

喷锌对黄土高原小麦籽粒营养品质及锌分布的影响

唐梦珊, 吕志远, 赵晓涵, 郭娇, 刘金山, 毛晖

引用本文:

唐梦珊, 吕志远, 赵晓涵, 郭娇, 刘金山, 毛晖. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0598>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土高原潜在缺锌区施用纳米氧化锌(ZnO NPs)对冬小麦生长及籽粒品质的影响

孙宏达, 钟民正, 张腾, 翟丙年, 王朝辉, 毛晖

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2041–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1499>

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>

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>

高CO₂浓度和叶面施锌对稻米锌营养的影响

杨阳, 户少武, 牛玺朝, 童楷程, 陈晨, 杨连新, 王云霞

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 436–444 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0899>

水稻花后叶面锌和尿素配施对稻米锌营养的影响

陈晨, 张欣, 户少武, 顾珈名, 童楷程, 陈旺, 景立权, 王云霞, 杨连新

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1636–1646 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1461>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

喷锌对黄土高原小麦籽粒营养品质及锌分布的影响

唐梦珊¹, 吕志远¹, 赵晓涵¹, 郭娇¹, 刘金山^{1,2}, 毛晖^{1,2*}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探明不同喷锌次数对小麦产量以及面粉品质的影响,通过两年田间定位试验,研究在小麦的不同生长阶段2次(F2)和4次(F4)叶面喷施ZnSO₄处理,对小麦籽粒锌、淀粉、蛋白质、氨基酸含量以及籽粒锌分布和锌生物利用率的影响。结果表明:在不同生长期喷施ZnSO₄均能提高小麦的籽粒锌含量,但提升幅度因喷施次数而异,与对照组(不施锌)相比,F4处理的小麦籽粒锌含量提高72.3%~118.7%,籽粒锌携出量提高127.3%~143.0%,提高幅度显著高于F2处理。喷锌处理的小麦籽粒蛋白质携出量以及淀粉携出量均有提高,提升幅度分别为10.9%~25.1%和5.1%~35.8%。第一季试验中小麦籽粒蛋白质和氨基酸发生稀释效应,第二季试验两者均显著提高,其中必需氨基酸中的蛋氨酸和苯丙氨酸连续两年均有不同程度的提高。小麦籽粒锌分布表现为叶面喷施ZnSO₄(F2和F4)处理的胚和胚乳中的锌含量(质量百分比)高于对照处理,麸皮中的锌含量(质量百分比)低于对照处理。并且,F4处理籽粒的磷和锌摩尔比显著低于对照处理。研究表明,喷施锌肥可促进小麦生长、提高小麦对养分的吸收能力、显著提高籽粒锌含量、改善锌分配并提高锌的生物利用率,喷施次数的增加能进一步改善小麦的营养品质,使食用面粉(胚乳)中的锌含量进一步增加,对改善人体膳食健康有重要意义。

关键词: 锌; 叶面喷施; 氨基酸; 锌分布; 扫描电镜能谱仪

中图分类号: S512.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)01-0027-10 doi:10.11654/jaes.2022-0598

Effects of zinc spraying on wheat grain nutritional quality and zinc distribution on the Loess Plateau

TANG Mengshan¹, LÜ Zhiyuan¹, ZHAO Xiaohan¹, GUO Jiao¹, LIU Jinshan^{1,2}, MAO Hui^{1,2*}

(1. College of Resources and Environmental Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the effects of different zinc spraying schedules on wheat yield and flour quality on the Loess Plateau, two (F2) and four (F4) occurrences of foliar spraying with ZnSO₄ at different wheat growth stages were evaluated over two years of field experiments. ZnSO₄ foliar spraying was investigated for its effects on grain zinc, starch, protein, amino acid content, grain zinc distribution, and zinc bioavailability. Spraying ZnSO₄ at different growth stages increased wheat grain Zn content, although the increase in amplitude varied with spraying schedules. Compared with the control group, the F4 treatment increased the grain zinc content of wheat by 72.3%–118.7%, and the grain zinc output by 127.3%–143.0%, which was significantly greater compared to the F2 treatment. Zinc spraying increased wheat protein and starch yields by 10.9%–25.1% and 5.1%–35.8%, respectively. The protein and amino acid contents of wheat grain were diluted in the first season but considerably rose in the second season, with methionine and phenylalanine in essential amino acids increasing by varying degrees for two consecutive years. The zinc content (weight percentage) in the embryo and endosperm treated with ZnSO₄ foliar spraying (F2, F4) was greater than that in the control treatment, but the zinc content (weight percentage) in bran was lower. Moreover, the

收稿日期: 2022-06-13 录用日期: 2022-09-29

作者简介: 唐梦珊(1999—), 女, 山西侯马人, 硕士研究生, 从事重金属土壤修复研究。E-mail: tangmengshan@nwsuaf.edu.cn

*通信作者: 毛晖 E-mail: maohui@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD190070402); 陕西省科技创新专项(2020zdzx03-02-01); 农业部岗位体系专家项目(CARS-27)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2021YFD190070402); The Special Funds for the Science and Technology Innovation of Shaanxi Province (2020zdzx03-02-01); China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-27)

P/Zn molar ratio was significantly lower in the F4 treatment than in the control. Studies have shown that spraying Zn fertilizer can promote wheat growth, improve wheat nutrient absorption capacity, significantly increase grain Zn content, and improve Zn distribution to improve Zn bioavailability. Increasing the spraying schedules can improve the nutritional quality and zinc content of edible flour (endosperm), which is essential for human dietary health.

Keywords: zinc; foliar application; amino acid; zinc distribution; scanning electron microscope spectrometer

小麦、水稻等谷物是人体矿物微量元素、能量和蛋白质的重要来源,因此,其籽粒中需要有足够的营养元素来维持人体新陈代谢^[1]。全世界近一半的耕地土壤中植物可利用的有效锌含量很低^[2]。由膳食摄入不足引起的锌缺乏是发展中国家最常见的问题之一,这会导致人体免疫功能障碍、生长迟缓和认知障碍等问题^[3]。缺锌是导致疾病和死亡的第五大成因^[4]。在全球范围内,大田中小麦籽粒锌含量普遍在 20.4~30.5 mg·kg⁻¹,这与营养学家设定的生物强化目标(40 mg·kg⁻¹)还存在巨大的差距^[5],因此迫切需要增加小麦籽粒和其他谷物中可食部分的锌含量。

