

施氮、锌对镉污染小麦产量及籽粒锌、镉含量的影响

陈旺, 户少武, 罗景升, 李通, 田超, 何富豪, 顾珈名, 景立权, 王云霞, 杨连新

引用本文:

陈旺, 户少武, 罗景升, 李通, 田超, 何富豪, 顾珈名, 景立权, 王云霞, 杨连新. 施氮、锌对镉污染小麦产量及籽粒锌、镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 274–283.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0725>

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>

长江中下游麦区不同小麦品种镉积累差异研究

易超, 史高玲, 陈恒强, 姚澄, 潘云俊, 石月红, 李标, 高岩

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1164–1174 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1373>

镉污染耕地大豆安全生产模式的探究

王天宇, 陈睿, 施加春, 傅旭军, 徐建明, 何艳

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1629–1635 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0129>

施磷增氧条件对水稻光合特性及镉吸收分配的影响

张文萍, 管啸, 钟诚, 易宇, 肖卫华, 易达理, 杨良玖, 吴根义

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 1875–1886 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1346>

铅冶炼污染石灰性土壤上冬小麦间作伴矿景天的探讨

卢一富, 李真理, 阮心玲, 李会勇, 张红毅, 田会阳, 李立平

农业环境科学学报. 2015(9): 1686–1692 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.009>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈旺, 户少武, 罗景升, 等. 施氮、锌对镉污染小麦产量及籽粒锌、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.



开放科学 OSID

施氮、锌对镉污染小麦产量及籽粒锌、镉含量的影响

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

(1. 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; 2. 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/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)

摘 要: 为了明确氮、锌、镉处理及其互作对小麦产量和籽粒锌、镉含量的影响, 本研究设置盆栽裂区试验, 以扬麦 25 为供试材料, 主区氮处理设常氮 ($1.6 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$) 和减氮 ($0.8 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$), 裂区锌、镉处理设对照、锌处理 ($150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、镉处理 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和锌+镉处理, 测定小麦产量性状, 籽粒不同组分(面粉、次粉和麸皮)氮、锌、镉含量以及籽粒锌、镉有效富集系数。结果表明: 与常氮相比, 减氮处理使小麦籽粒产量显著降低, 这主要与产量构成因子、生物产量和收获指数均显著下降有关; 减氮条件下小麦成熟籽粒氮含量(不同组分 10%~15%)、镉含量(12%~16%)以及镉有效富集系数亦显著降低。与不施锌相比, 土壤施锌对籽粒产量和氮含量均无显著影响, 但使籽粒锌含量大幅增加(14%~30%), 使镉含量(18%~28%)以及锌、镉有效富集系数均显著下降。土壤镉处理对籽粒产量和氮含量均无显著影响, 使籽粒镉含量(38~42 倍)以及锌、镉有效富集系数均显著增加, 而使锌含量显著下降(3%~12%)。籽粒组分及其与镉、锌处理的互作对小麦籽粒锌和镉含量影响均达显著。研究表明, $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉污染条件下小麦产量无明显变化, 但籽粒各组分镉含量大幅增加, 减施氮肥或/和增施锌肥均可显著减少小麦籽粒不同组分镉含量。

关键词: 氮; 锌; 镉污染; 小麦; 籽粒组分

中图分类号: X173; S512.1; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)02-0274-10 doi:10.11654/jaes.2022-0725

Effects of nitrogen and zinc application on yield, zinc and cadmium concentration in wheat grain under cadmium pollution

CHEN Wang¹, HU Shaowu², LUO Jingsheng¹, LI Tong¹, TIAN Chao², HE Fuhao², GU Jiaming², JING Liquan², WANG Yunxia^{1*}, YANG Lianxin^{2*}

(1. 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; 2. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/ Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/ Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Agricultural College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: To investigate the effects of nitrogen, zinc, and cadmium treatments and their interactions on yield, the zinc and cadmium concentration in grain was examined. A pot experiment was carried out using wheat cultivar Yangmai 25. The main plots had nitrogen application levels of normal nitrogen fertilizer ($1.6 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$) and reduced nitrogen fertilizer ($0.8 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$). The split plots contained the control, zinc treatment with a soil zinc application of $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, cadmium treatment with a soil cadmium application of $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and a combination treatment with zinc and cadmium. At plant maturity, the wheat grains were separated into three fractions of bran, shorts, and flour. The grain yield, nitrogen, zinc, and cadmium concentration of the grain fractions, zinc, and the cadmium bioconcentration factor

收稿日期: 2022-07-19 录用日期: 2022-11-14

作者简介: 陈旺(1997—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 从事小麦栽培生理研究。E-mail: 18852726716@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); 江苏高校优势学科建设工程项目

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

(BCF) of wheat were studied. The results showed that nitrogen reduction significantly reduced the grain yield. This was mainly related to the significant decreases in yield components, biomass, and the harvest index. Meanwhile, the concentrations of nitrogen (10%–15%) and cadmium (12%–16%) in different grain fractions and BCF_{Cd} were significantly decreased. The soil zinc treatment had no significant effect on the yield and nitrogen concentration of grain. However, the zinc concentrations of different grain fractions significantly increased by 14%–30%. The soil zinc treatment significantly decreased the cadmium concentration by 18%–28%, BCF_{Zn} , and BCF_{Cd} . The soil cadmium treatment had no significant effect on grain yield and the nitrogen concentration of the grain. However, cadmium concentrations of the different grain fractions of BCF_{Zn} and BCF_{Cd} were significantly increased (38–42 folds). The soil cadmium treatment decreased zinc concentrations of different grain fractions by 3%–12%. ANOVA results showed that the grain fraction and its interactions with zinc or cadmium treatment had significant effects on grain zinc and cadmium concentrations. These results suggest that soil cadmium pollution of $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ has no effect on wheat grain yield, but substantially increase the cadmium concentrations of different grain fractions. Nitrogen reduction, soil zinc application, and the combination of the two measures significantly reduce the cadmium concentrations of grain fractions.

