]。本试验发现,抽穗始期两次喷施0.2% ZnSO₄对不同品种和镉处理下的小麦株高以及产量相关性状均无影响(表1),这与前人试验结果相近^[16,32]。这与本试验采用的混合土壤有效锌含量较高(5.0 mg·kg⁻¹)^[20]有关。值得一提的是,喷锌后不久宁麦21和镇麦12号叶片出现大小不一的黄色斑点,同时叶片出现褪绿现象,二次喷锌后叶面SPAD值平均降幅高

表3 镉、锌、品种对小麦不同部位镉和锌累积量影响的显著性检验(*P*值)

Table 3 ANOVA results of cadmium, zinc, cultivar and their interactions on cadmium and zinc accumulations in different organs of wheat

项目 Item	镉处理Cd	锌处理Zn	品种Cv	Cd×Zn	Cd×Cv	Zn×Cv	Cd×Zn×Cv
总镉累积量 Total Cd accumulation	** ↑	ns	ns	ns	ns	ns	ns
籽粒镉累积量 Grain Cd accumulation	** ↑	ns	ns	ns	ns	ns	ns
茎镉累积量 Stem Cd accumulation	** ↑	ns	**	ns	*	ns	ns
叶镉累积量 Leaf Cd accumulation	** ↑	** ↑	**	**	**	ns	ns
穗轴镉累积量 Rachis Cd accumulation	** ↑	ns	ns	ns	ns	ns	ns
颖壳镉累积量 Glume Cd accumulation	** ↑	ns	**	ns	**	ns	ns
总锌累积量 Total Zn accumulation	ns	** ↑	ns	ns	ns	ns	ns
籽粒锌累积量 Grain Zn accumulation	ns	** ↑	ns	ns	ns	ns	ns
茎锌累积量 Stem Zn accumulation	ns	** ↑	ns	ns	ns	ns	ns
叶锌累积量 Leaf Zn accumulation	* ↓	** ↑	ns	*	ns	ns	ns
穗轴锌累积量 Rachis Zn accumulation	ns	** ↑	**	ns	ns	**	ns
颖壳锌累积量 Glume Zn accumulation	ns	** ↑	**	ns	ns	ns	ns

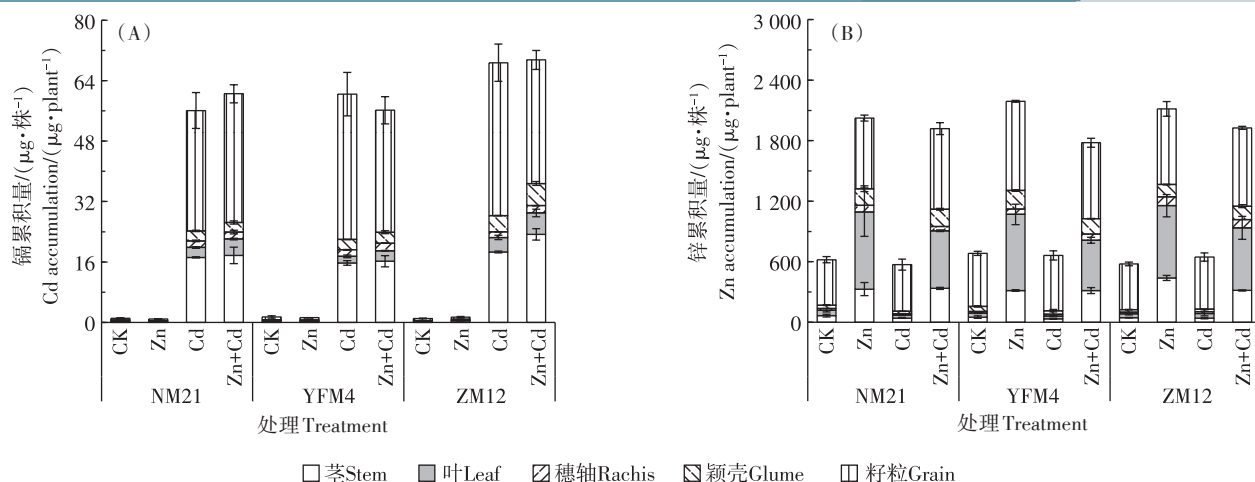
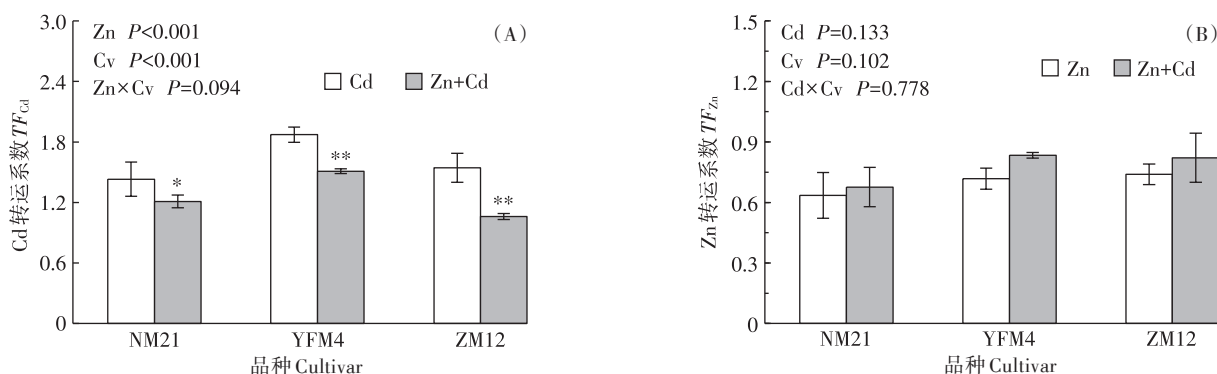