遗传生物强化和农业生物强化是实现粮食作物锌强化的关键^[6]。植物育种虽然可以提供可持续的解决方案,但通常是在可控的实验室或温室中微量元素充足的条件下进行测试,而在实际缺锌情况下效果尚未可知^[7]。相比而言,田间条件下在土壤和叶面施用锌肥更有助于农作物生物强化^[8]。在我国以缺锌和潜在缺锌为主的小麦主产区中,土施锌肥并无明显提升籽粒锌含量和产量的效果^[9]。且石灰性耕层土壤中的高 pH 和高浓度碳酸钙会降低施入锌的生物有效性和植物根系对锌的吸收^[10],因此,该类型土壤中土施锌肥的利用率极低(小于 0.5),增加锌肥施用量不仅不会提高作物产量,而且会造成锌肥浪费^[11]。当锌缺乏不能通过土壤施加来缓解时,叶面喷施成为一种很好的选择^[12]。叶面喷施微量元素的时期是决定作物产量和品质的重要因素之一。Ozturk 等^[13]发现,在种子发育的早期,叶面施锌可显著提高小麦籽粒锌含量,且在灌浆前期喷施得到的籽粒锌含量最高。灌浆前期喷施 ZnSO₄ 可以增加作物对锌的吸收和累积,但不能改变锌在面粉和麸皮间的分配,大部分锌还是积累在麸皮中^[14]。籽粒在加工为食用面粉过程中损失了富含微量元素(如 Zn、Fe)的外层组织^[15],因此即使生长前期喷施锌肥能提高籽粒锌含量,但如果食用面粉的锌含量得不到提升,人体膳食健康也无法得到改善。目前迫切需要研究在小麦的各生长时期叶面施锌后籽粒中锌的生物有效性。采用合理的施肥策略以提高籽粒中锌的生物有效性对人体营养健康意义

重大。

本课题组在陕西省永寿县黄绵土壤中进行了为期两年的田间定位试验,探讨在潜在缺锌石灰性土壤上,叶面喷施不同次数的 ZnSO₄ 对小麦产量、籽粒中锌含量及营养品质的影响,并评估叶面施锌对籽粒中锌分配和潜在生物有效性的影响。本研究旨在通过农艺措施提高小麦全粒,尤其是可食部分(胚乳)锌含量,进而缓解人体缺锌状况,为喷施锌肥来改善人体膳食营养水平提供理论及实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016—2018 年在陕西省永寿县御驾宫村(34°49'N, 108°11'E)进行。试验区域属半湿润易旱区,海拔 1 127 m,年均气温 10℃,年均降水量 610 mm,7—9 月降雨量约占全年降雨量的 65%。供试土壤为黄绵土,土壤类型为潜在缺锌石灰性土壤^[16],耕层土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

本试验设置 3 个处理:①不施锌对照(CK),拔节期—孕穗期—灌浆前期—灌浆后期各喷施水一次;②2 次叶面施锌(F2),拔节期—孕穗期各施锌一次,灌浆前期—灌浆后期均喷施等量的水;③4 次叶面施锌(F4),拔节期—孕穗期—灌浆前期—灌浆后期各施锌一次。F2 和 F4 处理在小麦的各生长时期喷施次数不同,但喷施的方法与单次用量均保持一致,叶面施锌用质量分数为 0.4% 的 ZnSO₄ 溶液(浓度以 ZnSO₄ 计)在阴天或傍晚喷施于小麦冠层,以避免在烈日和高温下可能由水分蒸发引起的叶面损害,单次喷施用量为 600 L·hm⁻²,所有喷施溶液中均加入 0.01% 的吐温 20 作为表面活性剂。小区面积 16 m²(4 m×4 m),行距 20 cm,每个处理重复 4 次,共计 12 个小区,采用完全随机区组设计。第一年在农户正常播种小麦的土壤上种植,连续两年不设其他处理。基肥处理为各区施用尿素 120 kg·hm⁻²(以 N 计)和过磷酸钙 90 kg·hm⁻²(以 P₂O₅ 计)。小麦选用洛旱 6 号,播种量为 150 kg·hm⁻²。试验持续连续两个生长季,分别为 2016 年 9 月

至2017年6月和2017年9月至2018年6月,生长期间小麦的管理与当地农户的管理方法一致。

1.3 测定项目及方法

产量及构成因素:成熟期,人工收获各小区小麦,收获后谷物风干脱粒确定各处理作物的产量及生物量(用60℃干质量表示)。

籽粒锌含量:收获后的样品用蒸馏水洗3次,籽粒在60℃烘干48h,用粉碎机粉碎后过0.25mm筛,微波消解仪(PreeKem WX-800,中国上海)消解,原子吸收分光光度计(AA320CRT)测定锌含量。籽粒微量元素含量均以干质量表示。

籽粒磷、钾含量:收获后将部分籽粒制成面粉,取部分小麦面粉用H₂SO₄-H₂O₂煮沸,其中磷元素含量用AA3流量分析仪(Auto Analyzer 3-AA3,德国)测定,钾元素含量用火焰原子吸收分光光度计(PinAA-ciie 900F,美国)测定。

籽粒氮和蛋白质含量:采用半微量凯氏定氮法测定籽粒氮含量,含氮量乘以指数5.7为蛋白质含量。

籽粒淀粉含量:采用双波长分光光度法测定总淀粉含量。

氨基酸含量:取部分面粉样品用全自动氨基酸分析仪(L-8900,Hitachi,日本)测定其17种氨基酸的含量。

籽粒锌分布:用碾米机将小麦籽粒从外向内逐层脱为3层,用扫描电子显微镜(S-4800,Hitachi)观察小麦籽粒脱皮分层后的3部分,并用能谱仪进行元素分析。

收获指数=产量(kg·hm⁻²)/生物量(kg·hm⁻²)×100%。

籽粒锌提高指数[(mg·kg⁻¹)·(kg·hm⁻²)⁻¹]=[施锌处理籽粒锌含量(mg·kg⁻¹)-不施锌处理籽粒锌含量(mg·kg⁻¹)]/施锌量(kg·hm⁻²)^[17]。

籽粒锌利用率=[施锌处理籽粒锌累积量(g·hm⁻²)-不施锌处理籽粒锌累积量(g·hm⁻²)]/施锌量(g·hm⁻²)×100%。

总锌利用率=[施锌处理地上部锌累积量(g·hm⁻²)-不施锌处理地上部锌累积量(g·hm⁻²)]/施锌量(g·hm⁻²)×100%。

籽粒锌携出量(g·hm⁻²)=籽粒干质量(kg·hm⁻²)×籽粒锌含量(mg·kg⁻¹)/1 000^[18]。

籽粒养分的吸收量(g·hm⁻²)=籽粒产量(kg·hm⁻²)×籽粒锌含量(mg·kg⁻¹)/1 000^[19]。

1.4 数据分析

利用SPSS 26.0、Excel 2010等软件进行数据的统计分析和相关性分析,采用Origin 9.8绘图。均值之间的多重比较采用最小显著差数法(LSD,差异显著性水平为P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同喷锌次数对小麦产量以及收获指数的影响