Keywords: nitrogen; zinc; cadmium pollution; wheat; grain fraction

镉是耕地最主要的污染元素之一,其毒性大,污染面积广,且易被植物吸收累积,通过食物链直接或间接威胁人体健康^[1-2]。世界多国对膳食中镉的主要食物来源调查显示^[3],作物及其制品占比位居前列。小麦是我国重要的粮食作物^[4],其对镉具有较强的富集能力^[5]。小麦籽粒镉含量随土壤镉含量的增加而大幅上升^[6],进而引发食品安全问题。因此,降低小麦籽粒,尤其是面粉中的镉含量是保障粮食安全的重要研究方向。

锌是小麦必需微量元素,适量施用锌肥能改善小麦农艺性状^[7]和品质^[8],提高小麦籽粒及其不同组分锌含量^[9]。锌和镉的化学性质相似,两者在土壤-植物体系中存在吸附点的竞争,表现出复杂的相互作用。已有大量研究^[10-12]发现,外源施锌能抑制小麦籽粒对镉元素的吸收,这在土施^[12-13]或叶面锌肥^[12,14]的试验中均有报道。除了锌镉间的拮抗作用,亦有少数研究观察到锌镉间的协同作用^[15]。这两种元素在小麦体内的相互作用尚未形成共识,因此,需要更多环境条件下(如供氮水平)的比较研究。同时已有研究表明,锌镉在小麦籽粒不同组分(如面粉、次粉和麸皮)中存在显著差异^[16-17],然而,这种差异是否受锌镉互作的影响目前尚不清楚,有待进一步研究。

氮肥运筹是麦作生产中最重要农艺措施,但过量施用会造成严重的环境问题^[18]。氮亦是金属转运蛋白的主要组成成分,对小麦籽粒中锌镉具有高度的调控作用^[19-22]。多数研究表明适量增加施氮量,可以有效提高小麦籽粒的锌含量^[19-20],但施氮对小麦籽粒镉含量的影响尚不明确:Landberg等^[23]报道,小麦籽粒中镉含量随着土壤中氮含量增加而减少;但亦有研究发现,小麦籽粒镉含量与施氮量呈正相关关系^[21-22]。尽管氮肥与锌^[19]或镉^[22]处理间的互作已有报

道,但同时研究土壤氮、锌和镉处理及其交互作用对小麦生长和安全品质影响的报道很少,明确这三个因子之间的关系对镉污染麦区建立更为安全有效的生产措施具有重要意义。

为此,本试验于2020—2021年,以当地主栽品种扬麦25为供试材料,设置氮、锌、镉三因子盆栽试验,探究土壤氮、锌和镉处理对小麦农艺性状和籽粒不同组分氮、锌和镉含量的影响,阐明不同处理之间的互作效应,以期通过农艺措施最小化镉污染引发的食品安全问题提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于2020—2021年在扬州大学网室进行。供试盆栽基质由2 kg通气性良好的泥炭基质(德国维特集团0-10育苗泥炭与0-40种植泥炭质量比1:1混合)和4 kg土壤混合而成,基本理化性质见表1。塑料盆上口径28 cm,下口径21 cm,高31 cm。

试验采用裂区设计,氮处理为主区,锌处理和镉处理为裂区。氮处理设常氮 $1.6 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ (以N计,下同)和减氮 $0.8 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 2个处理。锌处理和镉处理采用正交试验设计,设对照(无锌镉处理)、锌处理($150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、镉处理($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和锌+镉处理($150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Zn} + 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)4个处理,每处理4个重复,盆栽基质中添加锌和镉均以 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 计,锌和镉分别以 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3\text{H}_2\text{O}$ 的形式施入,基质进行锌和镉处理后,在自然条件下培土3周。

1.2 材料培育

本研究以扬麦25为供试小麦品种。2020年11月25日播种,每盆播种20粒,不同生育期间苗至3株,2021年5月14日收获。减氮处理施氮总量 $0.8 \text{ g} \cdot$

表1 泥炭、土壤及盆栽混合基质的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of peat, soil and mixed matrix

理化性质 Physical and chemical property	泥炭 Peat	土壤 Soil	混合基质 Mixed matrix
pH	7.4	7.0	7.1
碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	206.2	88.6	167.1
全镉 Total cadmium/(mg·kg ⁻¹)	ND	ND	ND
全锌 Total zinc/(mg·kg ⁻¹)	11.5	70.0	33.6
有效镉 AB-DTPA extractable cadmium/(mg·kg ⁻¹)	0.088	0.066	0.081
有效锌 AB-DTPA extractable zinc/(mg·kg ⁻¹)	6.1	2.9	5.0

注:ND表明小于便携式X射线土壤分析仪(DS4000, Innov-X, USA)检出范围。

Note:ND indicates no detection used DS4000.

盆⁻¹,基肥和分蘖肥各占50%;常氮处理施氮总量1.6 g·盆⁻¹,基肥、分蘖肥、拔节肥和穗肥各占25%;磷施用量均为0.1 g·盆⁻¹,全部作基肥施入;钾施用量均为0.3 g·盆⁻¹,基肥和分蘖肥各占50%。基肥、分蘖肥、拔节肥和穗肥施用日期分别为2020年11月25日、2021年1月25日、2021年3月2日和2021年3月22日。基肥施用复合肥(N:P:K=15:15:15),氮追肥施用尿素(含氮率为46.7%),钾追肥施用K₂SO₄。适时进行水分管理和病虫害防治,保证小麦正常生长。

1.3 测定内容与方法

小麦籽粒产量及产量构成、生物产量和收获指数的测定:成熟期每盆收取3穴植株,将穗子与麦草分开,手工脱粒后,测定每盆穗数、穗质量、麦草质量、总粒数、总粒重,计算籽粒产量、每株穗数、每穗粒数、千粒质量、生物产量和收获指数(HI)。

小麦籽粒面粉、次粉、麸皮氮含量测定:籽粒用超纯水清洗后60℃烘干至质量恒定,用磨粉机(Sedimat Laboratory Mill, Brabender™GmbH&Co,德国)磨粉,将粉样分别过40目和100目筛,不能过40目筛的部分作麸皮回收,通过100目筛的部分作面粉回收,介于40目和100目之间的作次粉回收,并称质量^[9,24]。称取0.200 0 g于100 mL消化管中,加入5 mL浓硫酸,消化炉370℃下消解至澄清,期间加2~3次过氧化氢,每次5~10滴。用SmartChem200全自动间断化学分析仪测定消解液氮含量,并计算籽粒氮含量。

小麦籽粒面粉、次粉、麸皮镉和锌含量测定^[9]:称取面粉、次粉、麸皮样品0.45~0.50 g置于内衬管中,并加入5 mL浓硝酸、3 mL去离子水和3滴过氧化氢,置

