

不同锌源叶面喷施对冬小麦和夏玉米产量及籽粒营养品质的影响

颜为, 孙金鞭, 吕洪国, 黄萌, 王志伟, 齐世军, 崔振岭, 薛艳芳, 刘开昌

引用本文:

颜为, 孙金鞭, 吕洪国, 黄萌, 王志伟, 齐世军, 崔振岭, 薛艳芳, 刘开昌. 不同锌源叶面喷施对冬小麦和夏玉米产量及籽粒营养品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 504–515.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0507>

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>

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>

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>

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>

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

颜为, 孙金鞭, 吕洪国, 等. 不同锌源叶面喷施对冬小麦和夏玉米产量及籽粒营养品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 504–515.

YAN W, SUN J B, LÜ H G, et al. Effects of foliar applications of fertilizers containing different zinc sources on grain yield and grain nutritional quality of winter wheat and summer maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 504–515.



开放科学 OSID

不同锌源叶面喷施对冬小麦和夏玉米产量及籽粒营养品质的影响

颜为¹, 孙金鞭^{1,2}, 吕洪国³, 黄萌¹, 王志伟³, 齐世军¹, 崔振岭⁴, 薛艳芳^{1,2*}, 刘开昌^{1*}

(1. 山东省农业科学院玉米研究所/小麦玉米国家工程研究中心/农业部黄淮海北部玉米生物学与遗传育种重点实验室, 济南 250100; 2. 聊城大学农学院, 山东 聊城 252000; 3. 招远市农业农村局, 山东 招远 265400; 4. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:为探明不同锌源叶面肥喷施对小麦和玉米产量、籽粒矿质元素含量及锌、铁生物有效性的影响,对冬小麦-夏玉米轮作体系开展不同叶面肥喷施试验。小麦季设置去离子水(CK1)、尿素(CK2)、尿素+纳米氧化锌(U+ZnO)、尿素+壳聚糖纳米锌(U+ZnCNP)、尿素+普通七水硫酸锌(U+Zn)5种叶面肥处理;玉米季增加尿素与锌铁硒多元混合喷施处理(U+Zn/Fe/Se)。结果表明:各叶面肥喷施处理对小麦和玉米籽粒产量均无显著影响,但对籽粒微量元素含量有显著影响。不同锌源与尿素混合叶面肥对小麦籽粒锌含量强化效果由弱到强依次为U+ZnCNP<U+ZnO<U+Zn。与CK2处理相比,处理U+Zn使小麦籽粒锌含量显著提高77.7%(从22.80 mg·kg⁻¹增加至40.52 mg·kg⁻¹)。籽粒植酸与锌(PA/Zn)摩尔比显著下降42.1%,使籽粒锌生物有效性(TAZ)显著提高74.5%。对于玉米,与CK2处理相比,处理U+Zn/Fe/Se使籽粒锌含量提高32.3%(从14.93 mg·kg⁻¹增加至19.60 mg·kg⁻¹)、硒含量显著提高12.7倍(从17.66 μg·kg⁻¹增加至242.04 μg·kg⁻¹)、籽粒PA/Zn摩尔比显著下降27.0%,使籽粒TAZ显著提高36.9%,使整个植株或玉米秸秆磷与锌(P/Zn)和磷与铁(P/Fe)摩尔比降低。研究表明,叶面喷施普通七水硫酸锌是提高小麦、玉米籽粒锌含量和生物有效性的最佳形式,其强化小麦籽粒锌效果优于玉米。叶面喷施尿素与锌铁硒混合溶液可同时提高玉米籽粒锌、硒含量及锌、铁生物有效性(籽粒、全株、秸秆),是解决人体或动物微量元素营养缺乏的有效农艺强化措施。

关键词:冬小麦-夏玉米轮作;不同锌源;锌铁生物有效性;叶面喷施;微量元素含量

中图分类号:S512.11;S513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0504-12 doi:10.11654/jaes.2023-0507

Effects of foliar applications of fertilizers containing different zinc sources on grain yield and grain nutritional quality of winter wheat and summer maize

YAN Wei¹, SUN Jinbian^{1,2}, LÜ Hongguo³, HUANG Meng¹, WANG Zhiwei³, QI Shijun¹, CUI Zhenling⁴, XUE Yanfang^{1,2*}, LIU Kaichang^{1*}

(1. National Engineering Research Center of Wheat and Maize, Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Maize in Northern Yellow-Huai Rivers Plain, Ministry of Agriculture, Maize Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. College of Agronomy, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China; 3. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Zhaoyuan,

收稿日期:2023-06-27 录用日期:2023-10-10

作者简介:颜为(1991—),女,山东济南人,博士,助理研究员,主要从事作物栽培生理与养分管理研究。E-mail:weiydsdl@163.com

*通信作者:薛艳芳 E-mail:xyfang198692@163.com; 刘开昌 E-mail:liuke1971@163.com

基金项目:国家重点研发计划课题(2021YFD1901003);山东省自然科学基金项目(ZR2021QC115);国家卫健委微量元素与营养重点实验室开放课题(wlkfz202318);山东省科技特派员项目(2022DXAL0125);山东省农业科学院创新人才引进及山东省农科院创新工程项目(CXGC2023G23, CXGC2023A22)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2021YFD1901003); Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2021QC115); Open Project of the Key Laboratory of Trace Elements and Nutrition of the National Health Commission (wlkfz202318); Project of Science and Technology Commissioners in Shandong Province (2022DXAL0125); Innovative Talent Introduction and Innovation Project of Shandong Academy of Agricultural Sciences (CXGC2023G23, CXGC2023A22)

Zhaoyuan 265400, China; 4. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The foliar spraying experiments with different fertilizers were carried out in a winter wheat–summer maize rotation system. This study explored the effects of foliar applications of fertilizers containing different zinc (Zn) sources on grain yield, grain mineral element concentrations, and bioavailability of Zn and iron (Fe) of winter wheat and summer maize. In wheat season, five foliar fertilizer treatments consisted of control (deionized water, CK1), urea solution alone (CK2), urea plus nano-Zn oxide (U+ZnO), urea plus chitosan nano-Zn (U+ZnCNP), urea plus conventional $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (U+Zn). In maize season, a cocktail solution (including Zn in the form of $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Fe, Se, and urea simultaneously) was also included, recorded as U+Zn/Fe/Se. Results showed that foliar fertilizer spraying treatments had no significant effects on grain yield but had significant effects on grain micronutrient concentrations of wheat and maize. The biofortified effects of different Zn sources plus urea on wheat grain Zn concentration were increased in $\text{U+ZnCNP} < \text{U+ZnO} < \text{U+Zn}$. Compared with the CK2, the wheat grain Zn concentration was significantly improved by 77.7% (increased from $22.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $40.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), while the molar ratios of phytate acid to Zn (PA/Zn) significantly decreased by 42.1%, and consequently the wheat grain Zn bioavailability (TAZ) significantly improved by 74.5% with treatment U+Zn. For maize, compared with the CK2, the grain concentrations of Zn and Se were improved by 32.3% (increased from $14.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $19.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and 12.7-folds (substantially increased from $17.66 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $242.04 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), respectively, while the molar ratios of PA/Zn significantly decreased by 27.0%, and consequently the grain TAZ significantly improved by 36.9% with treatment U+Zn/Fe/Se. Furthermore, the molar ratios of P/Zn and P/Fe in maize shoot or straw were significantly decreased by treatment U+Zn/Fe/Se. These results suggest that foliar application of conventional $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ represented the most efficient form to improve the grain Zn concentration and Zn bioavailability of both wheat and maize, with the Zn–biofortified effects being better for wheat than maize. Foliar application of a cocktail solution (treatment of U+Zn/Fe/Se) represented an effective fertilization strategy to solve the deficiencies of trace elements in the human body or animals by improving grain concentrations of Zn and especially Se as well as bioavailability of Zn and Fe in maize grain, shoot and straw.