由表2可知,在第一季试验中,F2和F4处理的小麦产量和生物量均较CK处理显著提高,且两者之间没有显著差异。相较于CK处理,F2和F4处理的籽粒产量分别增加25.0%和31.4%,生物量分别增加51.9%和42.9%。F2和F4处理的收获指数分别为44%和49%。第二生长季中,不同喷锌处理小麦籽粒产量有所提升,但未达到显著水平。F2和F4处理的

表1 耕层土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of topsoil soil

有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	DTPA-Zn/ (mg·kg ⁻¹)	DTPA-Fe/ (mg·kg ⁻¹)	DTPA-Mn/ (mg·kg ⁻¹)	pH
15.50	1.04	18.80	154.50	0.58	2.79	7.08	8.5

表2 不同喷锌次数对小麦产量以及生长指数的影响
Table 2 Effects of different zinc spraying times on wheat yield and growth index

处理 Treatment	2017年			2018年		
	产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)	生物量 Biomass/(kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index/%	产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)	生物量 Biomass/(kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index/%
CK	4 242b	7 995b	53a	4 420a	9 183b	48a
F2	5 303a	12 141a	44a	4 685a	10 423b	45a
F4	5 576a	11 421a	49a	4 914a	12 703a	39a

注:数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letters of data indicate significant differences among treatments in the same year (P<0.05). The same below.

小麦籽粒产量分别较CK处理增加6.0%和11.2%,生物量分别增加13.5%和38.3%。F2和F4处理的收获指数分别为45%和39%。第二季各指标的增幅明显低于第一季。

2.2 不同喷锌次数对小麦籽粒锌含量及携出量的影响

由图1可知,两季试验中F2和F4处理均可显著提高冬小麦籽粒中锌含量,且F4处理的籽粒锌含量和携出量显著高于F2处理。在第一生长季,F2和F4处理的小麦籽粒锌含量分别为 $30.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $41.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较CK处理提高了25.6%和72.3%;籽粒锌携出量较CK处理分别提高了57.6%和127.3%。第二生长季中,F2和F4处理的小麦籽粒锌含量分别为 $27.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $38.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与CK处理相比分别增加56.8%和118.7%,籽粒锌携出量较CK处理分别增加65.4%和143.0%。第二季冬小麦籽粒锌携出量的增长幅度较上一年均有所上升。

2.3 不同喷锌次数对小麦锌肥利用效率的影响

在小麦不同生长期2次和4次叶面施锌的研究(表3)表明,F4处理的籽粒锌提高指数、籽粒锌利用率以及总锌利用率均显著高于F2处理。两季试验中F2和F4处理的平均籽粒锌提高指数分别为3.37

$(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})^{-1}$ 和 $8.00 (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})^{-1}$ 。F4处理的籽粒锌利用率达到4.64%~5.44%,总锌利用率达到15.18%~21.25%。

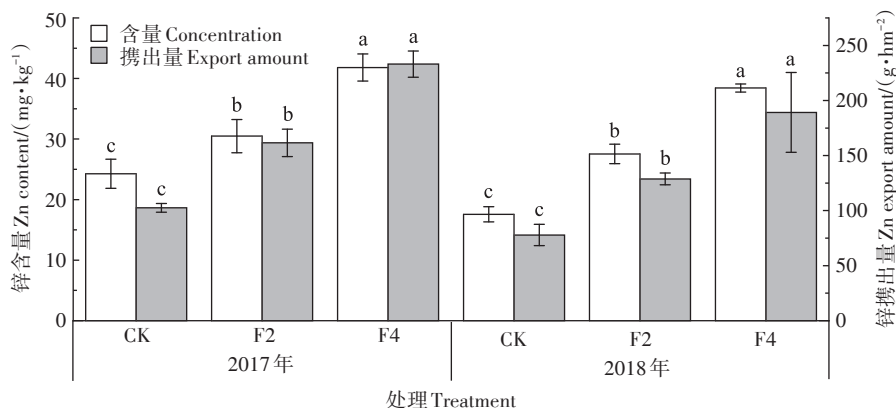
2.4 不同喷锌次数对小麦营养品质的影响

2.4.1 对小麦籽粒淀粉含量和携出量的影响

由图2可知,在两季试验中不同施锌处理对小麦籽粒淀粉含量均无显著影响,且第二季小麦中F2处理比CK处理的籽粒淀粉含量低0.8%。但是由于施锌提高了籽粒产量,在淀粉携出量方面,施加锌肥提高了籽粒淀粉携出量,与CK处理相比,第一季中F2和F4处理显著提升25.5%和35.8%,第二季中F2和F4处理分别提高5.1%和12.4%。

2.4.2 对小麦籽粒蛋白质含量和携出量的影响

在本试验中,用SPSS计算籽粒蛋白质含量和产量之间的相关系数分别为 $R_{2017}=-0.794 (P=0.011)$ 、 $R_{2018}=0.998 (P=0.036)$ 。第一生长季中小麦籽粒的蛋白质含量与产量呈负相关,两种喷锌处理均显著降低了籽粒蛋白质含量;第二生长季表现为正相关,喷施叶面锌使籽粒蛋白质含量显著提高。如图3所示,与CK处理相比,F2和F4处理的第一季小麦籽粒蛋白质含量均显著降低,分别降低11.2%和10.3%;而第二季



不同小写字母表示同一年份不同处理之间的差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same year ($P<0.05$). The same below

图1 不同喷锌次数对冬小麦籽粒锌含量和携出量的影响

Figure 1 Effects of different times of zinc spraying on zinc content and carry-out of winter wheat grains

表3 不同喷锌次数对小麦地上部锌累积量和锌收获指数的影响

Table 3 Effects of different spraying times of zinc on zinc accumulation and zinc harvest index in wheat shoots

处理 Treatment	2017年			2018年		
	籽粒锌提高指数 Zn increase index/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})^{-1}$	籽粒锌利用率 Grain Zn utilization efficiency/%	总锌利用率 Total Zn utilization efficiency/%	籽粒锌提高指数 Zn increase index/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})^{-1}$	籽粒锌利用率 Grain Zn utilization efficiency/%	总锌利用率 Total Zn utilization efficiency/%
F2	2.59b	2.45b	9.25b	4.15b	2.12b	6.89b
F4	7.31a	5.44a	21.25a	8.68a	4.64a	15.18a