于微波消解仪中消解,用去离子水定容至50 mL后过滤,用全谱直读等离子发射光谱仪(iCAP6300ICP-OES, Thermo Elemental, 美国)测定面粉、次粉、麸皮样品滤液锌浓度,用电感耦合等离子体质谱仪(Elan DRC-e ICP-MS, PerkinElmer, 美国)测定滤液镉浓度,并计算籽粒镉和锌含量。

基质土壤有效锌、镉含量测定^[25]:小麦收获后,采用5点法随机取小麦根际基质土壤样品混匀,深度约20 cm,除去根系后自然风干。用DTPA溶液(0.005 mol·L⁻¹二乙基三胺五乙酸、0.1 mol·L⁻¹三乙醇胺、0.01 mol·L⁻¹无水CaCl₂和6 mol·L⁻¹盐酸调制,pH=7.3)提取样品中的有效锌、镉浓度,用全谱直读等离子发射光谱仪(iCAP6300ICP-OES, Thermo Elemental, 美国)测定提取液中锌、镉浓度。

小麦籽粒锌、镉有效富集系数($BCF_{Zn/Cd}$):根据小麦籽粒锌(镉)含量与基质土壤有效锌(镉)含量的比值计算而得。籽粒中镉有效富集系数 $Cd\ BCF_{Soil-Grain} = C_{籽粒Cd} / C_{基质DTPA-Cd}$;籽粒中锌有效富集系数 $Zn\ BCF_{Soil-Grain} = C_{籽粒Zn} / C_{基质DTPA-Zn}$ 。

1.4 数据分析

本试验数据用Excel 2019处理并进行图表绘制,用SPSS 19.0进行裂区方差分析,采用Duncan法($\alpha=0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 小麦籽粒产量、产量构成因素、生物产量与收获指数

施氮、锌对镉污染小麦扬麦25单株籽粒产量的影响见表2。结果表明:①所有镉、锌处理取平均,减氮处理使小麦籽粒产量较常氮条件下生长的小麦下降35.7%($P<0.01$)。②不同镉、氮处理取平均,施锌较无锌处理产量增加7.1%($P=0.06$);从不同镉处理看,施锌使镉处理小麦籽粒产量增加15.6%($P<0.05$),但对无镉小麦没有影响。③锌、氮处理取平均,镉处理小麦籽粒产量较无镉处理增加3.4%,但未达显著水平;从不同氮处理看,镉处理使减氮处理小麦籽粒产量增加14.1%($P=0.05$),但常氮条件下小麦无显著变化。方差分析表明,锌镉互作、氮镉互作对小麦籽粒产量的影响达显著水平。

小麦产量构成因素的测定结果见表2。结果表明:①与常氮相比,减氮处理使小麦每株穗数、每穗粒数、千粒质量平均分别降低25.2%、10.2%、4.6%,均达极显著水平。②与无锌处理相比,施锌使每株穗数平

均增加 10.1% ($P<0.05$),但对每穗粒数和千粒质量均无显著影响。③与无镉处理相比,镉处理对每株穗数、每穗粒数和千粒质量均无显著影响。氮、锌和镉处理间的互作对产量构成因素均无显著影响。

小麦籽粒产量为地上部生物产量和收获指数(HI)的乘积(表3)。结果表明:①与常氮相比,减氮处理使生物产量和HI平均分别极显著下降 29.4% 和 8.9%。②与无锌处理相比,锌处理使小麦生物产量和HI平均分别增加 4.2% ($P=0.11$) 和 2.5% ($P=0.09$);从不同镉处理看,锌处理使镉处理小麦生物产量增加 10.6% ($P<0.05$),但对无镉处理小麦两参数均没有影响。③镉处理使生物产量和HI均略有增加,但未达显著水平;其中,镉处理使减氮处理小麦生物产量平均增加 13.2% ($P<0.05$),但常氮小麦两参数均无显著变化。镉与锌处理或氮处理间互作对小麦生物产量的影响达显著水平。

2.2 小麦籽粒不同组分镉含量

施氮、锌对镉污染小麦不同组分镉含量的影响见图1和表4~表5。结果表明:①小麦籽粒不同组分镉含量差异达极显著水平。所有处理取平均,小麦

表3 施氮、锌对镉污染小麦生物产量及收获指数的影响

Table 3 Effects of nitrogen and zinc application on biomass and harvest index of wheat under cadmium pollution

氮处理 N treatment	锌处理 Zn treatment	镉处理 Cd treatment	生物产量/(g·株 ⁻¹) Biomass/ (g·plant ⁻¹)	收获指数 Harvest index (HI)
NN	-Zn	-Cd	31.3±0.7ab	0.481±0.006a
		+Cd	30.0±0.8b	0.464±0.016a
	+Zn	-Cd	32.2±0.9ab	0.487±0.005a
		+Cd	32.4±0.4a	0.491±0.004a
LN	-Zn	-Cd	21.8±0.7ab	0.437±0.003a
		+Cd	22.0±0.2ab	0.433±0.009a
	+Zn	-Cd	19.9±0.7b	0.436±0.009a
		+Cd	25.2±2.0a	0.446±0.005a

ANOVA 结果

氮处理 N	<0.001 ↓	<0.001 ↓
锌处理 Zn	0.110	0.089
镉处理 Cd	0.115	0.642
N×Zn	0.459	0.483
N×Cd	0.021	0.353
Zn×Cd	0.020	0.208
N×Zn×Cd	0.200	0.913

表2 施氮、锌对镉污染小麦籽粒产量与产量构成因素的影响

Table 2 Effects of nitrogen and zinc application on grain yield and yield components of wheat under cadmium pollution

氮处理 N treatment	锌处理 Zn treatment	镉处理 Cd treatment	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 spike	千粒质量/g 1000 kernels mass/g
NN	-Zn	-Cd	15.1±0.5a	5.6±0.3a	64.1±0.9a	42.3±1.0a
		+Cd	14.0±0.8a	5.3±0.2a	62.5±2.6a	41.9±0.8a
	+Zn	-Cd	15.7±0.5a	5.8±0.1a	62.6±3.2a	43.1±1.2a
		+Cd	15.9±0.2a	6.1±0.3a	63.0±1.8a	41.6±0.3a
LN	-Zn	-Cd	9.5±0.3ab	4.0±0.1b	58.9±0.5a	40.5±0.4a
		+Cd	9.5±0.3ab	4.1±0.1ab	58.5±1.4a	39.9±0.5a
	+Zn	-Cd	8.7±0.4b	4.3±0.1ab	51.5±0.8b	39.7±1.6a
		+Cd	11.3±1.0a	4.8±0.4a	57.6±1.1a	41.1±0.6a