Keywords: winter wheat–summer maize cropping system; different zinc sources; bioavailability of zinc and iron; foliar application; micronutrient concentration

锌、铁、硒和碘等微量元素营养不良通常被称为隐性饥饿。有报告指出,全球60%~80%的人口受铁缺乏影响,超过30%的人口受锌缺乏影响^[1-2],6%~13%的人口受硒缺乏影响^[3-4]。隐性饥饿不仅引起严重的健康问题,而且也是发展中国家卫生保健系统重要的经济负担。有资料显示,隐性饥饿可能使有关国家的国内生产总值平均损失高达5%^[5]。小麦作为我国主要粮食作物之一,小麦及其加工产品是我国一半居民的口粮,玉米在粗粮食用及养殖饲用方面具有不可替代的作用。小麦及玉米作为重要的粮食作物,为人体生命活动提供了大量能量、蛋白质及矿物质营养(包括锌、铁、硒等)。膳食中微量营养素摄入不足和饮食结构单一化被认为是导致人类微量营养素缺乏的主要原因,尤其是以谷类作物为主要膳食来源的低收入国家^[6-7]。最新研究表明,在我国小麦主产省区采集分析的1 112份小麦籽粒样品中,籽粒锌含量平均为 $31.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,85.8%的样本低于推荐量下限 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅4.1%的样本高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的推荐量上限;籽粒铁含量平均为 $43.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,72.9%的样本低于铁的推荐量下限 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,所有样本铁含量均低于推荐量上限 $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[8]。在我国玉米主产省区采集分析的980份玉米籽粒样品中,籽粒锌和铁的含

量平均仅为 $17.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $17.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于营养学家提出的满足人体健康所需的生物强化对应目标值 $38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $45 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[9]。除谷类作物籽粒中锌、铁含量较低外,籽粒中一些抗营养化合物,例如植酸(PA)或酚类化合物的存在也导致锌、铁的生物有效性较低。此外,我国成人硒摄入量平均仅为 $26.63 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,与中国预防医学中心推荐的 $40 \sim 240 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和美国国家科学院推荐的 $50 \sim 200 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 的硒摄入量相差甚远^[10],而且人体自身无法直接合成硒,硒主要从食物中获取^[11]。因此,提高谷类作物籽粒锌、铁、硒等微量元素含量是改善人体微量元素缺乏的重要途径。

解决微量元素缺乏问题的途径有多种,如生物强化、饮食多样化、药物防治,其中生物强化是最经济有效的方法^[12]。生物强化是通过作物育种、生物技术或农艺措施提高主要粮食作物微量元素含量,以满足人们对营养和健康的需求。其中以施肥为代表的农艺强化措施更具有稳定性、经济性和可操作性^[7,13-14]。早期众多研究表明,单独喷施锌、铁、硒或碘可显著提高作物籽粒相应微量元素含量,且普遍认为叶面喷施效果均好于土壤施用^[15-20]。与单独喷施锌肥相比,叶面喷施锌与尿素混合溶液可以进一步提高小麦籽粒锌含量和生物有效性^[21]。最近研究表明,喷施锌、铁、

硒、碘的混合叶面肥是提高小麦和水稻籽粒微量元素(锌、硒、碘)含量的有效农艺措施,而且籽粒锌和铁含量表现出显著正相关关系^[22-24],但目前关于微量元素混合叶面肥喷施对玉米籽粒锌、铁、硒含量及锌和铁生物有效性的影响鲜见报道。

虽然叶面喷施锌肥是提高作物籽粒锌含量的高效施用方式,但对籽粒锌的强化效果取决于锌肥种类和锌肥特性。目前,关于锌肥叶面施用效果国内外普遍以水溶态锌肥[七水硫酸锌($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)]为研究和参照对象。Wei等^[25]的研究表明,叶面喷施氨基酸锌肥和普通 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 较 Zn-EDTA 和柠檬酸锌更有利于提高水稻籽粒锌含量。纳米氧化锌(ZnO-NPs)与传统锌肥相比具有尺寸小、比表面积大等特性,从而被认为可显著提高锌的生物可利用性^[26-27],进而增加籽粒锌含量,同时也有减少锌肥用量的潜力。但目前关于 ZnO-NPs 的应用效果大多集中在以黄瓜、番茄、马铃薯、小麦、玉米等为研究对象的水培以及盆栽试验^[28-30],对大田粮食作物叶面施用效果研究较少。研究表明,叶面喷施壳聚糖纳米锌(ZnCNP)可使小麦籽粒产量提高26.4%、籽粒锌含量提高51.3%(从 $31.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $46.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[31],表明 ZnCNP 作为新型纳米锌肥,节肥增效潜力较大。 ZnCNP 具有球形多孔结构,由壳聚糖中带正电的氨基与三聚磷酸钠中带负电的磷酸根通过离子间相互作用,发生分子间的交联并把硫酸锌包裹在其中,形成载锌纳米粒,通过壳聚糖纳米基质的缓慢溶解扩散来控制锌离子的释放,从而提高锌肥肥效^[32]。

本研究通过大田试验,研究不同锌源(ZnSO_4 、 $7\text{H}_2\text{O}$ 、 ZnO-NPs 、 ZnCNP)与尿素混合喷施对小麦和玉米产量、籽粒锌含量及生物有效性的影响;尿素与锌铁硒混合喷施对玉米产量及籽粒矿质元素含量的影响,以期筛选更加高效的锌源和提高粮食作物籽粒微量元素含量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2020年10月至2021年10月在山东省农业科学院玉米研究所章丘龙山试验基地($36^\circ 43' \text{N}$, $117^\circ 32' \text{E}$)进行。该区年均降雨量693.4 mm,年均气温 13.6°C ,年均日照时数2 558.3 h,无霜期209 d,具有黄淮海区域典型特点。

该试验为冬小麦/夏玉米一年两熟轮作体系,供试小麦品种为济麦22,播量为 $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,于2020年

10月19日播种,2021年6月11日测产收获。供试玉米品种为鲁单510,具有粮饲兼用特点,等行距60 cm种植,每公顷有效收获株数为69 750株,于2021年6月18日播种,10月1日测产收获。供试土壤0~30 cm土层的基本理化性质如下:pH 7.3,有机碳 $9.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $29.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $116.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤有效锌、铁、锰、铜含量(DTPA- Zn 、 Fe 、 Mn 、 Cu)分别为1.3、17.0、9.3、 $1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验为单因素随机区组设计:小麦季设置去离子水对照(CK1)、尿素(CK2)、尿素+纳米氧化锌($\text{U} + \text{ZnO}$)、尿素+壳聚糖纳米锌($\text{U} + \text{ZnCNP}$)、尿素+普通七水硫酸锌($\text{U} + \text{Zn}$)5种叶面肥处理;玉米季增加尿素与锌铁硒多元混合喷施处理($\text{U} + \text{Zn/Fe/Se}$)。小区面积为7 m(长)×15 m(宽)= 105 m^2 ,每个试验小区3次重复。小麦季每个小区选取 8 m^2 于开花一周后开始喷施,共喷施3次,每次间隔5~7 d,每次叶面肥喷施用量 $750 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。玉米季每个处理选取1行长势均匀一致的玉米25株,于大喇叭口期前标记挂牌,于大喇叭口期进行叶面肥喷施,共喷施3次,每次间隔7~10 d,每次叶面肥喷施用量 $950 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。为避免叶面肥喷施造成交叉污染,每种叶面肥处理之间间隔2行玉米,每个处理3次重复。小麦季和玉米季施尿素 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以N计),总氮的40%作为基肥,总氮的60%分别在小麦拔节期和玉米大喇叭口期追施。小麦季过磷酸钙 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 P_2O_5 计)和硫酸钾 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 K_2O 计)全部作基肥,玉米季过磷酸钙 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 P_2O_5 计)和硫酸钾 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 K_2O 计)全部作基肥,撒施旋耕入土。生育期内无严重病虫害和杂草发生。

1.2 试验试剂

ZnO-NPs [粒径(30 ± 10) nm,纯度>99.9%]购自上海麦克林生化有限公司。壳聚糖(分子量50~190 kDa,脱乙酰度80%~85%)和三聚磷酸钠购自西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司。 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、亚硒酸钠(Na_2SeO_3)等分析试剂购自中国国药化工股份有限公司。

预试验结果表明,小麦适宜的 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 喷施量为 $2 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (折合纯锌含量为 $565 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),玉米适宜的 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 喷施量为 $2 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (折合纯锌含量为 $452 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(表1),超过上述喷施量,作物叶片表现出明显的中毒现象。

ZnCNP 溶液制备按照Dapkekar等^[33]的描述略进行修改:将3 g壳聚糖溶解在960 mL 1%的醋酸中,在室温(25 ± 3) $^\circ \text{C}$ 下用磁力搅拌器搅拌1 h,将 $\text{ZnSO}_4 \cdot$