图4 土壤镉污染和叶面施锌处理对不同品种小麦各部位镉和锌积累量的影响

Figure 4 Effects of soil cadmium pollution and foliar zinc application on the cadmium and zinc accumulation in each organ of different wheat cultivars



***, 表示同品种不同处理间存在显著或极显著差异 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

*/** denotes significant difference between the different treatments of the cultivar, values in bold indicate significant at $P < 0.05$ or $P < 0.01$.

图5 叶面施锌处理对镉污染小麦镉转运系数以及镉污染对叶面施锌小麦锌转运系数的影响

Figure 5 Effects of foliar zinc treatment on cadmium transfer coefficient from cadmium pollution wheat and cadmium pollution on zinc transfer coefficient from foliar zinc application wheat

达10%(表1),但这种肉眼所见的叶片伤害没有反映在最终产量上,这种现象在其他品种小麦^[33]和玉米^[34]上亦有类似报道。

3.2 镉污染和叶面施锌对不同品种小麦各部位镉含量的影响

尽管土壤镉污染对籽粒产量影响较小,但使所有供试小麦品种籽粒镉含量大幅增加(图1A),平均增至约 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这一水平远超国家食品镉安全标准 ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[35]。与籽粒相比,前人对镉污染下小麦其他部位镉含量的报道较少,尤其是穗轴和颖壳部位。本试验结果显示,施镉处理使小麦茎秆、叶片、穗轴和颖壳镉含量均大幅增加,增幅因部位而异,但均高于 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的安全饲用要求^[36]。值得关注的是,与前人报道^[37-39]不尽相同,本研究条件下土壤镉处理

小麦的籽粒镉含量普遍高于茎秆和叶片,说明营养器官对镉向上转运的阻控效果不明显,这是否与本试验设置的镉污染浓度和品种有关尚需进一步验证。本文还发现,镉处理与品种或锌处理间的互作对小麦镉含量的影响均达显著水平(表2)。总体而言,镉处理使喷锌小麦麦草镉含量的增幅明显大于不喷锌小麦,籽粒部位则呈相反趋势,这种现象镇麦12号表现得更为明显(图1A、图2)。

锌与镉化学性质相似,二者在作物体内可能共用离子转运系统,且存在复杂的交互作用。小麦籽粒是人类直接食用的部位,因此通过锌镉互作降低籽粒镉含量一直是研究的热点,且结论较一致^[40-42]。相比之下,小麦其他部位对锌镉互作的响应报道较少且有分歧^[44]。本文以3个品种小麦为供试对象,结果表明抽