ANOVA 结果

氮处理 N	<0.001 ↓	<0.001 ↓	<0.001 ↓	0.008 ↓
锌处理 Zn	0.062	0.013 ↑	0.130	0.694
镉处理 Cd	0.360	0.549	0.249	0.726
N×Zn	0.365	0.864	0.098	0.918
N×Cd	0.042	0.236	0.290	0.355
Zn×Cd	0.034	0.271	0.062	0.748
N×Zn×Cd	0.419	0.864	0.530	0.295

注:NN:常氮,1.6 g·盆⁻¹;LN:减氮,0.8 g·盆⁻¹; -Zn:无锌处理;+Zn:150 mg·kg⁻¹ 锌处理; -Cd:无镉处理;+Cd:5 mg·kg⁻¹ 镉处理;n=4;同一氮处理下不同字母表示锌镉处理组合间差异显著($P<0.05$);↑表示处理使指标显著或极显著增加;↓表示处理使指标显著或极显著降低,加粗数字表示达显著或极显著水平。下同。

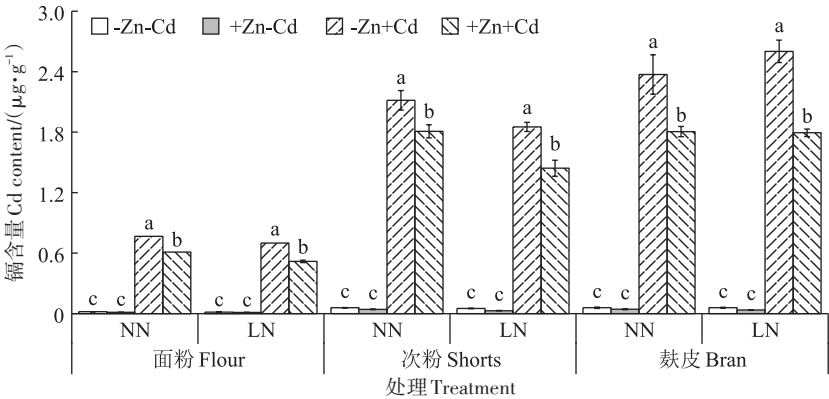
Note: NN: Normal nitrogen application of 1.6 g·pot⁻¹; LN: Low nitrogen application of 0.8 g·pot⁻¹; -Zn: no soil zinc treatment; +Zn: soil zinc treatment of 150 mg·kg⁻¹; -Cd: no soil cadmium treatment; +Cd: soil cadmium treatment of 5 mg·kg⁻¹; n=4; Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level between different cadmium and zinc treatment combinations under the same nitrogen levels; ↑ denotes significant increases of the parameter by the treatment, ↓ denotes significant decreases of the parameter by the treatment; Values in bold indicate significant at $P<0.05$ or $P<0.01$. The same below.

面粉、次粉和麸皮镉含量分别为0.332、0.926、1.097 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 含量最大相差超3倍。②与常氮相比, 减氮处理使籽粒镉含量显著下降, 这主要与面粉(-11.7%)、次粉(-16.0%)极显著下降有关, 而麸皮无明显变化。③与无锌处理相比, 施锌使小麦籽粒镉含量极显著下降, 其中面粉、次粉、麸皮平均分别降低23.3%、18.4%、27.6%。从不同镉处理看, 施锌使镉处理小麦籽粒各组分镉含量均显著下降, 但无镉处理小麦籽粒各组分的降幅均未达显著水平; 从施氮水平看, 施锌使减氮处理小麦籽粒各组分的降幅(-26.5%)大于常氮处理(-19.8%)。④与无镉处理相比, 镉处理使籽粒镉含量大幅增加: 面粉、次粉、麸皮部位平均分别增加42、38、42倍。方差分析表明, 镉处理 $\times$ 锌处理、镉处理 $\times$ 部位、锌处理 $\times$ 部位、氮处理 $\times$ 部位、镉处理 $\times$ 锌

处理 $\times$ 部位、镉处理 $\times$ 氮处理 $\times$ 部位对小麦籽粒镉含量的互作效应均达极显著水平。

2.3 小麦籽粒不同组分镉含量

施氮、锌对镉污染小麦籽粒不同组分镉含量的影响见图2和表4~表5。结果表明: ①小麦籽粒不同组分间镉含量差异达极显著水平, 面粉、次粉和麸皮镉含量平均分别为15.5、89.6 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和91.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 含量最大相差近6倍。②与常氮相比, 减氮处理使次粉镉含量平均增加17.5% ($P<0.01$), 面粉平均降低22.9% ($P<0.01$), 而麸皮无明显变化。③与无锌处理相比, 施锌使小麦籽粒镉含量极显著增加, 其中面粉、次粉和麸皮平均分别增加14.3%、27.1%和29.5%, 次粉和麸皮均达极显著水平。④与无镉处理相比, 镉处理使小麦籽粒镉含量极显著降低, 其中面粉、次粉和麸皮



同一氮处理下不同字母表示锌镉处理组合间差异显著 ($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level between different cadmium and zinc treatment combinations under the same nitrogen levels

图1 施氮、锌对镉污染小麦籽粒不同组分镉含量的影响

Figure 1 Effects of nitrogen and zinc application on cadmium concentrations of grain fractions of wheat under cadmium pollution

表4 施氮、锌对镉污染小麦籽粒不同组分镉、锌、氮含量影响的显著性检验 (P 值)

Table 4 ANOVA results (P value) of nitrogen and zinc application on the nitrogen, zinc and cadmium concentrations of grain fractions of wheat under cadmium pollution