表1 不同叶面肥种类及含量
Table 1 Different types and doses of foliar application of fertilizers

处理 Treatment	小麦季 Wheat season		玉米季 Maize season	
	叶面肥种类及含量 Types and doses of foliar fertilizers	叶面肥纯 Zn 含量 Fertilizer Zn doses	叶面肥种类及含量 Types and doses of foliar fertilizers	叶面肥纯 Zn 含量 Fertilizer Zn doses
CK1	对照,去离子水	—	对照,去离子水	—
CK2	尿素(U,2%)	—	U(2%)	—
U+ZnO	U(2%)+ZnO NPs(706 mg·kg ⁻¹)	565 mg·kg ⁻¹	U(2%)+ZnO NPs(565 mg·kg ⁻¹)	452 mg·kg ⁻¹
U+ZnCNP	U(2%)+ZnCNP	565 mg·kg ⁻¹	U(2%)+ZnCNP	452 mg·kg ⁻¹
U+Zn	U(2%)+ZnSO ₄ ·7H ₂ O(2 500 mg·kg ⁻¹)	565 mg·kg ⁻¹	U(2%)+ZnSO ₄ ·7H ₂ O(2 000 mg·kg ⁻¹)	452 mg·kg ⁻¹
U+Zn/Fe/Se	—	—	U(2%)+ZnSO ₄ ·7H ₂ O(2 000 mg·kg ⁻¹)+ FeSO ₄ ·7H ₂ O(2 000 mg·kg ⁻¹)+Na ₂ SeO ₃ (250 mg·kg ⁻¹)	452 mg·kg ⁻¹

7H₂O(2.5 g 或 2 g)溶解在壳聚糖溶液中,在上述溶液中滴加 40 mL 1% 的三聚磷酸钠,在磁力搅拌器上连续搅拌至无沉淀,形成 ZnCNP 溶液,纯锌含量为 565 mg·kg⁻¹ 或 452 mg·kg⁻¹,用于叶面肥喷施处理(表 1)。配制 ZnO-NPs 溶液须放入超声清洗仪中振荡 30 min 后,再稀释至相应浓度备用。进行叶面肥喷施前,在各种叶面肥中加入 2% 的尿素溶液及 0.01% 的吐温 20 作为表面活性剂。

基于预试验结果,本试验比较了适宜锌溶液喷施条件下,不同锌源(ZnO-NPs 和 ZnCNP 按照与 ZnSO₄·7H₂O 相同纯锌含量计算)对小麦和玉米产量及籽粒营养品质的影响(表 2、表 3)。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集与理化性状测定

在小麦播种前,试验区随机采集 5 点土样(0~30 cm),均匀混合,分成 3 份,挑拣出根系、秸秆等未腐烂分解的植株后,放在阴凉处自然风干后过 2 mm 筛。水土比 2.5:1 浸提 pH 计测定 pH 值,0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定有效磷,1.0 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定有效钾。土壤过 0.25 mm 筛,碳氮分析仪(vario Macro cube, Elementar, Hanau, Germany)测定土壤有机碳和全氮。土壤有效锌、铁、锰、铜采用 DTPA 浸提,等离子发射光谱仪(ICP-OES, Avio™ 200, PerkinElmer, Waltham, MA, United States)测定。

1.3.2 植株样品采集与测定

在成熟期,小麦季每个小区选取 2 行 50 cm 样段,玉米季每个小区选取 3 株玉米,人工脱粒,分为籽粒和秸秆两部分。样品用去离子水清洗 3 次后,在 105 ℃ 杀青 30 min,75 ℃ 烘至恒质量,记录干物质量,用不锈钢磨样机(RT-02B,中国台湾)将烘干的样品磨碎后,在密闭的微波消解炉(CEM Corp., Matthews,

NC, United States)中用 HNO₃-H₂O₂ 消煮,消煮液中锌、铁、锰、铜、钾、磷、钙和镁的含量用 ICP-OES 测定。溶液中硒含量用等离子发射质谱仪(ICP-MS, Nex-ION® 1000, PerkinElmer, Waltham, MA, United States)测定。每批次中加标准样品(籽粒标样为 IPE556,秸秆标样为 IPE883,荷兰 Wageningen 大学)校验操作流程。样品中碳氮含量采用碳氮分析仪测定,小麦和玉米籽粒蛋白质含量用籽粒氮含量分别乘以系数 5.70 和 6.25 换算得到^[34-35]。籽粒样品中植酸磷测定参照 Wu 等^[36]的方法,PA 含量用植酸磷含量除以系数 0.282 换算得到。

1.3.3 测产

在成熟期,小麦季每个小区收获 6 m²,风干脱粒测定总质量,最终折算成含水率为 14% 的产量。

玉米季每个小区收获 20 个穗,风干脱粒测定总质量,最终折算成含水率为 15.5% 的产量。

1.3.4 锌生物有效性评价

用三变量模型来评价锌在人体中的生物有效性^[37],该模型充分考虑了人体小肠内的锌平衡,其计算公式如下:

TAZ=0.5×65×100×

$$\left\{ A_{\text{MAX}} + TDZ + K_R \times \left(1 + \frac{TDP}{K_P} \right) - \sqrt{\left[A_{\text{MAX}} + TDZ + K_R \times \left(1 + \frac{TDP}{K_P} \right) \right]^2 - 4 \times A_{\text{MAX}} \times TDZ} \right\}$$

式中:TAZ 表示每天摄入的有效锌,mg·d⁻¹;TDZ 指饮食中 Zn 的摄入量,mmol·d⁻¹;TDP 指饮食中 PA(籽粒植酸)的摄入量,mmol·d⁻¹;A_{MAX}(最大锌吸收系数)、K_R(锌受体结合反应的平衡解离常数)和 K_P(Zn-PA 受体结合反应的平衡解离常数)是与人体肠道锌稳态相关

的参数,分别为0.091、0.680和0.033。*TAZ*是根据成人每天消耗300 g面粉作为锌和PA唯一的来源计算出来的。另外,籽粒中用PA/Zn、PA/Fe、PA×Ca/Zn摩尔比及秸秆中用P/Zn、P/Fe摩尔比表示锌、铁生物有效性^[38-39]。

1.4 数据处理与分析

试验数据用Microsoft Excel 2021进行处理,SAS 8.0统计软件进行单因素方差分析(5%水平的LSD检验法),Excel 2021软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同叶面肥处理对小麦和玉米产量、生物量及收获指数的影响

由表2可知,含尿素溶液的不同锌源叶面肥处理的小麦产量与对照相比均无显著差异,但生物量和收获指数部分处理存在显著差异。与CK2相比,处理U+ZnO的生物量显著下降17.42%,收获指数显著提高了4.24个百分点。

与对照相比,含尿素溶液的不同锌源叶面肥处理对玉米产量、生物量和收获指数均无显著影响。总体上,玉米产量变化范围为9.34~10.52 t·hm⁻²,平均产量为9.85 t·hm⁻²;收获指数变化范围为52.67%~58.05%,平均为55.72%。

2.2 不同叶面肥处理对籽粒和秸秆锌含量、累积量及收获指数的影响

由图1可知,含尿素溶液的不同锌源叶面肥处理对小麦、玉米的籽粒和秸秆锌含量、锌累积量及锌收获指数均有显著影响。与CK2相比,处理U+ZnO、U+ZnCNP和U+Zn使小麦籽粒锌含量分别显著提高8.5、2.8 mg·kg⁻¹和17.7 mg·kg⁻¹,增加幅度分别为37.3%、12.2%和77.7%。不同叶面肥喷施处理对小麦秸秆锌含量有类似影响规律,表明处理U+Zn在提高小麦籽

粒和秸秆锌含量方面效果最佳。此外,处理U+ZnCNP和U+Zn较CK2使小麦地上部锌累积量分别显著提高到1.7倍和3.3倍,但锌收获指数分别显著下降40.6个和42.2个百分点。

对于玉米,与CK2相比,其他含尿素叶面肥处理使玉米籽粒锌含量提高1.1~4.7 mg·kg⁻¹,增加幅度为7.3%~31.3%;使玉米秸秆锌含量显著提高34.2~86.9 mg·kg⁻¹,增加幅度为205.7%~523.5%;使玉米地上部锌累积量显著提高92.5%~209.0%,但使锌收获指数显著下降22.8~35.1个百分点。结果显示,处理U+Fe/Zn/Se提高玉米籽粒锌含量和地上部锌累积量的效果最佳。