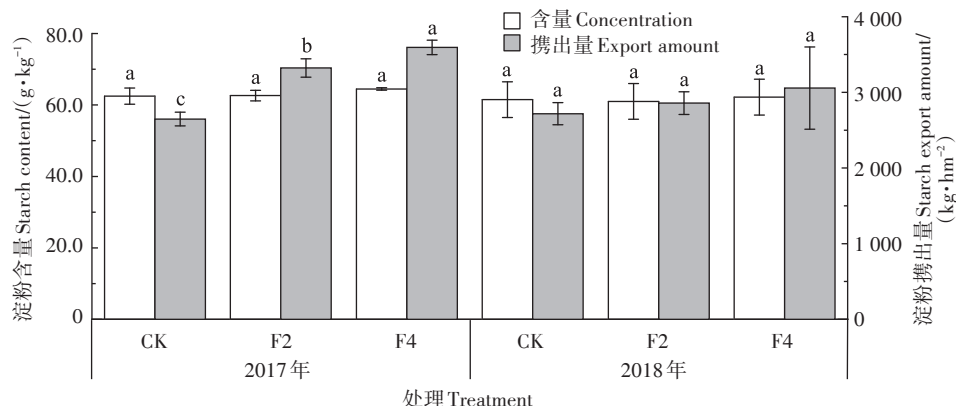


图2 不同喷锌次数对冬小麦籽粒淀粉含量和携出量的影响

Figure 2 Effects of different times of zinc spraying on starch content and carry-out of winter wheat grains

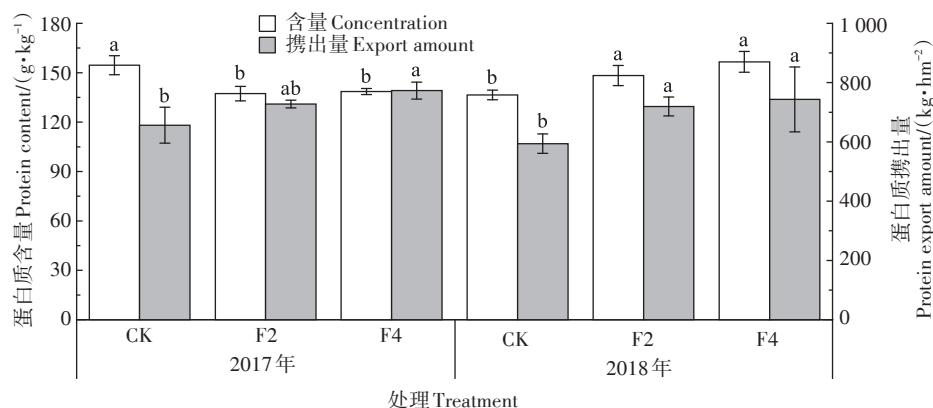


图3 不同喷锌次数对冬小麦籽粒蛋白质含量和携出量的影响

Figure 3 Effects of different times of zinc spraying on protein content and carry-out of winter wheat grains

F2和F4处理的籽粒蛋白质含量显著增加,提升幅度分别为8.6%和14.7%。由于两个生长季中喷锌处理均提升了小麦的产量,在籽粒蛋白质携出量方面,与CK处理相比,第一季中F2和F4处理提升幅度分别为10.9%和17.8%,第二季中F2和F4处理显著提高21.1%和25.1%。

2.4.3 对小麦籽粒氨基酸含量的影响

氨基酸是构成蛋白质的基本单位,氨基酸的含量和比例直接影响小麦蛋白质的营养价值。如表4所示,第一生长季中,F2和F4处理的氨基酸总量较CK处理显著降低11.4%和18.2%,其必需氨基酸含量变化较小,非必需氨基酸含量随喷施 ZnSO_4 次数提高而显著降低,F2和F4处理分别下降14.2%和20.0%;只有蛋氨酸和苯丙氨酸含量相对于CK处理显著升高,其他氨基酸含量均有不同程度的下降。第二生长季中,F2和F4处理的氨基酸总量及测定的17种氨基酸含量均高于CK处理,氨基酸总量显著提高10.6%和

8.9%。在必需氨基酸中,蛋氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸相较于CK处理均有显著提高,其中蛋氨酸增幅最大,F2和F4处理相较于CK处理分别提升125.0%和50.0%,其他氨基酸含量也有不同程度的提升,但未达显著水平。在非必需氨基酸中,脯氨酸和酪氨酸含量都有显著提高,其中酪氨酸的提升幅度最大,F2和F4处理相较于CK处理提高幅度分别为48.4%和12.9%。在第一生长季,CK、F2和F4处理的小麦总氨基酸携出量分别为668.1、739.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和718.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,第二生长季分别为652.8、765.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和790.6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与氨基酸含量的变化不同,由于喷施锌肥引起的产量提高,总氨基酸的携出量均增加,第一生长季中F2和F4处理较CK处理提高10.7%和7.6%,第二生长季中F2和F4处理显著提高17.3%和21.1%。

2.5 不同喷锌次数对小麦籽粒氮磷钾微量元素的影响

由表5可知,在两年试验中,F4处理均使籽粒磷

表4 小麦籽粒中各种氨基酸的含量(mg·g⁻¹)

Table 4 The content of various amino acids in wheat grains(mg·g⁻¹)

项目 Item	2017年			2018年		
	CK	F2	F4	CK	F2	F4
苏氨酸 Threonine	4.2a	4.1a	3.6b	4.1a	4.3a	4.3a
缬氨酸 Valine	6.9a	6.5a	5.3a	5.8a	6.1a	6.1a
蛋氨酸 Methionine	0.5b	0.8a	0.8a	0.8b	1.8a	1.2a
异亮氨酸 Isoleucine	5.4a	4.4a	4.2a	4.5a	5.0a	4.8a
亮氨酸 Leucine	8.7a	7.8a	8.3a	8.7b	9.7a	9.3a
苯丙氨酸 Phenylalanine	1.8b	5.7a	5.2a	5.8b	8.0a	6.3b
赖氨酸 Lysine	6.7a	4.2ab	3.3b	3.9a	4.2a	4.1a
天冬氨酸 Aspartic acid	7.8a	6.8b	6.1b	7.2a	7.7a	7.8a
丝氨酸 Serine	5.9a	5.8a	5.6a	6.4a	6.7a	6.8a
谷氨酸 Glutamic acid	45.6a	39.6b	38.5b	45.4a	49.3a	49.8a
脯氨酸 Proline	30.4a	27.7b	24.7c	29.4b	32.0a	32.9a
甘氨酸 Glycine	6.3a	5.4b	5.0b	5.4a	5.6a	5.6a
丙氨酸 Alanine	7.4a	4.8b	4.5b	5.1a	5.3a	5.4a
胱氨酸 Cystine	2.5a	2.3ab	2.1b	2.0a	2.3a	2.3a
酪氨酸 Tyrosine	5.4a	3.0b	3.0b	3.1b	4.6a	3.5b
组氨酸 Histidine	4.3a	3.9b	3.0b	3.5a	3.7a	3.7a
精氨酸 Arginine	7.7a	6.7a	5.7b	6.6a	7.1a	7.0a
TA	157.5a	139.5b	128.9b	147.7b	163.4a	160.9a
EA	38.5a	37.4a	33.7a	37.1a	42.8a	39.8a
NEA	119.0a	102.1b	95.2c	110.6b	120.6a	121.1a

注:TA 表示氨基酸总量;EA 表示必需氨基酸;NEA 表示非必需氨基酸。

Note: TA indicates total amino acid; EA indicates essential amino acid; NEA indicates non-essential amino acid.