项目 Item	氮处理 N	锌处理 Zn	镉处理 Cd	N $\times$ Zn	N $\times$ Cd	Cd $\times$ Zn	Cd $\times$ Zn $\times$ N
面粉镉含量 Flour Cd concentration	0.004 ↓	<0.001 ↓	<0.001 ↑	0.595	0.006	<0.001	0.516
次粉镉含量 Shorts Cd concentration	0.001 ↓	<0.001 ↓	<0.001 ↑	0.761	0.001	<0.001	0.834
麸皮镉含量 Bran Cd concentration	0.375	<0.001 ↓	<0.001 ↑	0.374	0.347	<0.001	0.405
面粉锌含量 Flour Zn concentration	<0.001 ↓	0.088	0.186	0.543	0.128	0.328	0.283
次粉锌含量 Shorts Zn concentration	<0.001 ↑	<0.001 ↑	0.002 ↓	0.024	0.770	0.001	0.782
麸皮锌含量 Bran Zn concentration	0.562	<0.001 ↑	0.376	0.179	0.048	0.665	0.466
面粉氮含量 Flour N concentration	<0.001 ↓	0.850	0.777	0.118	0.453	0.001	0.850
次粉氮含量 Shorts N concentration	<0.001 ↓	0.620	0.400	0.595	0.489	0.878	0.658
麸皮氮含量 Bran N concentration	<0.001 ↓	0.484	0.361	0.098	0.339	0.125	0.285
籽粒镉有效富集系数 Grain BCF_{Cd}	0.018 ↓	<0.001 ↓	<0.001 ↑	0.830	0.656	0.041	0.576
籽粒锌有效富集系数 Grain BCF_{Zn}	0.710	<0.001 ↓	0.002 ↑	0.154	0.091	0.518	0.885

表5 氮、锌、镉处理和组分对小麦籽粒镉、锌、氮含量影响的显著性检验(*P*值)

Table 5 ANOVA results(*P* value) of nitrogen, zinc, cadmium treatments, fractions and their interactions on grain cadmium, zinc and nitrogen concentrations

变异来源 Source	镉含量 Cd concentration	锌含量 Zn concentration	氮含量 N concentration
氮处理 N	0.028 ↓	0.013 ↑	0.002 ↓
锌处理 Zn	<0.001 ↓	<0.001 ↑	0.405
镉处理 Cd	<0.001 ↑	0.003 ↓	0.216
组分 Fraction(F)	<0.001	<0.001	<0.001
N×Zn	0.170	0.871	0.026
N×Cd	0.054	0.092	0.338
N×F	0.001	<0.001	0.417
Zn×Cd	<0.001	0.010	0.016
Zn×F	<0.001	<0.001	0.877
Cd×F	<0.001	0.033	0.007
N×Zn×Cd	0.176	0.643	0.289
N×Zn×F	0.593	0.026	0.541
N×Cd×F	0.001	0.049	0.592
Zn×Cd×F	<0.001	0.071	0.148
N×Zn×Cd×F	0.625	0.580	0.500

锌含量平均分别降低6.9%、11.5%和3.2%,次粉达极显著水平;从不同锌处理看,镉处理对无锌处理小麦籽粒各组分的影响明显大于锌处理。方差分析显示,镉处理×锌处理、镉处理×部位、锌处理×部位、氮处理×部位、镉处理×氮处理×部位、锌处理×氮处理×部位对小麦籽粒锌含量的互作效应达显著或极显著水平。

2.4 小麦籽粒不同组分氮含量

施氮、锌对镉污染小麦籽粒不同组分氮含量的影响见图3和表4~表5。小麦籽粒不同组分间氮含量差异达极显著水平,其中次粉和麸皮氮含量显著高于面粉。与常氮相比,减氮处理使小麦籽粒氮含量极显著下降,其中面粉、次粉和麸皮平均分别降低14.9%、9.7%和11.9%。锌、镉处理对小麦籽粒各组分氮含量均无显著影响。镉处理×锌处理、镉处理×部位、锌处理×氮处理对小麦籽粒氮含量的互作效应达显著或极显著水平。

2.5 小麦籽粒镉、锌有效富集系数

施氮、锌对镉污染小麦籽粒镉有效富集系数的影

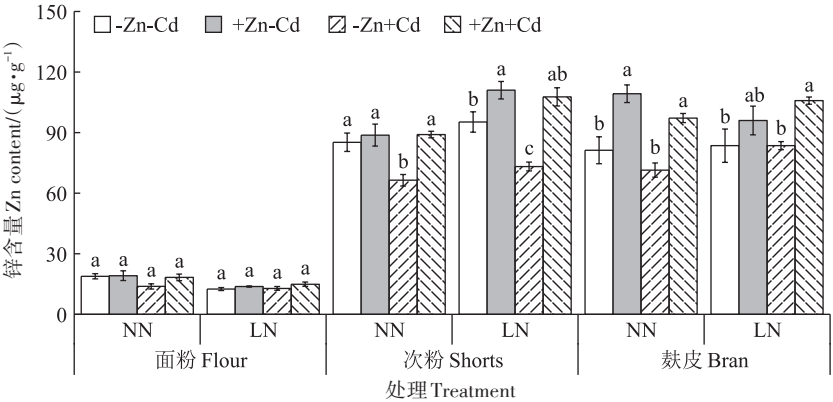


图2 施氮、锌对镉污染小麦籽粒不同组分锌含量的影响

Figure 2 Effects of nitrogen and zinc application on zinc concentrations of grain fractions of wheat under cadmium pollution

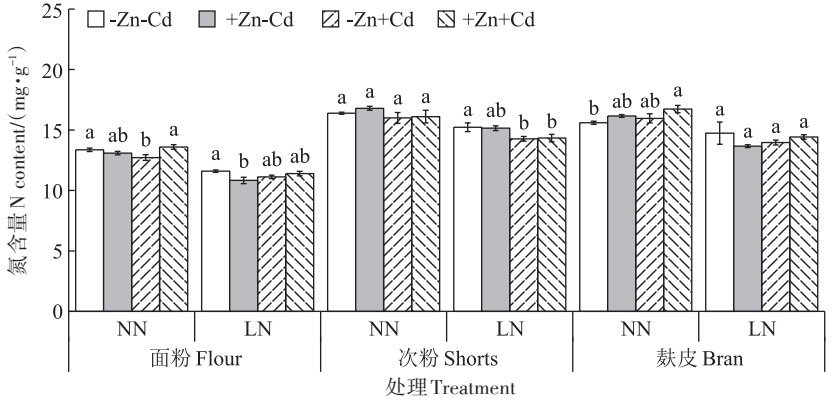


图3 施氮、锌对镉污染小麦籽粒不同组分氮含量的影响

Figure 3 Effects of nitrogen and zinc application on nitrogen concentrations of grain fractions of wheat under cadmium pollution