2.3 不同叶面肥处理对籽粒和秸秆铁、硒、磷、植酸、蛋白质含量的影响

由表3可知,含尿素溶液的不同锌源叶面肥处理的小麦籽粒铁含量、植酸含量与CK2相比均无显著差异,但籽粒蛋白质含量和磷含量存在显著差异。与CK2相比,处理U+ZnO和U+ZnCNP显著降低籽粒蛋白质和磷含量,处理U+Zn显著降低秸秆铁和磷含量。

在玉米季,与CK2处理相比,其他含尿素叶面肥处理对籽粒蛋白质、铁和植酸含量以及秸秆磷含量亦无显著影响。与CK2相比,处理U+Fe/Zn/Se使籽粒和秸秆硒含量分别显著提高到12.7倍和21.2倍,使秸秆铁含量显著提高34.6%。

2.4 不同叶面肥处理对籽粒及秸秆中锌、铁生物有效性的影响

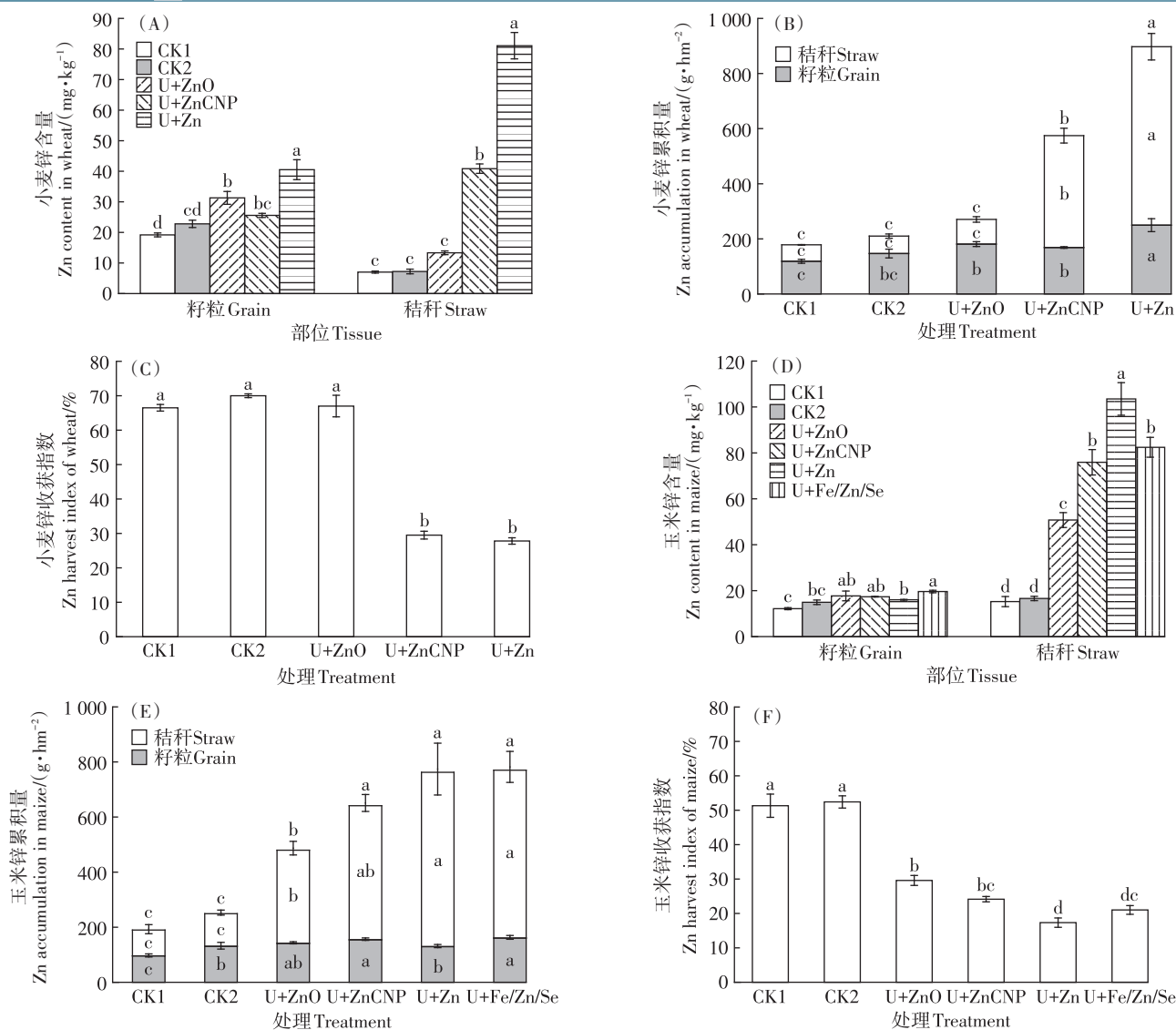
由表4可知,含尿素溶液的不同锌源叶面肥处理对小麦和玉米籽粒及秸秆中锌、铁生物有效性各相关参数(小麦籽粒PA/Fe摩尔比除外)均有影响。小麦季,与CK2相比,其他含尿素叶面肥处理使籽粒PA/Zn摩尔比从36.66平均降低到24.71,PA×Ca/Zn摩尔比从451.21 mmol·kg⁻¹平均降低到290.01 mmol·kg⁻¹;

表2 不同叶面肥处理对小麦和玉米产量、生物量及收获指数的影响

Table 2 Effects of different foliar applications on the grain yield,biomass and harvest index(HI) of winter wheat and summer maize

处理 Treatment	小麦季 Wheat season			玉米季 Maize season		
	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	生物量 Biomass/(t·hm ⁻²)	收获指数 HI/%	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	生物量 Biomass/(t·hm ⁻²)	收获指数 HI/%
CK1	7.18ab	14.71b	42.02b	9.34a	14.00a	56.42ab
CK2	7.45ab	15.10ab	42.40b	10.33a	15.85a	55.08ab
U+ZnO	6.75b	12.47c	46.64a	9.65a	14.83a	54.83ab
U+ZnCNP	7.68a	16.52a	39.96b	10.52a	15.31a	58.05a
U+Zn	7.15ab	14.12b	43.57ab	9.57a	14.14a	57.27ab
U+Fe/Zn/Se	—	—	—	9.70a	15.69a	52.67b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at P<0.05. The same below.



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.

图1 不同叶面肥处理对小麦和玉米籽粒和秸秆锌含量、锌累积量及锌收获指数影响

Figure 1 Effects of different foliar applications on the Zn content and accumulation in grain, straw and shoot, Zn harvest index of winter wheat and summer maize

而TAZ提高了30.9%~74.5%。此外,处理U+ZnO、U+ZnCNP、U+Zn较CK2处理使秸秆P/Zn摩尔比分别显著下降了72.2%、88.2%和93.7%。

玉米季,与CK2处理相比,其他含尿素叶面肥处理使籽粒PA/Zn摩尔比降低5.5%~27.0%,其中处理U+Fe/Zn/Se降幅最大;使籽粒PA×Ca/Zn摩尔比降低25.7%~39.7%,其中处理U+Zn降幅最大;使籽粒PA/Fe摩尔比下降0.3%~13.8%,但处理间差异均不显著;相反,其他含尿素叶面肥处理使籽粒TAZ较CK2处理增加7.4%~36.9%,其中处理U+Fe/Zn/Se增幅最大;使秸秆P/Zn摩尔比显著下降66.8%~84.1%,处理U+Zn

降幅最大,不同叶面肥处理对地上部植株P/Zn摩尔比有相似的影响规律。与CK1和CK2处理相比,其他含尿素叶面肥处理对秸秆及地上部植株P/Fe摩尔比均无显著影响。

2.5 小麦和玉米产量与各指标间的相关性分析

图2表明,小麦和玉米产量与籽粒锌、铁硒含量、蛋白质含量及籽粒TAZ均无显著相关关系。在小麦和玉米籽粒中,锌含量和铁含量均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),相关系数分别为0.643和0.670。玉米籽粒中锌含量和硒含量亦呈显著正相关关系($r = 0.500^*$, $P < 0.05$)。此外,小麦籽粒TAZ与籽粒铁含量

表3 不同叶面肥处理对小麦和玉米籽粒和秸秆铁、硒、磷、植酸、蛋白质含量的影响
Table 3 Effects of different foliar applications on the concentrations of Fe, Se, P, phytic acid (PA) and protein of winter wheat and summer maize