含量显著下降,与CK处理相比,籽粒磷含量在第一生长季降低10.3%,第二生长季降低7.6%;F2处理籽粒磷含量变化较小。第一生长季中,籽粒钾含量变化较小,F2和F4处理籽粒氮含量分别显著下降11.2%和10.3%。第二生长季中,F2和F4处理籽粒氮含量分别显著增加8.6%和14.7%,籽粒钾含量分别显著降低24.5%和26.2%。两年的试验表明,不同喷锌次数(F2和F4)处理均显著降低籽粒磷/锌摩尔比,在第一生长季中,较CK处理分别降低18.4%和47.9%,在第二生长季中分别降低36.8%和57.8%,可以看出叶面施加ZnSO₄可以有效提高籽粒锌的生物利用率。

表5 小麦籽粒中氮、磷、钾含量以及磷锌摩尔比

Table 5 Nitrogen, phosphorus, potassium content and phosphorus-zinc molar ratio in harvested wheat grains

处理 Treatment	2017年				2018年			
	N/(g·kg ⁻¹)	P/(g·kg ⁻¹)	K/(g·kg ⁻¹)	P/Zn	N/(g·kg ⁻¹)	P/(g·kg ⁻¹)	K/(g·kg ⁻¹)	P/Zn
CK	27.11a	4.00a	2.44a	345.91a	23.95b	4.19a	2.94a	500.45a
F2	24.09b	4.10a	2.51a	282.26b	26.02a	4.15a	2.22b	316.20b
F4	24.32b	3.59b	2.61a	180.19c	27.48a	3.87b	2.17b	211.36c

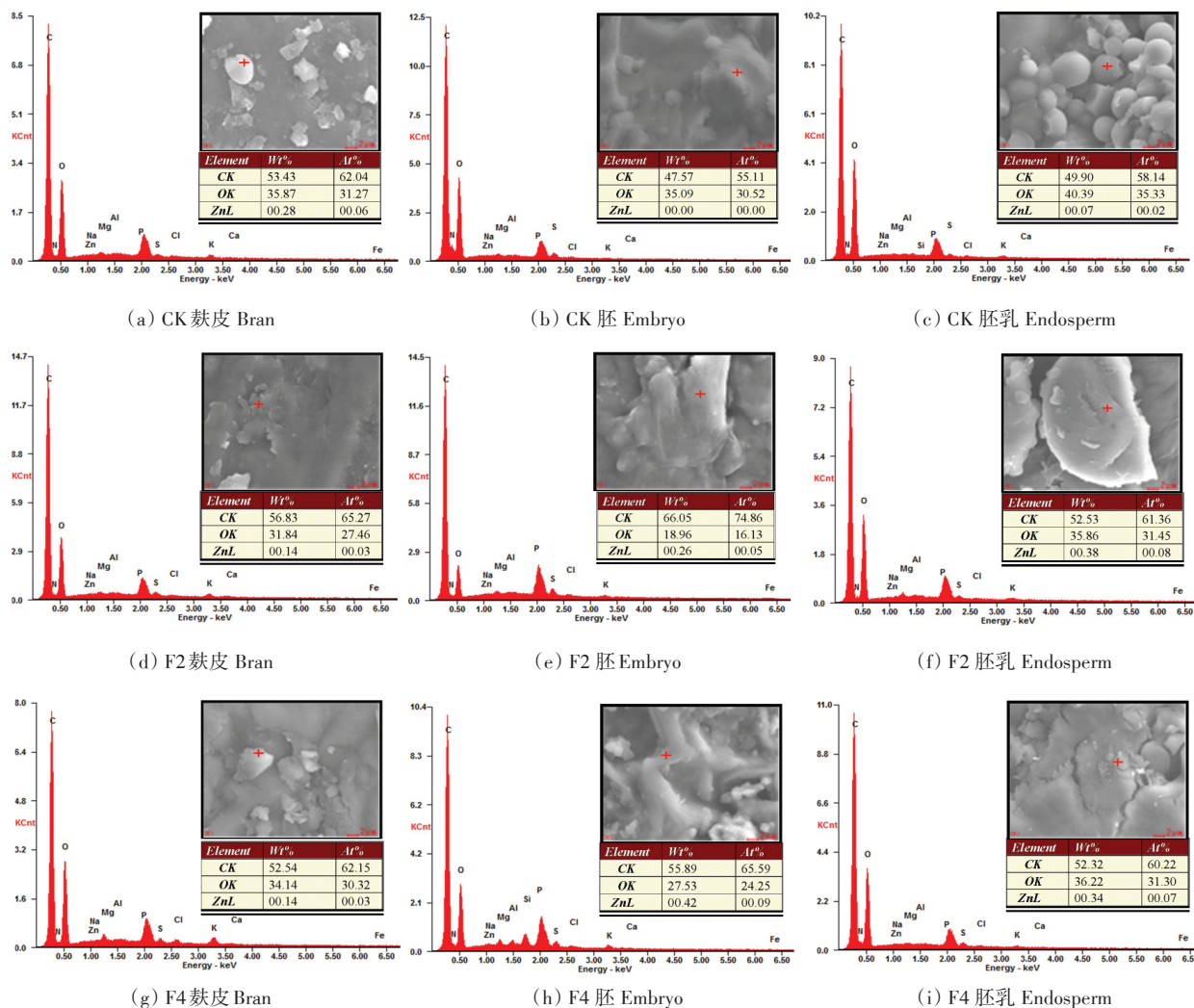
2.6 不同喷锌次数对小麦籽粒锌分布的影响

图4是扫描电子显微镜下小麦籽粒剥离组分——麸皮、胚和胚乳的图像,对应的元素含量分布图是在这个区域用能谱仪随机取点得到的能谱扫描图。每个处理用能谱仪在对应的区域取3个点做能元素含量分析。叶面喷施ZnSO₄可以有效提高胚、胚乳部分的锌含量(质量百分比,下同),从图中可以看出,CK处理中麸皮锌含量较高,而胚和胚乳中锌含量极少;F2处理中,麸皮、胚对应点锌含量接近;F4处理下,胚和胚乳的锌含量高于麸皮对应点的锌含量。F2和F4处理均降低了小麦籽粒麸皮中的锌含量,有效提升了胚和胚乳中的锌含量,改善了籽粒锌分配。