响见图4A和表4。与常氮相比,减氮处理使小麦籽粒镉有效富集系数平均减少12.4% ($P<0.05$)。与无镉处理相比,施镉使小麦籽粒镉有效富集系数平均降低29.4% ($P<0.01$),其中施镉对镉处理小麦籽粒镉有效富集系数的影响(-30.1%)大于无镉处理(-28.0%)。与无镉处理相比,镉处理使小麦籽粒镉有效富集系数增加82.3% ($P<0.01$),其中镉处理对无镉处理小麦的影响(+84.5%)大于施镉小麦(+79.2%)。镉与锌处理对小麦籽粒镉有效富集系数的互作效应达显著水平。

小麦籽粒锌有效富集系数的计算结果示于图4B和表4。减氮处理对小麦籽粒锌有效富集系数无显著影响,施镉使小麦籽粒锌有效富集系数降低54.3% ($P<0.01$)。镉处理使小麦籽粒锌有效富集系数增加22.0% ($P<0.01$),减氮条件下的增幅大于常氮。镉、锌、氮处理间互作对籽粒锌有效富集系数的影响均未达显著水平。

3 讨论

3.1 减氮对小麦籽粒产量和氮、锌、镉含量的影响

氮肥对小麦农艺性状有重要的调控作用^[26-27]。本试验表明,施氮量减半使扬麦25籽粒产量平均下降36%(表2)。从产量构成因子看,这主要与穗数变少(-25%)和麦穗变小(-10%)有关,而粒质量变化较小,与赵盼盼^[27]的报道基本一致。进一步研究还发现减氮导致的小麦减产主要与生长量减少有关,而与光合产物向籽粒的分配变化关系较小(表3)^[28],这也与减氮处理对粒质量影响较小相一致。

与常氮相比,减氮处理使小麦籽粒不同组分氮含量一致下降,以面粉降幅最大(-15%)。Zhou等^[29]在小麦叶面喷施尿素试验中亦有类似报道。氮是金属转运蛋白的主要组成成分,施氮水平会影响小麦籽粒

中锌、镉等元素的吸收与分布^[21,30]。多数文献表明,增施氮肥有利于小麦籽粒锌含量的提高^[19-20],但也有无影响的报道^[19]。本研究发现,减氮对小麦籽粒锌含量的影响较小,但不同组分间差异较大:次粉锌含量增加,面粉减少,而麸皮无明显变化。这可能与低氮小麦灌浆不充足,进而导致大量锌滞留在次粉中有关,但这还需进一步试验证实。

前人研究^[21-22]发现,小麦籽粒镉含量随着施氮量的增加而增加,但这种变化是否因籽粒不同组分而异尚不清楚。本研究表明,减氮处理亦使小麦籽粒镉含量显著下降,但这主要与面粉和次粉(12%~16%)下降有关,麸皮无显著变化。减氮导致籽粒镉含量下降与镉有效富集系数的变化相一致:减氮条件下小麦镉有效富集系数显著下降(-12%,图4A),说明减氮可能影响土壤镉向地上部的转运,进而导致籽粒镉含量下降。

3.2 土壤施镉对小麦籽粒产量和氮、锌、镉含量的影响

镉是小麦必需元素之一,适量施用促进生长,过量则相反^[31-32]。据我国土壤环境质量标准(GB 15618—2018),当土壤总镉 $\leq 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对植物和环境不会造成危害和污染。本研究表明,土壤 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉处理使小麦籽粒产量略增7%。进一步分析表明,这主要与穗数增加有关,而每穗粒数和千粒质量无显著变化^[33]。

从籽粒元素含量看,土壤施镉对籽粒氮含量无显著变化(图3),但使锌含量大幅增加(图2),这与Zhang等^[34]的报道一致。本试验将籽粒区分为面粉、次粉、麸皮三个组分,结果发现不同组分锌含量对施镉的响应差异亦很大(表5):麸皮的增幅最大(+30%),面粉最小(+14%),而次粉(+27%)介于两者之间,这些增幅均小于前期小麦叶面施镉试验的报道^[9]。小

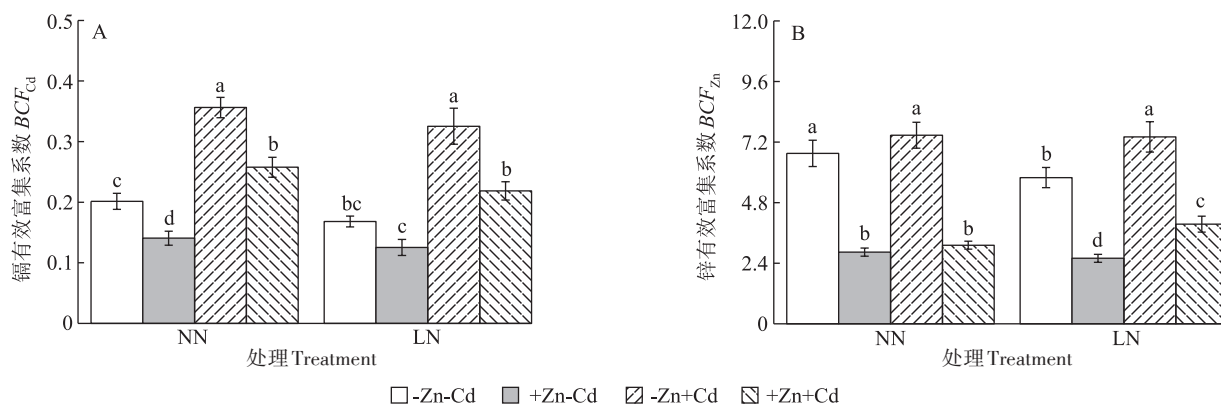


图4 施氮、锌对镉污染小麦籽粒镉、锌有效富集系数的影响

Figure 4 Effects of nitrogen and zinc application on grain cadmium and zinc bioconcentration factors of wheat under cadmium pollution

麦籽粒外层富镉能力较强,主要与糊粉层富含肌醇六磷酸有关,后者利于镉的吸收^[35]。一般叶施镉肥较土施镉肥更容易转运至籽粒^[36],土壤施镉则会导致镉大多滞留在土壤中,这也与观察到的施镉小麦镉有效富集系数下降相一致(图4B)。