处理 Treatment	小麦季 Wheat season						玉米季 Maize season								
	籽粒养分含量 Nutrient content in grain				秸秆养分含量 Nutrient content in straw		籽粒养分含量 Nutrient content in grain					秸秆养分含量 Nutrient content in straw			
	蛋白 质/%	铁/ (mg·kg ⁻¹)	磷/ (g·kg ⁻¹)	植酸/ (g·kg ⁻¹)	铁/ (mg·kg ⁻¹)	磷/ (g·kg ⁻¹)	蛋白 质/%	铁/ (mg·kg ⁻¹)	硒/ (μg·kg ⁻¹)	磷/ (g·kg ⁻¹)	植酸/ (g·kg ⁻¹)	铁/ (mg·kg ⁻¹)	硒/ (μg·kg ⁻¹)	磷/ (g·kg ⁻¹)	
CK1	13.51b	28.76b	3.18abc	7.11a	198.10a	0.95b	9.04a	14.38b	35.68b	2.46bc	7.14a	152.69bc	110.91b	0.69a	
CK2	14.57a	29.01ab	3.26ab	8.45a	200.86a	1.21a	9.13a	15.36ab	17.66b	2.36c	6.72a	157.56bc	40.06b	0.68a	
U+ZnO	13.57b	29.50ab	2.94c	7.75a	190.11ab	0.65c	9.31a	16.10ab	17.83b	2.67ab	7.24a	140.91c	67.65b	0.70a	
U+ZnCNP	13.19b	29.28ab	3.05bc	7.31a	196.72a	0.83bc	8.90a	16.88ab	13.24b	2.68ab	7.38a	184.11ab	110.86b	0.59a	
U+Zn	14.50a	30.56a	3.37a	8.61a	170.77b	0.89b	9.13a	15.99ab	13.08b	2.38c	6.14a	154.38bc	61.01b	0.68a	
U+Fe/Zn/Se	—	—	—	—	—	—	9.15a	17.05a	242.04a	2.80a	6.43a	212.08a	890.67a	0.74a	

表4 不同叶面肥处理对小麦和玉米籽粒和秸秆中锌、铁生物有效性的影响
Table 4 Effects of different foliar applications on the Zn and Fe bioavailability including the ratios of PA/Zn, PA×Ca/Zn, PA/Fe, total daily absorbed Zn (TAZ) in grain, the ratios of P/Zn and P/Fe in straw and shoot of winter wheat and summer maize

处理 Treatment	小麦季 Wheat season						玉米季 Maize season							
	籽粒 Grain				秸秆 Straw		籽粒 Grain				秸秆 Straw		地上部 Shoot	
	PA/Zn	(PA×Ca/Zn)/ (mmol·kg ⁻¹)	PA/Fe	TAZ/ (mg·d ⁻¹)	P/Zn	P/Fe	PA/Zn	(PA×Ca/Zn)/ (mmol·kg ⁻¹)	PA/Fe	TAZ/ (mg·d ⁻¹)	P/Zn	P/Fe	P/Zn	P/Fe
CK1	36.47a	474.51a	21.04a	0.78c	286.30a	8.71ab	57.69a	68.17ab	42.06a	0.50c	99.06a	8.37ab	265.74a	41.42ab
CK2	36.66a	451.21a	24.73a	0.78c	365.11a	10.89a	44.39b	76.68a	37.18ab	0.64bc	86.82a	8.00ab	215.73b	37.24ab
U+ZnO	24.77b	282.87b	22.26a	1.19ab	101.56b	6.25c	40.95bc	56.94abc	38.53ab	0.70b	28.85b	9.03a	115.37c	45.48a
U+ZnCNP	28.16b	319.40b	21.21a	1.02bc	43.03b	7.67bc	41.96bc	53.68bc	37.06ab	0.69b	16.53b	5.87b	91.10cd	37.79ab
U+Zn	21.21b	267.76b	23.95a	1.36a	23.09b	9.43ab	37.78bc	46.24c	32.97b	0.76ab	13.78b	8.02ab	65.22d	40.02ab
U+Fe/Zn/Se	—	—	—	—	—	—	32.41c	56.27bc	32.06b	0.88a	19.20b	6.40b	78.16d	30.35b

呈显著正相关关系,玉米籽粒 TAZ 与籽粒硒含量呈显著正相关关系,相关系数分别为 0.597 和 0.558 ($P<0.05$)。

2.6 不同叶面肥处理对成熟期玉米地上部植株养分含量的影响

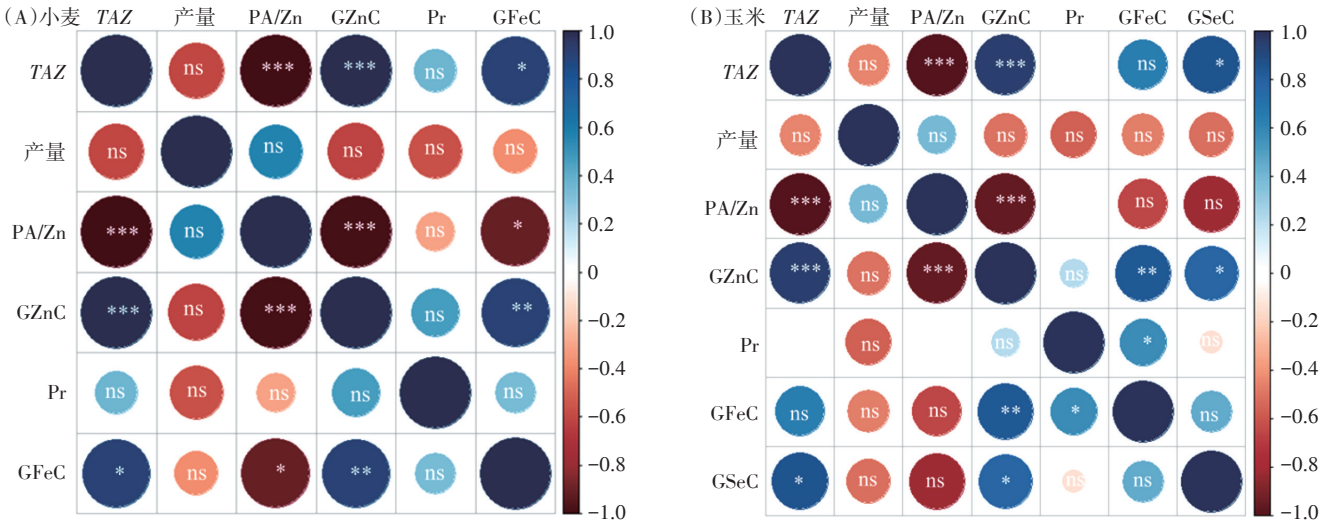
表5 为不同叶面肥处理对成熟期玉米地上部植株矿质元素含量的影响。根据美国国家研究委员会动物营养学奶牛营养小组委员会^[40]推荐的奶牛日粮中矿物质元素的需求量(基于干质量): 锌为 43~60 mg·kg⁻¹、铁为 12.3~18 mg·kg⁻¹、硒为 300 μg·kg⁻¹、锰为 12~14 mg·kg⁻¹、铜为 9~11 mg·kg⁻¹、磷为 3.2~4.4 g·kg⁻¹、钾为 10 g·kg⁻¹、镁为 1.8~2.1 g·kg⁻¹、钙为 5.3~6.7 g·kg⁻¹。本试验中,不同叶面肥处理下,玉米地上部植株铁含量变化范围为 73.0~108.9 mg·kg⁻¹、锰含量变化范围为 12.9~16.1 mg·kg⁻¹,植株锰含量和铁含量均可达到奶牛日粮的推荐值,而植株铜、磷、钾、镁和钙含量均未达到奶牛日粮的相应推荐值。处理 U+Zn 和 U+

Fe/Zn/Se 的植株锌含量均可达到奶牛日粮对锌的推荐值,处理 U+Fe/Zn/Se 植株硒含量高达 541.2 μg·kg⁻¹,同时可以满足奶牛日粮 300 μg·kg⁻¹ 推荐需求量。此外,与 CK1 和 CK2 处理相比,处理 U+Fe/Zn/Se 可降低玉米秸秆或全株 P/Zn(达到显著水平)和 P/Fe 摩尔比,表明奶牛对锌和铁的生物利用效率更高,且可同时满足对锌、铁、硒的养分需求。

3 讨论

3.1 不同叶面肥处理对小麦和玉米产量的影响

研究表明,锌肥施用对作物增产效应受气候、土壤、施肥方式及作物种类等条件的影响。杨月娥等^[41]对我国主要麦区 30 个地点进行田间试验(土壤 DTPA-Zn 为 0.54~3.63 mg·kg⁻¹)的研究结果表明,叶面喷施锌肥对小麦籽粒产量、生物量、收获指数均无显著影响。在陕西关中地区(土壤 DTPA-Zn 为 0.45~0.78 mg·kg⁻¹),Wang 等^[17-18]的研究结果表明土施或叶



*, **, ***分别表示在 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平相关性显著; ns: 在 $P<0.05$ 相关性不显著。
* Significant at $P<0.05$. ** Significant at $P<0.01$. *** Significance at $P<0.001$. ns: not significant at $P<0.05$.