3 讨论

3.1 不同喷锌次数对小麦农艺性状和籽粒富锌效果的影响

研究表明,在缺锌地区(DTPA-Zn<0.5 mg·kg⁻¹)施用锌肥可以有效改善小麦作物的缺锌症状^[20]。本试验土壤的有效锌含量为0.58 mg·kg⁻¹(介于0.5~1.0 mg·kg⁻¹),属于潜在缺锌土壤,在小麦的不同生长期2次和4次叶面喷施锌肥均显著提高了籽粒产量,这一结果与安徽蒙城缺锌土壤(DTPA-Zn为0.48 mg·kg⁻¹)中籽粒产量对叶面施锌的响应相似^[21]。有研究表明锌参与了小麦叶绿素及淀粉合成等重要的生理过程,并且增加了籽粒中同化物的累积,从而提高了籽粒产量^[22]。叶面施锌对籽粒产量的提高程度还取决于喷施ZnSO₄的浓度,喷施浓度过低(0.1%,m:V)不会增加小麦产量^[23],浓度过高(0.5%,m:V)则会损伤叶面,降低产量^[24],喷锌的浓度对作物生长有很大影响。试验的两年中,喷施次数(F2和F4)对籽粒产量无显著影响(表2),F4处理的后两次喷施未能使产量显著高于F2处理。在同一区域,李孟华等^[25]在抽穗和开花后两次喷施处理也未出现明显的增产趋势,这可能是因为小麦生长后期外施锌对籽粒质量作用较小。综上,推测小麦生物量累积阶段的主要时期在拔节期和孕穗期,具体的机理有待进一步研究。



Wt表示质量百分比;At表示原子百分比

Wt means weight percentage; At means atomic percentage

图4 扫描电子显微镜下小麦籽粒组分的图像以及对应点的能谱扫描图

Figure 4 Scanning electron microscope images of wheat grain components and energy spectrum scans of corresponding points

锌在作物韧皮部的移动性很强^[26],叶面喷施的锌可以被叶面表皮吸收,然后通过木质部和韧皮部运输到植物的其他部位。虽然F2处理也可以显著提高籽粒锌含量和携出量,但F4处理的籽粒锌含量最高,显著高于F2处理(图1)。这可能是因为作物生长期后期锌的运输更快,也可能是因为4次叶面喷施锌肥的累积施用量更大,导致小麦营养器官中锌累积更多。F4处理时,两季试验中籽粒锌含量分别为 $41.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $38.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,第一生长季已达到人体健康籽粒锌目标含量。陕西省永寿县养马庄(土壤DTPA-Zn为 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的试验也得到了相似的结果^[27],在拔节期和灌浆初期叶喷+土施锌肥使小麦籽粒锌含量提高到 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。从营养组织向籽粒迁移是锌在籽粒中积累的重要途径。有研究认为,由于

NAM-B1转录因子的作用,衰老叶片组织中锌的再动员对小麦籽粒中锌的积累起着关键作用^[28]。猜测叶面喷施的时期是籽粒锌含量提高的关键因素。Li等^[29]认为在灌浆初期施加叶面锌肥可以使小麦营养组织中的锌转运回籽粒中,从而生产出高品质的小麦。Cakmak等^[30]的研究表明,与早期施锌相比,在小麦生长后期叶面喷施锌肥可显著提高籽粒锌含量。由于叶面施锌会提高籽粒的产量(表2),籽粒锌携出量的增幅明显高于锌含量的变化。

总体而言,F4处理对籽粒锌提高指数、籽粒锌利用率以及总锌利用率的影响明显高于张腾等^[31]在同一区域的土施锌肥的结果。杨月娥等^[32]在全国31个试验站的研究也得到了类似的结果,在 $\text{pH}>7$ 的试验田,籽粒锌利用率均值为3.2%,总锌利用率均值为

8.0%。本试验F4处理的参数值高于其试验的平均结果,说明4次喷施锌肥是更有效地提高谷物籽粒锌含量和吸收量的途径。在小麦的生长发育阶段,向营养组织中施加锌(如叶面喷施 ZnSO_4)可以促进籽粒锌的积累,提高籽粒锌含量,是缓解人体锌缺乏的一种很好的方式,提升谷物营养物质质量对人类的健康和幸福有重大影响。

3.2 不同喷锌次数对小麦品质的影响

作为小麦籽粒中最主要的成分,淀粉约占面粉含量的75%,是评价小麦品质的重要指标^[33]。试验结果表明,不同喷锌次数对小麦籽粒淀粉含量影响较小(图2),但是由于产量的提升,在小麦的不同生长期喷施锌肥处理均使小麦籽粒淀粉携出量高于CK处理。不同的是,张洁梅^[34]的试验结果显示,喷施锌肥会使总淀粉含量显著提高,并且认为生长后期施锌对小麦籽粒淀粉含量有显著影响。这可能因为施锌对不同品种的小麦影响有差异。总体而言,在叶面喷施锌肥无法显著提升籽粒淀粉含量,但是可以通过增产来提高淀粉总携出量,优化小麦品质。

在第一季试验中虽然F2和F4处理的籽粒蛋白质携出量高于CK处理10.9%和17.8%。小麦产量却显著高出CK处理25.0%和31.4%,第一季中产量的稀释效应导致籽粒蛋白质含量降低。由于第二生长季产量的提升幅度小于第一生长季,其稀释现象也得到了改善。在第二生长季,F2和F4处理的冬小麦籽粒中蛋白质含量和携出量均显著高于CK处理。徐立新等^[35]也得到了类似的结果,在灌浆前期喷锌对籽粒蛋白质含量的提高未达到显著水平。Pallavi等^[36]则认为在灌浆前期喷锌会增加籽粒中同化物的积累,从而提高谷物中蛋白质含量。而蛋白质作为小麦籽粒及面粉的主要组成成分之一,其含量增加说明改善了面粉的营养及加工特性^[37],同时蛋白质含量的增加可以提高人体对锌的吸收^[38],因而在小麦各生长期喷施锌肥的意义是可以肯定的。

氨基酸作为小麦籽粒营养品质的重要指标,其含量对人体健康意义重大。在本次试验中,因年限不同,喷锌处理对小麦籽粒氨基酸含量的影响存在差异。第一试验季中F2和F4处理的籽粒氨基酸携出量显著高出CK处理10.7%和7.6%,但小麦产量高出CK处理25.0%和31.4%。由此可见,第一年产量大幅提升,稀释效应导致籽粒氨基酸总量降低。但必需氨基酸中蛋氨酸和苯丙氨酸均出现不同程度的提高(表4)。尤其是在第二年的试验中,必需氨基酸的含量均

高于CK处理,并且两年试验不同处理的总锌携出量均显著提高,这与石孝均等^[39]的研究结果相似,说明喷施锌肥能提高小麦籽粒中人体必需氨基酸的含量,对人体健康有良好的生物学意义。也有研究认为,在缺锌土壤中施锌肥提高了小麦籽粒的含氮量和17种氨基酸的含量,因此可以提高小麦品质^[40]。可见,在潜在性缺锌土壤上喷施锌肥使小麦籽粒各组分氨基酸含量均有提升,但是喷施次数的影响不显著,这与氮含量变化基本一致。