穗始期叶面喷锌使籽粒镉含量平均下降10%,但使茎秆、叶片、穗轴和颖壳的镉含量明显增加(12%~53%),其中叶片增幅最大且达极显著水平(图1A、图2)。这说明喷锌后叶面锌对镉向籽粒的转运有抑制作用,更多的镉被滞留在营养器官特别是叶片中。这一结果亦与麦草向籽粒镉转运系数相吻合:喷锌使镉污染小麦镉转运系数显著下降,降幅达15%~31%。不同品种比较,镇麦12号镉转运系数的降幅是宁麦21的2倍,这与镇麦12号麦草各部位镉含量增幅更大相一致(图2,图5A)。与本试验的预期相一致,抽穗始期叶面喷锌对供试品种地上部总镉累积量均无显著影响(图4A,表3),说明喷锌处理没有减少小麦营养器官对镉的吸收和积累,只是相对阻碍了镉向籽粒的转运。上述结果与前人单品种小麦喷锌试验结果相近^[15,43],水稻作物亦有类似报道^[44~45]。本研究还发现,锌处理的上述效应亦与品种或镉处理有显著的交互作用(表2)。具体而言,喷锌导致籽粒镉含量下降而其他部位增加的现象以镇麦12号表现最为明显,特别是土壤镉污染环境(图1A、图2)。

3.3 镉污染和叶面施锌对不同品种小麦各部位镉含量的影响

前人报道镉污染既有增加小麦镉含量的风险,又对锌元素的吸收和转运有负面效果^[46]。本试验表明,5 mg·kg⁻¹镉处理使小麦地上部各部位镉含量一致下降(图1B、图3),但降幅因测定部位而异,其中叶片(-24%)和茎秆(-12%)降幅较大,而籽粒部位降幅较小(-3%)。尽管镉污染对地上部各器官镉吸收有负面效果,但麦草向籽粒的镉转运系数没有降低,甚至还略有增加,这与镉对营养器官镉吸收的抑制作用更强相吻合。研究还表明,镉污染对镉吸收的抑制不存在品种差异,但喷锌处理下镉、锌的拮抗作用表现得更加明显。

与多人研究结果一致^[9,47],本试验抽穗始期0.2%叶面喷锌后籽粒镉含量达到了68 mg·kg⁻¹(图1B),高于全国平均水平及营养学家设定的生物强化目标^[48]。另外喷锌对镉含量的增幅存在部位差异,且本试验品种对喷锌的响应更敏感,籽粒增幅(+61%)多大于其他品种^[9,32]。尽管籽粒镉含量的增幅较大,但大量镉仍被保留在营养器官中^[49~50],因此如何增加营养器官中镉向籽粒的转运量对小麦镉营养品质的提升至关重要。研究还发现,锌处理对镉的吸收不存在品种依赖,但与镉处理间的交互达显著水平,镉污染使叶面喷锌的富镉效果变差,二者的拮抗作用仍是主要影响

因素。

4 结论

(1)轻度土壤镉污染对供试小麦生长、产量指标均无显著影响,但使地上部镉含量大幅增加,而镉含量呈相反趋势。

(2)抽穗始期叶面施锌对小麦无增产效果,但显著增加各器官包括籽粒的镉含量。施锌处理对小麦地上部镉的累积量没有影响,但改变了镉在不同器官间的分配模式:使镉污染小麦籽粒镉含量显著降低,而其他器官则表现出相反趋势。

(3)多数情况下,镉处理、锌处理及其交互对小麦镉含量的影响存在品种依赖。相较而言,镇麦12号拥有较高的产量,籽粒镉含量较低且对叶面施锌最为敏感,更适宜在镉污染土壤上种植。

参考文献:

- [1] 杨滨娟, 黄国勤. 植物种植修复土壤重金属污染的模式、技术与效果综述[J]. 生态科学, 2022, 41(4): 251-256. YANG B J, HUANG G Q. Review on model, technology and effect of phytoremediation technology on remediation of heavy metal pollution[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(4): 251-256.
- [2] YANG S Y, YANG D, TAYLOR D, et al. Tracking cadmium pollution from source to receptor: a health-risk focused transfer continuum approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 867: 161574.
- [3] CHUNHABUNDIT R. Cadmium exposure and potential health risk from foods in contaminated area, Thailand[J]. *Toxicological Research*, 2016, 32(1): 65-72.
- [4] 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 等. 小麦籽粒镉含量影响因素Meta分析和决策树分析[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2265-2274. LIU N, ZHANG S B, GUO X Y, et al. Influencing factors of cadmium content in wheat grain: a meta-analysis and decision tree analysis[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2265-2274.
- [5] 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: 115045.
- [6] ZAID I U, MUHAMMAD S H, ZHANG N, et al. Phenotypic variations of wheat cultivars from the North China Plain in response to cadmium stress and associated single nucleotide polymorphisms identified by a genome-wide association study[J]. *Pedosphere*, 2022, 32(4): 555-564.
- [7] CAKMAK I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species[J]. *New Phytologist*, 2000, 146: 185-205.
- [8] SHUKLA G, SHARMA S, GAURAV A, et al. Physiological role and biofortification of zinc in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Plant Physiology Report*, 2022, 27(4): 665-679.
- [9] 陶焱金, 井凌琨, 王琪, 等. 锌肥施用对我国小麦籽粒镉含量的影响