图2 小麦和玉米产量与籽粒锌铁硒含量、蛋白质含量、籽粒锌生物有效性及籽粒植酸与锌摩尔比间的相关性分析

Figure 2 The correlations between the grain yield and grain concentrations of Zn, Fe, Se (GZnC, GFeC and GSeC), protein (Pr), Zn bioavailability (TAZ) and ratios of PA/Zn of winter wheat and summer maize

表5 不同叶面肥处理对成熟期玉米地上部植株养分含量的影响

Table 5 Effects of different foliar applications on the shoot nutrient content at maturity

处理 Treatment	锌 Zn/(mg·kg ⁻¹)	铁 Fe/(mg·kg ⁻¹)	硒 Se/(μg·kg ⁻¹)	锰 Mn/(mg·kg ⁻¹)	铜 Cu/(mg·kg ⁻¹)	磷 P/(g·kg ⁻¹)	钾 K/(g·kg ⁻¹)	镁 Mg/(g·kg ⁻¹)	钙 Ca/(g·kg ⁻¹)
CK1	13.5	74.6	68.4	15.1	2.5	1.7	7.0	1.4	1.9
CK2	15.7	79.4	27.8	16.1	2.9	1.6	6.3	1.6	2.1
U+ZnO	32.7	73.0	40.7	13.3	2.6	1.8	8.3	1.4	2.1
U+ZnCNP	41.8	86.9	54.1	13.4	2.4	1.8	7.7	1.5	1.9
U+Zn	53.5	75.1	33.6	13.0	2.6	1.7	7.8	1.4	1.9
U+Fe/Zn/Se	49.1	108.9	541.2	12.9	2.7	1.8	6.6	1.7	2.0
平均值	34.4	83.0	127.6	14.0	2.6	1.7	7.3	1.5	2.0
推荐值 ^a	43~60	12.3~18	300	12~14	9~11	3.2~4.4	10	1.8~2.1	5.3~6.7

注:a.根据美国国家研究委员会动物营养学奶牛营养小组委员会推荐的奶牛日粮中矿物质元素的需求量。

Note: a. Recommended dietary requirement of minerals for dairy cows according to subcommittee on dairy cattle nutrition, committee on animal nutrition, national research council.

面喷施锌肥或硒肥对玉米、小麦产量及生物量均无显著影响;李孟华等^[42]的研究结果表明,土施或叶面喷施锌肥均不会对旱地小麦产量产生显著影响,但叶面喷施锌肥有增产趋势。Zou等^[20]对包括中国在内的7个国家4a的23个试验研究表明,只有在巴基斯坦(土壤DTPA-Zn为0.30~0.71 mg·kg⁻¹)土施ZnSO₄·7H₂O 50 kg·hm⁻²的试验表现出显著增产效果,而叶面喷施锌肥虽表现出增产趋势,但差异不显著。Zou等^[24]进一步对包括中国在内的6个国家2a的27个试验(土壤DTPA-Zn为0.21~2.14 mg·kg⁻¹)进行了分析研究,结果表明单独喷施锌肥、碘肥或锌铁硒碘混合

叶面肥对小麦产量均无显著影响。本试验是在土壤DTPA-Zn和DTPA-Fe含量分别为1.3 mg·kg⁻¹和17.0 mg·kg⁻¹上开展的田间试验,结果显示喷施尿素与不同锌源混合叶面肥对小麦和玉米产量亦均无显著影响。以上研究结果分析表明,潜在缺锌或足锌土壤条件下,喷施微量元素叶面肥的增产效果较弱。然而,在土耳其极度缺锌土壤(土壤DTPA-Zn为0.12 mg·kg⁻¹),土施或叶面喷施锌肥均可显著提高小麦产量,且土施效果明显优于叶面喷施^[43]。以上结果说明在极度缺锌的土壤条件下,叶面喷施锌肥可能会提高作物产量。

3.2 不同叶面肥处理对小麦和玉米籽粒锌含量及生物有效性的影响

本试验分析了不同锌源配施尿素溶液对小麦和玉米籽粒锌浓度的影响,以明确谷类作物籽粒锌营养强化的最佳锌肥种类。结果表明,不同锌源与尿素混合叶面肥对小麦籽粒锌含量强化效果由弱到强依次为 $U+ZnCNP < U+ZnO < U+Zn$ (图1)。国外一些学者^[44]指出,为了应对人类健康产生可测量的生物学影响,应将谷物籽粒锌含量至少提高 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本试验中,与CK2相比,处理 $U+Zn$ 可使小麦籽粒锌含量从 $22.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $40.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (提高 $17.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),基本能够达到小麦籽粒锌含量的生物强化目标值 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;对于玉米,尽管不同锌源与尿素混合叶面肥较CK2使籽粒锌含量提高 $1.1 \sim 4.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但不同锌源处理间差异不显著,其中处理 $U+Fe/Zn/Se$ 效果最好。上述结果分析表明,与纳米锌肥相比,叶面喷施普通 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 是提高小麦、玉米籽粒锌含量的最佳形式,且对小麦籽粒锌强化效果优于玉米,结果与前人研究结果一致^[17,45],这可能与参与锌运输的转运蛋白数量有关,在玉米中籽粒蛋白质含量较低,而小麦中籽粒蛋白质含量较高(表3),因此可能富含更多参与运输锌的转运蛋白^[46-47]。本试验结果也表明,小麦籽粒 PA/Zn 及 $PA \times Ca/Zn$ 摩尔比均在 $U+Zn$ 处理时最低,而 TAZ 则在 $U+Zn$ 处理时最高 ($1.36 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, 表4),能满足人体每天通过谷类作物摄入锌需求 ($3 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$) 的45%^[48];而玉米籽粒 PA/Zn 则在 $U+Fe/Zn/Se$ 处理时最低, TAZ 在 $U+Fe/Zn/Se$ 处理时最高 ($Zn \ 0.88 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, 表4),仅能满足人体每天通过谷类作物摄入锌需求 ($3 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$) 的29%。以上分析结果表明,在冬小麦上通过叶面喷施普通 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 是改善作物锌营养,提高籽粒锌含量和锌生物有效性的更加经济有效的施肥方式,是进一步改善人体锌营养健康的重要途径。

本试验结果表明无机盐锌肥(普通 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)较纳米锌肥(纳米氧化锌、壳聚糖纳米锌)更有利于提高玉米尤其是小麦籽粒锌含量。类似地, Doolette等^[30]用不同锌源的⁶⁵Zn同位素对小麦最新展开叶进行标记,结果表明,与不同粒径的纳米氧化锌颗粒(粒径为40~50 nm)和微粒(粒径为300~400 nm)锌肥相比,无机盐锌肥(如 $ZnCl_2$)尤其是螯合态锌肥(如 $Zn-EDTA$)更有利于促进⁶⁵Zn向籽粒的转运和分配。陈晨^[49]的研究结果也表明,与喷清水相比,喷施不同锌源叶面肥均可显著提高糙米和精米锌含量,其中叶面