3.3 不同喷锌次数对籽粒中锌分配及生物利用率的影响

在CK处理小麦植株中,谷物最外层的麸皮中锌含量高于胚和胚乳中的含量(质量百分比,图4),这与前人的研究结果基本一致^[13],小麦籽粒的锌都集中在麸皮上。胚乳作为小麦籽粒的重要组成,因含有大量的蛋白质和淀粉而被分取出来制成面粉,但其锌含量较低,在加工成面粉的过程中,锌含量最高的麸皮大部分都会被损耗^[41],导致人类食用的面粉中锌含量锐减。因此增加胚乳中的锌含量才能有效缓解人体可利用锌缺乏的现象。喷施 ZnSO_4 处理一方面显著提高了全粒中锌含量;另一方面也改善了籽粒中锌在碾磨组分中的分配,随着喷施次数的提升,胚乳中的锌含量占全粒锌的份额也逐渐增加。在F4处理中,胚乳中的锌含量较CK处理已经有了很大的提高,可能是因为叶面喷施 ZnSO_4 促进了锌从麸皮到面粉的运输。Cakmak等^[30]认为锌可以通过折痕韧皮部运输到胚乳中,对韧皮部在叶面施锌后将锌输送到胚乳中起着重要作用。根据Pearson等^[42]的说法,随着籽粒的成熟,锌向胚乳的运输会增加,这也表明在小麦生长后期叶面施加锌肥可以更大幅度地增加胚乳中的锌积累,有效提高面粉锌含量。

确定植物食品中微量元素的生物利用率在研究中非常重要,除了籽粒中锌的分布以外,锌与其他元素的共存也影响着籽粒中锌的生物有效性。研究表明,人体内没有植酸酶,导致籽粒中的锌以植酸锌的形式降低^[43]。植酸是谷物中一种重要的磷储存化合物,植酸与锌的摩尔比被认为是生物有效性的预测因子,植酸占谷物总磷的60%~80%,并且与总磷含量呈正相关^[44]。因此在本研究中,用总磷代替植酸(PA)计算磷和锌的摩尔比,以此预测小麦籽粒锌的生物有效性。Marschner等^[45]认为,小麦籽粒中植酸浓度的降低可能是施锌影响了磷的吸收转运和代谢。本试验中,叶面施锌显著降低了籽粒中的磷和锌的摩尔比

(表5)。Hussain等^[46]在拔节期和抽穗期叶面喷施质量分数为0.5%的 ZnSO_4 也得到了类似的结果,即显著降低了植酸和锌的摩尔比。

4 结论

(1)在黄土高原潜在缺锌区域,于小麦不同生长期2次和4次施锌对籽粒产量和锌含量均有提升作用。在小麦锌肥利用率方面,4次施锌处理的籽粒锌强化指数、籽粒锌利用率及总锌利用率都高于2次施锌处理。

(2)在冬小麦不同生长期2次和4次施锌对改善籽粒品质有显著促进作用。提高了籽粒淀粉携出量,第一生长季中籽粒蛋白质和氨基酸发生稀释效应,但其携出量显著高于不施锌的对照处理。第二季试验中,籽粒蛋白质和总氨基酸含量均显著提高,各组分氨基酸含量也有不同程度的提高。

(3)在小麦不同生长期2次和4次喷施 ZnSO_4 能改善锌在小麦籽粒中的分布,使麸皮中的锌含量(质量百分比)低于胚和胚乳中锌含量,提升了人体可食用部位的锌含量;并且显著降低了磷和锌的摩尔比,有效提高了籽粒锌的生物利用率。

参考文献:

- [1] WATTS-WILLIAMS S J, GILBERT S E. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the concentration and distribution of nutrients in the grain differently in barley compared with wheat[J]. *Plants, People, Planet*, 2021, 3(5):567-577.
- [2] ÇAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2):1-17.
- [3] PRASAD A S. Impact of the discovery of human zinc deficiency on health[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2009, 28(3):257-265.
- [4] NOULAS C, TZIOUVALEKAS M, KARYOTIS T. Zinc in soils, water and food crops[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2018, 49:252-260.
- [5] 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):1-8.
- [6] ABDOLI M, ESFANDIARI E, MOUSAVI S B, et al. Effects of foliar application of zinc sulfate at different phenological stages on yield formation and grain zinc content of bread wheat (cv. Kohdasht)[J]. *Azarian Journal of Agriculture*, 2014, 1(1):11-16.
- [7] ÇAKMAK I, KUTMAN U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1):172-180.
- [8] VELU G, ORTIZ-MONASTERIO I, ÇAKMAK I, et al. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(3):365-372.
- [9] ZHAO A Q, TIAN X H, CAO Y X, et al. Comparison of soil and foliar zinc application for enhancing grain zinc content of wheat when grown on potentially zinc-deficient calcareous soils[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(10):2016-2022.
- [10] KHOSHGOFTARMANESH A H, AFYUNI M, NOROUZI M, et al. Fractionation and bioavailability of zinc (Zn) in the rhizosphere of two wheat cultivars with different Zn deficiency tolerance[J]. *Geoderma*, 2018, 309:1-6.
- [11] SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ A R, MARÍN-PAREDES M, GONZÁLEZ-GUZMÁN A, et al. Zinc biofortification strategies for wheat grown on calcareous Vertisols in southern Spain: Application method and rate[J]. *Plant and Soil*, 2021, 462(1):125-140.
- [12] SARKAR D, MANDAL B, KUNDU M C. Increasing use efficiency of boron fertilisers by rescheduling the time and methods of application for crops in India[J]. *Plant and Soil*, 2007, 301(1):77-85.
- [13] ÖZTURK L, YAZICI M A, YUCELC C, et al. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat[J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 128(1):144-152.
- [14] 李萌. 锌与氮磷钾肥配合喷施对小麦籽粒及其加工产品锌营养品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016. LI M. Effects of spraying zinc with nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on zinc nutrition quality of wheat kernel and its processing products[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [15] KUTMAN U B, YILDIZ B, ÇAKMAK I. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 53(1):118-125.
- [16] 孙宏达, 钟民正, 张腾, 等. 黄土高原潜在缺锌区施用纳米氧化锌(ZnO NPs)对冬小麦生长及籽粒品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9):2041-2048. SUN H D, ZHONG M Z, ZHANG T, et al. Effects of ZnO NPs application on winter wheat growth and grain quality in a potentially zinc-deficient area of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9):2041-2048.
- [17] 李孟华. 冬小麦对锌肥及土壤水分的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013:20-21. LI M H. Response of winter wheat to zinc fertilizer and soil moisture[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013:20-21.
- [18] 陈娟, 王少霞, 田霄鸿, 等. 锌与农药配合喷施对小麦锌累积分配及转移的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(3):67-76. CHEN J, WANG S X, TIAN X H, et al. Effect of combined foliar application of zinc and pesticides on accumulation, distribution and transfer of zinc in wheat[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2019, 47(3):67-76.
- [19] 王丽, 王朝辉, 郭子糠, 等. 黄土高原不同地点小麦籽粒矿质元素的含量差异[J]. 中国农业科学, 2020, 53(17):3527-3540. WANG L, WANG Z H, GUO Z K, et al. Differences of main nutrient concentration in wheat grain between typical locations of the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(17):3527-3540.
- [20] ZHAO A, WANG B, TIAN X, et al. Combined soil and foliar ZnSO_4 application improves wheat grain Zn concentration and Zn fractions in a calcareous soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(4):681-694.
- [21] 张文凯. 叶面喷施锌肥对小麦产量和效益的影响[J]. 河北农业科学, 2008, 12(3):89-90. ZHANG W K. Effects of foliar application