锌与镉化学性质相似,锌、镉在小麦体内的转运需要竞争同一转运蛋白位点^[11],因此锌、镉之间存在拮抗作用,这在土施^[12]或叶施镉肥^[12,14]试验中均有报道,例如Zhou等^[12]报道土施20~40 mg·kg⁻¹ ZnSO₄使小麦籽粒镉含量下降26%~49%。本研究发现,土壤150 mg·kg⁻¹ 锌处理使小麦籽粒镉有效富集系数下降近30%,这可能与施镉土壤中有效态镉降低以及镉从根系向籽粒的转移受抑有关^[37]。与此相对应,施镉使籽粒不同组分镉含量一致下降,其中麸皮镉含量的降幅明显大于面粉和次粉(图1)。分析还发现,施镉对籽粒镉含量的影响还与是否进行镉处理有关:镉处理小麦的降幅均达显著水平,而对照小麦无显著变化(图1)。方差分析证实,锌、镉处理对籽粒镉含量有显著的互作效应(表4)。以上分析说明施镉可有效降低小麦,特别是镉污染小麦食用部位的镉含量,同时起到降镉增锌的效果。

3.3 土壤镉污染对小麦籽粒产量和氮、锌、铜含量的影响

镉是作物非必需元素,毒性强,易被植株吸收^[38]。前人研究表明,土壤镉污染对小麦产量的影响存在品种依赖^[13,39]。本研究发现,土壤5 mg·kg⁻¹ 镉处理对小麦籽粒产量无显著影响,这与产量构成因子和收获指数均无变化一致(表2和表3)。

虽然镉处理对小麦产量性状和氮含量均无显著影响(表2和图3),但使小麦籽粒镉含量大幅增加,平均增幅高达45倍,这一结果与Guo等^[6]的报道相近。从籽粒不同组分看,小麦面粉、次粉和麸皮的镉含量存在显著的部位差异^[17],且对镉处理的响应亦存在显著差异(麸皮响应最大),表现在镉处理和组分间存在显著的互作(表5)。值得关注的是,5 mg·kg⁻¹ 镉处理对小麦生长没有影响,但使籽粒各组分包括面粉的镉含量(0.8~2.5 mg·kg⁻¹)均大幅增加,明显超过国家食品镉安全标准(0.2 mg·kg⁻¹)。镉污染亦使小麦籽粒镉有效富集系数大幅增加(+82%),这与Li等^[40]的报道一致。这可能与镉处理使土壤有效镉含量增加,进而促进土壤镉向小麦籽粒的富集有关。

与施镉对镉的作用相同,土壤镉处理显著减少小麦籽粒锌含量(图2),这与Farooq等^[41]的报道一致。

从不同组分看,镉处理使小麦面粉、次粉和麸皮锌含量均下降,但只有次粉部位的降幅达显著水平(-11%)。从不同镉处理看,镉处理对无镉处理小麦籽粒各组分的影响(-14%)大于镉处理小麦的(-1%)。这可能与土壤中镉和锌的比例变化有关:通常,土壤中镉锌比越高,镉对锌的抑制作用可能越强^[17]。土壤镉处理对小麦籽粒镉有效富集系数的影响目前未见报道。本研究表明,与籽粒镉含量相反,土壤镉处理使小麦籽粒镉有效富集系数显著增加(+22%),这主要与外源镉处理对土壤中镉的抑制作用较对小麦籽粒镉的抑制作用更大有关,但其内在机理尚待探究。

综上可知,减施氮肥与土壤施镉均能降低镉污染小麦籽粒尤其是面粉中镉含量。同时本研究发现,与单独减氮或土壤施镉相比,两者复合处理使镉污染小麦面粉、次粉和麸皮镉含量的降幅更大,分别为32%、32%和25%(表6)。这说明减氮和土壤施镉组合使用将更有效地抑制镉污染下镉向小麦籽粒的转运,大幅缓解镉污染对小麦品质安全的影响。

表6 减氮、施镉及两者结合对镉污染小麦面粉、次粉和麸皮镉含量的影响(%)

Table 6 Effects of nitrogen reduction, soil zinc application and the combination of two measures on cadmium concentrations of flour, shorts, bran of wheat under cadmium pollution(%)

处理Treatment	面粉Flour	次粉Shorts	麸皮Bran
减氮 Nitrogen reduction	-9	-12	+10
土壤施镉 Soil zinc application	-20	-14	-24
减氮+土壤施镉 Nitrogen reduction and soil zinc application	-32	-32	-25

注:表中数据为镉污染条件下减氮、施镉处理或两者结合导致小麦籽粒不同组分镉浓度增加或减少的百分数。

Note: Values in the table represent the percentage change in cadmium concentration of wheat grain fractions by nitrogen reduction, soil zinc application and the combination of two measures under cadmium pollution.

4 结论

(1)土壤5 mg·kg⁻¹ 镉污染对小麦产量等表型性状均无显著影响,但使小麦籽粒不同组分包括面粉的镉含量大幅上升(40倍左右),同时使籽粒锌含量降低,进而对人体健康构成严重威胁。

(2)土壤150 mg·kg⁻¹ 锌处理不仅能有效改善小麦籽粒及各组分锌营养,而且能显著降低籽粒各分组的镉含量,起到增锌降镉的效果。

(3)减少小麦生长后期的氮肥施用量,可减弱土

壤中镉向小麦籽粒的富集,显著降低籽粒不同组分的镉含量。若结合增施锌肥亦可进一步缓解镉污染对小麦安全品质的影响。

参考文献:

- [1] REHMAN M Z, ZAFAR M, WARIS A A, et al. Residual effects of frequently available organic amendments on cadmium bioavailability and accumulation in wheat[J]. *Chemosphere*, 2020, 244:125548.
- [2] FEKI-TOUNSI M, OLMEDO P, GIL F, et al. Cadmium in blood of Tunisian men and risk of bladder cancer: Interactions with arsenic exposure and smoking[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2013, 20(10):7204-7213.
- [3] CHUNHABUNDIT R. Cadmium exposure and potential health risk from foods in contaminated area, Thailand[J]. *Toxicological Research*, 2016, 32(1):65-72.
- [4] GAO Y, WANG X L, SHI Y. The types, regional distribution, and consumption trend of Chinese traditional wheat-based foods[J]. *Journal of Food Quality*, 2022, 10:9986119.
- [5] 武超, 周顺江, 王华利, 等. 生物炭和锌对土壤镉赋存形态及小麦镉积累的影响[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(1):202-210. WU C, ZHOU S J, WANG H L, et al. Effects of biochar and zinc on soil cadmium fractions and wheat accumulation[J]. *Research of Environmental Science*, 2022, 35(1):202-210.
- [6] GUO J J, QIN S Y, REANGEL Z, et al. Cadmium stress increases antioxidant enzyme activities and decreases endogenous hormone concentrations more in Cd-tolerant than Cd-sensitive wheat varieties[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 172:380-387.
- [7] LIU D Y, WEI Y M, ZHANG X P, et al. Zinc uptake, translocation, and remobilization in winter wheat as affected by soil application of Zn fertilizer[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10:426.
- [8] HALL A G, KING J C. Zinc fortification: Current trends and strategies [J]. *Nutrients*, 2022, 14:3895.
- [9] 齐义涛, 张庆, 周三妮, 等. 结实期叶面施锌对扬麦16号和扬辐麦2号籽粒不同部位锌含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4):675-680. QI Y T, ZHANG Q, ZHOU S N, et al. The effect of foliar Zn application at grain filling stage on Zn content in grain fractions of winter wheat Yangmai 16 and Yangfumai 2[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):675-680.
- [10] OLSEN L I, PALMGREN M G. Many rivers to cross: The journey of zinc from soil to seed[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5:30.
- [11] WANG Y, WANG X L, WANG C, et al. Proteomic profiling of the interactions of Cd/Zn in the roots of dwarf polish wheat (*Triticum polonicum* L.)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7:1378.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] LIU Y M, LIU D Y, WEI Z B, et al. Health risk assessment of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb, As and Cr) in wheat grain receiving repeated Zn fertilizers[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257:113581.
- [16] 王云霞, 杨连新, HORST W J. 用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱研究小麦籽粒元素的共分布[J]. *作物学报*, 2012, 38(3):514-521. WANG Y X, YANG L X, HORST W J. Element colocalization in wheat seed revealed by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(3):514-521.
- [17] 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, 267:115613.
- [18] CHEN X, CUI Z, FAN M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514:486-489.
- [19] MONTOYA M, ANTONIO V, JAIME R, et al. Zinc-nitrogen interaction effect on wheat biofortification and nutrient use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2020, 183(2):169-179.
- [20] 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.
- [21] PERILLI P, MITCHELL L G, GRANT C A, et al. Cadmium concentration in durum wheat grain (*Triticum turgidum*) as influenced by nitrogen rate, seeding date and soil type[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 90(5):813-822.
- [22] WANGSTRAND H, ERIKSSON J, BORN I. Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3):209-214.
- [23] LANDBERG T, GREGER M. Influence of N and N supplementation on Cd accumulation in wheat grain[C]//Uppsala: 7th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Conference Proceedings 1, 2003:90-91.
- [24] CIACCHERI L, TUCCIO L, MENCAGLIA A A, et al. Directional versus total reflectance spectroscopy for the *in situ* determination of lycopene in tomato fruits[J]. *Journal of Food Composition & Analysis*, 2018:S0889157518300231.
- [25] WANG Y L, XU X, LIANG L, 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.
- [26] 刘哲文, 郭丹丹, 常旭虹, 等. 小麦产量和品质对不同类型土壤和施氮处理的响应[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(5):623-630. LIU Z W, GUO D D, CHANG X H, et al. Responses of yield and quality of wheat to different soil types and nitrogen treatments[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(5):623-630.

- [27] 赵盼盼. 减氮和分期施钾对冬小麦茎蘖成穗与产量的调控[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021: 17-22. ZHAO P P. Effects of nitrogen reduction and splitting potassium apply on spike formation and yield of main stem and tillers in winter wheat[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021: 17-22.
- [28] 丁永刚, 汤小庆, 梁鹏, 等. 减氮对不同氮效率小麦品种花后光合物质生产力和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(4): 490-498. DING Y G, TANG X Q, LIANG P, et al. Effect of reduced nitrogen application on post-anthesis photosynthetic production and grain yield of wheat cultivars with various nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(4): 490-498.
- [29] ZHOU Q, LI X N, YANG J T, et al. Spatial distribution patterns of protein and starch in wheat grain affect baking quality of bread and biscuit[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79: 362-369.
- [30] 赵丽芳, 袁亮, 张水勤, 等. 氮锌配施对作物产量、品质及养分吸收利用的影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 346-352. ZHAO L F, YUAN L, ZHANG S Q, et al. Research progress on effects of combined application of nitrogen and zinc on crop yield, quality and nutrient absorption and utilization[J]. *Soil & Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 346-352.
- [31] BROADLEY M R, WHITE P J, HAMMOND J P, et al. Zinc in plants[J]. *New Phytologist*, 2007, 173: 677-702.
- [32] GLIŃSKA S, GAPIŃSKA M, MICHLEWSKA S, et al. Analysis of *Triticum aestivum* seedling response to the excess of zinc[J]. *Protoplasma*, 2016, 253: 367-377.
- [33] 李强. 锌对小麦生长及产量的影响[J]. 土壤肥料, 2004(1): 16-18. LI Q. Effects of zinc on growth and yield of wheat[J]. *Soil & Fertilizer*, 2004(1): 16-18.
- [34] ZHANG P P, MA G, WANG C Y, et al. Mineral elements bioavailability in milling fractions of wheat grain response to zinc and nitrogen application[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(5): 2504-2511.
- [35] CAKMAK I, PFEIFFER W H, MCCLAFFERTY B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87(1): 10-20.
- [36] CAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification[J]. *Plant Soil*, 2008, 302: 1-17.
- [37] SAEED K Z, 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 & Pollution Research*, 2019, 26: 19859-19870.
- [38] RETAMAL-SALGADO J, HIRZEL J, WALTER I, et al. Bioabsorption and bioaccumulation of cadmium in the straw and grain of maize (*Zea mays* L.) in growing soils contaminated with cadmium in different environment[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2017, 14(11): 1399.
- [39] 朱志勇, 李友军, 郝玉芬, 等. 镉对小麦干物质积累、转移及籽粒产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 252-258. ZHU Z Y, LI Y J, HAO Y F, et al. Effects of Cd on accumulations and translocation of biomasses and yield of different wheat (*Triticum aestivum*) cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 252-258.
- [40] 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.
- [41] 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.

(责任编辑: 叶飞)