喷施0.2%硫酸锌+1%尿素效果最好,0.2%甘氨酸锌效果最差,而0.2%硫酸锌、0.2%纳米氧化锌效果居中且二者对籽粒锌的强化效果相似。而其他有关研究结果表明,纳米氧化锌较普通 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 更有利于提高小麦籽粒锌含量^[50-52]。例如,Zhang等^[52]的报道指出,折合纯锌含量为 $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶面喷施纳米氧化锌较常规 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 可使小麦籽粒锌含量平均显著提高21.4%。本试验在小麦和玉米上喷施的纯锌溶液分别仅为 $565 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $452 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于Zhang等^[52]的锌肥用量,并且也有田间结果显示,随着 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 喷施量增加(0.2%~0.5%),小麦籽粒锌含量呈增加趋势^[53]。此外,纳米氧化锌为难溶性物质,从喷施后叶面残留白色斑点现象可知,喷施的纳米氧化锌未被完全吸收,因此并未表现出比常规 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 更好的富锌效果。据上述分析推测,不同锌源对籽粒锌生物强化的差异可能与以下3个因素有关:(1)不同作物种类及品种间叶片角质层厚度、气孔大小和密度及绒毛疏密存在差异进而影响叶面对锌的吸收;(2)纳米颗粒粒径的差异可能会影响作物叶片对锌的吸附和吸收速率;(3)不同锌源的喷施浓度不同可能会影响作物叶片对锌的吸收。关于不同锌源叶面肥对作物锌营养强化生理及分子机理有待今后深入研究。

3.3 多元养分混合喷施(锌、铁、硒、氮)对玉米籽粒和秸秆养分含量及锌铁生物有效性的影响

研究表明,叶面喷施微量元素混合叶面肥(锌、铁、硒、碘)是提高小麦和水稻籽粒微量元素含量(尤其是锌、硒、碘)的有效农艺措施^[22-24]。例如Zou等^[24]的研究结果表明喷施微量元素混合叶面肥可同步使小麦籽粒锌含量提高64.7%(平均从 $28.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $47.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、硒含量提高2.7倍(平均从 $90 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $338 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、碘含量提高9.4倍(平均从 $24 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $249 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、铁含量提高12%(平均从 $32.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $36.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。Naeem等^[22]的研究结果表明,喷施微量元素混合叶面肥可同步使水稻籽粒锌含量提高35.2%(平均从 $16.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $22.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、硒含量提高13.1倍(平均从 $54 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $760 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、碘含量提高14.5倍(平均从 $12 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $186 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。本试验结果分析进一步表明,处理 $U+Zn/Fe/Se$ 较CK2使玉米籽粒锌含量显著提高31.3%(从 $14.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $19.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、硒含量提高12.7倍(从 $17.66 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $242.04 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、铁含量提高11.0%(从 15.36

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $17.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 可同步提高玉米籽粒锌、铁、硒的含量。而且籽粒锌含量与铁含量、硒含量均呈显著正相关关系, 说明玉米籽粒中的锌与铁、锌与硒存在协同作用, 因而处理 $\text{U}+\text{Zn}/\text{Fe}/\text{Se}$ 较处理 $\text{U}+\text{Zn}$ 对提高籽粒锌含量更加有效。相似地, 其他研究发现在小麦和谷子籽粒中也存在锌与硒的协同作用, 因而锌硒混合喷施较单喷锌肥或硒肥对提高籽粒锌或硒含量更加有效^[54-56]。

本试验选用的玉米品种鲁单 510 具有粮饲兼用的特性, 农户或种粮大户会根据当地玉米收购价格选择收获籽粒或收获青贮玉米, 且青贮玉米通常由附近的奶牛养殖场收购。根据美国国家研究委员会动物营养学奶牛营养小组委员会^[40]推荐的奶牛日粮中矿物质元素的需求量(基于干质量), 本试验条件下, 玉米植株锰含量和铁含量均可达到奶牛日粮的推荐值, 通过 $\text{U}+\text{Zn}/\text{Fe}/\text{Se}$ 处理可以进一步满足奶牛日粮对锌的推荐需求量, 而玉米全株尤其是玉米秸秆硒含量分别是硒推荐量($300 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 1.80 倍和 2.97 倍, 分别高达 $541.2 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $890.7 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 3 和表 5)。陈一^[57]的研究结果表明, 日粮中额外添加有机硒对泌乳高峰期奶牛存在一定的附加效应, 表现为提高生产性能, 增强抗氧化功能, 改善奶牛健康, 其日粮中硒的适宜添加量为 $500\sim 600 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (含底物)。辛杭书等^[58]在围产期奶牛日粮中添加酵母硒发现, 当奶牛日粮硒含量为 $830 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 奶牛的抗氧化和免疫功能达到最优效果。因此, 微量元素叶面肥强化后的全株玉米青贮或青贮玉米秸秆作为奶牛基础日粮重要组分, 饲喂后是否导致奶牛出现硒中毒现象仍需要进一步研究。另外, 从人体营养或动物营养角度综合考虑, 与 CK2 相比, 处理 $\text{U}+\text{Zn}/\text{Fe}/\text{Se}$ 可显著降低玉米籽粒 PA/Zn 和 PA/Fe 的摩尔比以及玉米秸秆或整个植株的 P/Zn 和 P/Fe 摩尔比, 进而提高锌和铁的生物有效性。

4 结论

(1) 喷施不同锌源与尿素混合叶面肥对小麦和玉米产量均无显著影响, 其中小麦和玉米产量均在处理 $\text{U}+\text{Zn}/\text{CNP}$ 时达到最高, 较单独喷尿素溶液处理分别高出 3.0% 和 9.4%。

(2) 不同锌源(七水合硫酸锌、纳米氧化锌、壳聚糖纳米锌)与尿素混合叶面喷施, 普通七水硫酸锌提高小麦、玉米籽粒锌含量的效果最佳, 且强化小麦籽粒锌效果优于玉米, 而且与单独喷尿素溶液相比, 对小麦、玉米产量和籽粒养分含量(蛋白质、铁、磷)均无

显著影响。

(3) 喷施锌铁硒与尿素混合叶面肥(处理 $\text{U}+\text{Zn}/\text{Fe}/\text{Se}$)可同时提高玉米籽粒锌、铁、硒的含量, 显著降低玉米籽粒 PA/Zn 和 PA/Fe 的摩尔比以及玉米秸秆或整个植株的 P/Zn 和 P/Fe 摩尔比, 进而提高锌和铁的生物有效性, 是解决人体或动物微量元素营养缺乏的有效农艺强化措施。

参考文献:

- [1] TEKLIĆ T, LONČARIĆ Z, KOVAČEVIĆ V, et al. Metallic trace elements in cereal grain—a review: how much metal do we eat?[J]. *Food and Energy Security*, 2013, 2(2): 81–95.
- [2] WHITE P J, BROADLEY M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. *New Phytologist*, 2009, 182(1): 49–84.
- [3] COMBS G F. Selenium in global food systems[J]. *British Journal of Nutrition*, 2001, 85(5): 517–547.
- [4] JONES G D, DROZ B, GREVE P, et al. Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(11): 2848–2853.
- [5] GÖDECKE T, STEIN A J, QAIM M. The global burden of chronic and hidden hunger: trends and determinants[J]. *Global Food Security*, 2018, 17: 21–29.
- [6] BEAL T, MASSIOT E, ARSENAULT J E, et al. Global trends in dietary micronutrient supplies and estimated prevalence of inadequate intakes[J]. *PLoS One*, 2017, 12(4): 1–20.
- [7] ÇAKMAK I, KUTMAN U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69: 172–180.
- [8] 褚宏欣, 牟文燕, 党海燕, 等. 我国主要麦区小麦籽粒微量元素含量及营养评价[J]. 作物学报, 2022, 48(11): 2853–2865. CHU H X, MOU W Y, DANG H Y, et al. Evaluation on concentration and nutrition of micro-elements in wheat grains in major wheat production regions of China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(11): 2853–2865.
- [9] ZHAO Q Y, XU S J, ZHANG W, et al. Identifying key drivers for geo-spatial variation of grain micronutrient concentrations in major maize production regions of China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115114.
- [10] ZHANG B J, WEI Y H, YAN S, et al. Characterization of selenium accumulation of different rice genotypes in Chinese natural seleniferous soil[J]. *Plant Soil and Environment*, 2019, 65(1): 15–20.
- [11] 石吕, 薛亚光, 石晓旭, 等. 喷施硒肥对富硒土壤水稻产量、品质及硒分配的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(10): 174–183. SHI L, XUE Y G, SHI X X, et al. Effects of spraying selenium fertilizer on rice yield, quality and selenium distribution in selenium-rich soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(10): 174–183.
- [12] MA G S, JIN Y, LI Y P, et al. Iron and zinc deficiencies in China: what is a feasible and cost-effective strategy?[J]. *Public Health Nutri-*