- of zinc fertilizer on wheat yield and benefits[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, 12(3): 89–90.
- [22] KUMAR M, KUMAR R, SHARMA S K, et al. The effect of Zn in the form of soil application alone and in combination of foliar spray at different growth stages on growth and dry matter yield of wheat[J]. *The Pharma Innovation Journal*, 2021, 10(3): 639–641.
- [23] 张庆, 贾一磊, 杨连新, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4): 728–736. ZHANG Q, JIA Y L, YANG L X, et al. Impacts of elevated ozone concentration and foliar application on yield, grain zinc content and bioavailability of wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 728–736.
- [24] ZHANG Y Q, SUN Y X, YE Y L, et al. Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 125: 1–7.
- [25] 李孟华, 王朝辉, 李强, 等. 低锌旱地土施锌肥对小麦产量和锌利用的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(11): 2168–2174. LI M H, WANG Z H, LI Q, et al. Effects of zinc fertilizer application on wheat yield and zinc utilization in low-zinc dry land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2168–2174.
- [26] HASLETT B S, REID R J, RENGEL Z. Zinc mobility in wheat: Uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots[J]. *Annals of Botany*, 2001, 87(3): 379–386.
- [27] 李孟华, 王朝辉, 王建伟, 等. 低锌旱地施锌方式对小麦产量和锌利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1346–1355. LI M H, WANG Z H, WANG J W, et al. Effects of zinc application methods on wheat yield and zinc utilization in low-zinc dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1346–1355.
- [28] UAUY C, DISTELFELD A, FAHIMA T, et al. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat[J]. *Science*, 2006, 314(5803): 1298–1301.
- [29] LI M, YANG X W, TIAN X H, et al. Effect of nitrogen fertilizer and foliar zinc application at different growth stages on zinc translocation and utilization efficiency in winter wheat[J]. *Cereal Research Communications*, 2014, 42(1): 81–90.
- [30] 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.
- [31] 张腾, 崔利利, 刘艳妮, 等. 施用纳米氧化锌对小麦籽粒锌含量和锌利用率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 7–14. ZHANG T, CUI L L, LIU Y N, et al. Effect of application of nanometer zinc oxide on zinc content and zinc utilization rate of wheat grain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4): 7–14.
- [32] 杨月娥, 王森, 王朝辉, 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 zinc content in wheat grains to leaf spraying zinc fertilizer in main wheat regions of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3): 579–589.
- [33] LI H, MA Y, PAN Y L, et al. Starch other than gluten may make a dominant contribution to wheat dough mixing properties: A case study on two near-isogenic lines[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 152: 112413.
- [34] 张洁梅. 喷施锌肥对小麦不同穗位粒粒锌的积累及品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014. ZHANG J M. Effects of spraying zinc fertilizer on zinc accumulation and quality in different ears of wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [35] 徐立新, 赵会杰, 郭占玲, 等. 灌浆期喷施钼、锌、镁肥对小麦品质的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2003, 37(3): 217–218. XU L X, ZHAO H J, GUO Z L, et al. Effect of spraying molybdenum, zinc and magnesium fertilizer on wheat quality during grain filling stage[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2003, 37(3): 217–218.
- [36] PALLAVI V, SUDHA T. Effect of soil and foliar application of zinc and iron on productivity and quality of wheat[J]. *Journal of Farm Sciences*, 2017, 30(1): 49–51.
- [37] CAPPELLI A, MUGNAINI M, CINI E. Improving roller milling technology using the break, sizing, and reduction systems for flour differentiation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 133: 110067.
- [38] LONNERDAL B. Dietary factors influencing zinc absorption[J]. *The Journal of Nutrition*, 2000, 130(5): 1378–1383.
- [39] 石孝均, 毛知耘, 周则芳. 锌、锰与含氮氮肥配施对冬小麦籽粒营养品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(2): 160–168. SHI X J, MAO Z Y, ZHOU Z F. Effects of combined application of zinc, manganese and chloride-containing nitrogen fertilizer on nutritional quality of winter wheat grains[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1997, 3(2): 160–168.
- [40] 周伟. 不同施锌方法对小麦含锌量及产量影响的研究[J]. *中国生态农业学报*, 1995, 3(1): 34–38. ZHOU W. Impacts of applying zinc with different methods on zinc content and yield of wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 1995, 3(1): 34–38.
- [41] 赵爱青. 外源锌对潜在缺锌石灰性土壤中锌扩散、迁移、转化、作物吸收的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. ZHAO A Q. Effects of exogenous zinc on zinc diffusion, migration, transformation and crop absorption in potential zinc-deficient and calcareous soils[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [42] PEARSON J N, RENGEL Z, JENNER C F, et al. Dynamics of zinc and manganese movement in developing wheat grains[J]. *Functional Plant Biology*, 1998, 25(2): 139–144.
- [43] NOLAN K B, DUFFIN P A, MCWEENY D J. Effects of phytate on mineral bioavailability: In vitro studies on Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} (also Cd^{2+}) solubilities in the presence of phytate[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1987, 40(1): 79–85.
- [44] TANG J, ZOU C, HE Z, et al. Mineral element distributions in milling fractions of Chinese wheats[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(3): 821–828.
- [45] MARSCHNER H, CAKMAK I. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. II. Evidence for impaired shoot control of phosphorus uptake and translocation under zinc deficiency[J]. *Physiologia Plantarum*, 1986, 68(3): 491–496.
- [46] HUSSAIN S, MAQSOOD M A, RENGEL Z, et al. Biofortification and estimated human bioavailability of zinc in wheat grains as influenced by methods of zinc application[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1): 279–290.

(责任编辑:朱晓昱)