- [J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3):660-666. TAO Y J, JING L K, WANG Q, et al. Effects of zinc fertilizer application on zinc content of wheat (*Triticum aestivum* L.) grains in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3):660-666.
- [10] QIN S Y, LIU H E, NIU Z J, et al. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: a review[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(2):168-180.
- [11] QIAN L S, DAWAR K, ULLAH I, et al. Zinc foliar application mitigates cadmium-induced growth inhibition and enhances wheat growth, chlorophyll contents, and yield[J]. *ACS Omega*, 2023, 8:32372-32381.
- [12] ALI S, BANI MFARREJ M F, HUSSAIN A, et al. Zinc fortification and alleviation of cadmium stress by application of lysine chelated zinc on different varieties of wheat and rice in cadmium stressed soil [J]. *Chemosphere*, 2022, 295:133829.
- [13] GU X Z, WEN X, YI N, et al. Effect of foliar application of silicon, selenium and zinc on heavy metal accumulation in wheat grains in field studies[J]. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 2022, 34(1):246-252.
- [14] BASHIR A, RIZWAN M, ALI S, et al. Effect of composted organic amendments and zinc oxide nanoparticles on growth and cadmium accumulation by wheat; a life cycle study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27:23926-23936.
- [15] LIAN J P, CHENG L P, ZHAI X, et al. Zinc glycerolate (Glyzinc): a novel foliar fertilizer for zinc biofortification and cadmium reduction in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2023, 402:134290.
- [16] XING W Q, CAO E Z, SCHECKEL K G, et al. Influence of phosphate amendment and zinc foliar application on heavy metal accumulation in wheat and on soil extractability impacted by a lead smelter near Jiyuan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25:31396-31406.
- [17] RIZWAN M, ALI S, UR REHMAN M Z, et al. A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(7):6279-6289.
- [18] 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.
- [19] HUSSAIN S, KHAN A M, RENGEL Z, et al. Zinc-biofortified wheat accumulates more cadmium in grains than standard wheat when grown on cadmium-contaminated soil regardless of soil and foliar zinc application[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654:402-408.
- [20] 陈旺, 户少武, 罗景升, 等. 施氮、锌对镉污染小麦产量及籽粒镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2):274-283. CHEN W, HU S W, LUO J S, et al. Effects of nitrogen and zinc application on yield, zinc and cadmium concentration in wheat grain under cadmium pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(2):274-283.
- [21] SHI G Y, LI D J, WANG Y F, et al. Accumulation and distribution of arsenic and cadmium in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at different developmental stages[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667:532-539.
- [22] 叶长城, 陈喆, 彭鸥, 等. 不同生育期Cd胁迫对水稻生长及镉累积的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8):3201-3206. YE C C, CHEN Z, PENG O, et al. Effects of cadmium stress on growth and cadmium accumulation in rice at different growth stages[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8):3201-3206.
- [23] ESMAILI A, KARBASDEHI V N, SAEEDI R, et al. Data on heavy metal levels (Cd, Co, and Cu) in wheat grains cultured in Dashtestan County, Iran[J]. *Data in Brief*, 2017, 14:543-547.
- [24] CHANDRA R, BHARAGAVA R N, YADAV S, et al. Accumulation and distribution of toxic metals in wheat (*Triticum aestivum* L.) and Indian mustard (*Brassica campestris* L.) irrigated with distillery and tannery effluents[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162:1514-1521.
- [25] PIEPHO H P, BUCHSE A, EMRICH K. A hitchhiker's guide to mixed models for randomized experiments[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2003, 189:310-322.
- [26] HU S W, YANG Y, TIAN C, et al. Physicochemical characteristics of lodging susceptibility of rice cultivars in response to ozone exposure [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 344:108313.
- [27] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2018. Ministry of Ecology and Environment, State Administration of Market Supervision and Administration. Soil environmental quality risk control standards for soil pollution on agricultural land (trial):GB 15618—2018[S]. Beijing:China Standards Press, 2018.
- [28] ARDUINI I, MASONI A, MARIOTTI M, et al. Cadmium uptake and translocation in durum wheat varieties differing in grain-Cd accumulation[J]. *Plant Soil and Environment*, 2014, 60(1):43-49.
- [29] 张婧, 李仁英, 徐向华, 等. 土壤镉污染对小麦生长及镉吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4):522-527. ZHANG Q, LI R Y, XU X H, et al. Effects of cadmium pollution in soil on growth and cadmium uptake of wheat[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4):522-527.
- [30] SINGH S, KAUR J, RAM H, et al. Agronomic bio-fortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) to alleviate zinc deficiency in human being[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-technology*, 2023, 22:505-526.
- [31] ANWAAR S A, ALI S, ALI S, et al. Silicon (Si) alleviates cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from zinc (Zn) toxicity stress by limiting Zn uptake and oxidative damage[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(5):3441-3450.
- [32] 杨月娥, 王森, 王朝晖, 等. 我国主要麦区小麦籽粒锌含量对叶喷锌肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3):579-589. YANG Y E, WANG S, WANG Z H, et al. Response of wheat grain Zn concentration to foliar sprayed Zn in main wheat production regions of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3):579-589.
- [33] XU M, LIU M J, SI L L, et al. Spraying high concentrations of chelated zinc enhances zinc biofortification in wheat grain[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 102(9):3590-3598.