- tion, 2008, 11(6):632–638.
- [13] PFEIFFER W H, MCCLAFFERT B. HarvestPlus: breeding crops for better nutrition[J]. *Crop Science*, 2007, 47:S88–S105.
 - [14] ZHAO F J, SHEWRY P R. Recent developments in modifying crops and agronomic practice to improve human health[J]. *Food Policy*, 2011, 36:S94–S101.
 - [15] CAKMAK I, PROM-U-THAI C, GUILHERME L R G, et al. Iodine biofortification of wheat, rice and maize through fertilizer strategy[J]. *Plant and Soil*, 2017, 418(1/2):319–335.
 - [16] MAO H, WANG J, WANG Z, et al. Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(2):459–470.
 - [17] WANG J W, MAO H, ZHAO H B, et al. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135:89–96.
 - [18] WANG J W, WANG Z H, MAO H, et al. Increasing Se concentration in maize grain with soil- or foliar-applied selenite on the Loess Plateau in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150:83–90.
 - [19] ZHANG Y Q, SHI R L, REZAUL K M, et al. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58: 12268–12274.
 - [20] ZOU C Q, ZHANG Y Q, RASHID A, et al. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1/2):119–130.
 - [21] LI M, WANG S X, TIAN X H, et al. Zn distribution and bioavailability in whole grain and grain fractions of winter wheat as affected by applications of soil N and foliar Zn combined with N or P[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 61:26–32.
 - [22] NAEEM A, ASLAM M, AHMAD M, et al. Biofortification of diverse basmati rice cultivars with iodine, selenium, and zinc by individual and cocktail spray of micronutrients[J]. *Agronomy*, 2022, 12(49):1–16.
 - [23] PROM-U-THAI C, RASHID A, RAM H, et al. Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11:589835.
 - [24] ZOU C Q, DU Y F, RASHID A, et al. Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67:8096–8106.
 - [25] WEI Y Y, SHOHAG M J I, YANG X E. Biofortification and bioavailability of rice grain zinc as affected by different forms of foliar zinc fertilization[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9):1–10.
 - [26] DIMKPA C O, MCLEAN J E, BRITT D W, et al. Bioactivity and biomodification of Ag, ZnO, and CuO nanoparticles with relevance to plant performance in agriculture[J]. *Industrial Biotechnology*, 2012, 8(6):344–357.
 - [27] WATSON J L, FANG T, DIMKPA C O, et al. The phytotoxicity of ZnO nanoparticles on wheat varies with soil properties[J]. *BioMetals*, 2015, 28(1):101–112.
 - [28] 孙露莹, 宋凤斌, 李向楠, 等. 纳米氧化锌对玉米种子萌发及根系碳代谢的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(1):40–49. SUN L Y, SONG F B, LI X N, et al. Effects of ZnO nanoparticles on seed germination and root carbon metabolism in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(1):40–49.
 - [29] 杨静雅, 符倩, 张皓月, 等. 土施纳米氧化锌对蚯蚓生理和黄瓜幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(3):525–534. YANG J Y, FU Q, ZHANG H Y, et al. Effects of zinc oxide nanoparticle application in soil on earthworm physiology and cucumber seedling growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3):525–534.
 - [30] DOOLETTE C L, READ T L, HOWELL N R, et al. Zinc from foliar-applied nanoparticle fertiliser is translocated to wheat grain: a ⁶⁵Zn radiolabelled translocation study comparing conventional and novel foliar fertilisers[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749:142369.
 - [31] KUMAR A, PRAJAPATI D, DEVI K A, et al. Slow-release Zn application through Zn-chitosan nanoparticles in wheat to intensify source activity and sink strength[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 168:272–281.
 - [32] CHOUDHARY R C, KUMARASWAMY R V, KUMARI S, et al. Zinc encapsulated chitosan nanoparticle to promote maize crop yield[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 127:126–135.
 - [33] DAPKEKAR A, DESHPANDE P, OAK M D, et al. Zinc use efficiency is enhanced in wheat through nanofertilization[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):6832.
 - [34] CHARMET G, ROBERT N, BRANLAR G, et al. Genetic analysis of dry matter and nitrogen accumulation and protein composition in wheat kernels[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2005, 111(3):540–550.
 - [35] OKTEM A, OKTEM A G, EMEKLER H. Effect of nitrogen on yield and some quality parameters of sweet corn[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(7):832–847.
 - [36] WU P, ZHAO T, TIAN J C. Phytic acid contents of wheat flours from different mill streams[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2010, 9(11):1684–1688.
 - [37] MILLER L V, KREBS N F, HAMBIDGE K M. A mathematical model of zinc absorption in humans as a function of dietary zinc and phytate [J]. *Journal of Nutrition*, 2007, 137(1):135–141.
 - [38] RYAN M H, MCINERNEY J K, RECORD I R, et al. Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertiliser, crop sequence and mycorrhizal fungi[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88(7):1208–1216.
 - [39] ZHANG W, LIU D Y, LI C, et al. Accumulation, partitioning, and bioavailability of micronutrients in summer maize as affected by phosphorus supply[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 86:48–59.
 - [40] National Research Council(NRC). Nutrient requirements of dairy cattle[M]. 7th revised edition. Washington, DC: The National Academies Press, 2001.

- [41] 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 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.
- [42] 李孟华,王朝辉,王建伟,等.低锌旱地施肥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. Effect of Zn application methods on wheat grain yield and Zn utilization in Zn-deficient soils of dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6):1346-1355.
- [43] YILMAZ A, EKIZ H, TORUN B, et al. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on zinc-deficient calcareous soils[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20:461-471.
- [44] 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.
- [45] 刘敦一,庞丽丽,张伟,等.锌肥施用方式对小麦、玉米产量和籽粒锌含量的影响[J].中国土壤与肥料,2014(4):76-80. LIU D Y, PANG L L, ZHANG W, et al. Effects of different zinc fertilization methods on yield and grain Zn concentration of maize and wheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(4):76-80.
- [46] CAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2):1-17.
- [47] NUSS E T, TANUMIHARDJO S A. Maize: a paramount staple crop in the context of global nutrition[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2010, 9(4):417-436.
- [48] RASADO J L, HAMBIDGE K M, MILLER L V, et al. The quantity of zinc absorbed from wheat in adult women is enhanced by biofortification[J]. *Journal of Nutrition*, 2009, 139(10):1920-1925.
- [49] 陈晨.叶面施锌对不同氮处理水稻稻米锌营养的影响[D].扬州:扬州大学,2022. CHEN C. Effects of foliar zinc application on zinc nutrition of rice grains under different nitrogen treatments[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [50] 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.
- [51] 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. Effects of ZnO NPs application on grain zinc content and zinc utilization of wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4):7-14.
- [52] ZHANG T, SUN H D, LÜ Z Y, et al. Using synchrotron-based approaches to examine the foliar application of ZnSO₄ and ZnO nanoparticles for field-grown winter wheat[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66:2572-2579.
- [53] 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.
- [54] SOUZA G A, HART J J, CARVALHO J G, et al. Genotypic variation of zinc and selenium concentration in grains of Brazilian wheat lines [J]. *Plant Science*, 2014, 224:27-35.
- [55] GERM M, PONGRAC P, REGVAR M, et al. Impact of double Zn and Se biofortification of wheat plants on the element concentrations in the grain[J]. *Plant Soil and Environment*, 2013, 59(7):316-321.
- [56] 高慧雅,张爱军,赵丽.叶面喷施锌硒肥对谷子抗氧化酶活性及籽粒锌硒含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(9):1724-1731. GAO H Y, ZHANG A J, ZHAO L. Effects of foliar application of zinc and selenium on the antioxidant enzyme activities and zinc and selenium contents in millet grains[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9):1724-1731.
- [57] 陈一.日粮添加硒对泌乳高峰期奶牛泌乳性能及乳腺养分代谢的影响研究[D].杭州:浙江大学,2022. CHEN Y. Effects of additional selenium on lactation performance and mammary nutrient metabolism in high-yielding lactating dairy cows[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [58] 辛杭书,雒国斌,赵洪波,等.日粮中添加不同水平的酵母硒对围产后期奶牛抗氧化能和免疫机能的影响[J].中国农业大学学报,2011,16(4):95-101. XIN H S, LUO G B, ZHAO H B, et al. Effects of dietary Se-Yeast supplementation at different levels on antioxidant performance and immune response in postpartum dairy cows [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(4):95-101.