- [34] GOLDEN B R, ORLOWSKI J M, BOND J A. Corn injury from foliar zinc application does not affect grain yield[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(5):2071–2075.
- [35] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量:GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration. National standard for food safety, limits for contaminants in food: GB 2762—2022[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [36] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料卫生标准:GB 13078—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Feed hygiene standards: GB 13078—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [37] 李乐乐, 刘源, 李宝贵, 等. 镉低积累小麦品种的筛选研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 53–60. LI L L, LIU Y, LI B G, et al. Screening of low-accumulation wheat varieties with cadmium[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 53–60.
- [38] 任超, 任彧仲, 王浩, 等. 镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1606–1619. REN C, REN Y Z, WANG H, et al. Cadmium accumulation characteristics of different wheat varieties under cadmium stress[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1606–1619.
- [39] MA C, LIN L, YANG J, et al. The relative contributions of different wheat leaves to the grain cadmium accumulation[J]. *Toxics*, 2022, 10: 237–249.
- [40] HUSSAIN A, ALI S, RIZWAN M, et al. Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 1518–1526.
- [41] 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.
- [42] DAWAR K, MIAN I A, KHAN S, et al. Alleviation of cadmium toxicity and fortification of zinc in wheat cultivars cultivated in Cd contaminated soil[J]. *South African Journal of Botany*, 2023, 162: 611–621.
- [43] SAIFULLAH, SARWAR N, BIBI S, et al. Effectiveness of zinc application to minimize cadmium toxicity and accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(4): 1663–1672.
- [44] ZHEN S, SHUAI H, XU C, et al. Foliar application of Zn reduces Cd accumulation in grains of late rice by regulating the antioxidant system, enhancing Cd chelation onto cell wall of leaves, and inhibiting Cd translocation in rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 145302.
- [45] ZHENG S, XU C, LV G H. Foliar zinc reduced Cd accumulation in grains by inhibiting Cd mobility in the xylem and increasing Cd retention ability in roots[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 333: 122046.
- [46] 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.
- [47] 唐梦珊, 吕志远, 赵晓涵, 等. 喷锌对黄土高原小麦籽粒营养品质及锌分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 27–36. TANG M S, LÜ Z Y, ZHAO X H, et al. Effects of zinc spraying on wheat grain nutritional quality and zinc distribution on the Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1): 27–36.
- [48] CHEN X P, ZHANG Y Q, TONG Y P, et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7016–7023.
- [49] 杨习文, 宋森, 李秋杰, 等. 氮锌配施对小麦锌转运、分配与累积的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 148–156. YANG X W, SONG M, LI Q J, et al. Impacts of combined N and Zn application on Zn translocation, partitioning, and accumulation in *Triticum aestivum* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 148–156.
- [50] SARWAR N, ISHAQ W, FARID G, et al. Zinc-cadmium interactions: impact on wheat physiology and mineral acquisition[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122: 528–536.