



锌肥施用对我国小麦籽粒锌含量的影响

陶焱金, 井凌琨, 王琪, 胡江鹏, 杜森, 万亚男

引用本文:

陶焱金, 井凌琨, 王琪, 胡江鹏, 杜森, 万亚男. 锌肥施用对我国小麦籽粒锌含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 660–666.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0299>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

配方肥配施锌肥和硫肥对小麦的提质增效作用

袁嫚嫚, 邬刚, 耿维, 王家宝, 井玉丹, 孙义祥

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 518–526 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0169>

叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响

谭骏, 潘丽萍, 黄雁飞, 邢颖, 陈锦平, 刘永贤, 张超兰

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 981–987 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0629>

三种类型阻控剂对不同品种水稻富集镉的影响

龙思斯, 杨益新, 宋正国, 雷鸣, 杨勇, 蒋宏芳, 喻理, 沈跃, 周爽

农业资源与环境学报. 2016, 33(5): 459–465 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0043>

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 545–555 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响

任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 王慧颖, 许发辉, 卢昌艾, 段英华

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 716–725 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0380>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陶焱金, 井凌琨, 王琪, 等. 锌肥施用对我国小麦籽粒锌含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 660–666.

TAO Y J, JING L K, WANG Q, et al. Effects of zinc fertilizer application on zinc content of wheat (*Triticum aestivum* L.) grains in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 660–666.

锌肥施用对我国小麦籽粒锌含量的影响

陶焱金¹, 井凌琨¹, 王琪¹, 胡江鹏², 杜森², 万亚男^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193; 2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100026)

摘要:为了探究锌肥施用对我国小麦籽粒锌含量的影响,本研究通过文献查阅和数据收集,分析了我国小麦籽粒锌含量特征以及不同锌肥施用方式对小麦籽粒锌含量的影响。结果表明,我国小麦锌肥施用方式主要有土壤施用、叶面喷施以及土壤施用+叶面喷施,且土壤施用时的平均投入量($12.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)大于叶面喷施($1.57\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。不施锌肥时小麦籽粒锌含量范围为 $14.6\sim 50.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且95.3%的小麦籽粒锌含量低于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤施用+叶面喷施处理时小麦籽粒锌含量范围为 $24.0\sim 70.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且76.2%的小麦籽粒锌含量高于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。锌肥的施用显著提高了小麦籽粒中的锌含量,不同施肥方式下小麦籽粒锌含量平均增率排序为土壤施用+叶面喷施(62.6%)>叶面喷施(47.2%)>土壤施用(24.6%)。土壤施用或叶面喷施锌肥时,小麦籽粒锌含量增率与外源锌投入量呈显著正相关($P<0.05$),当每公顷锌投入量增加 1 kg 时,籽粒锌含量分别提高0.74%和16.39%。土壤施用、土壤施用+叶面喷施时锌肥的平均利用率较低(0.59%、0.94%),而叶面喷施锌肥平均利用率较高(7.27%)。研究表明,不同施肥方式均能提高小麦籽粒锌含量,且土壤施用+叶面喷施的效果最好,而叶面喷施方式下锌肥利用率最高。

关键词:小麦;土壤施锌;叶面喷锌;锌含量;利用率

中图分类号:S512.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)03-0660-07

doi: 10.13254/j.jare.2022.0299

Effects of zinc fertilizer application on zinc content of wheat (*Triticum aestivum* L.) grains in China

TAO Yanjin¹, JING Lingkun¹, WANG Qi¹, HU Jiangpeng², DU Sen², WAN Yanan^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100026, China)

Abstract: In order to investigate the effects of different application methods of zinc fertilizer on the zinc content of wheat (*Triticum aestivum* L.) grains in China, published literature was reviewed and relevant data was collected for analysis. The results show that the main application methods for zinc fertilizer in China were soil, foliar, and soil+foliar application, and the average zinc input of soil application ($12.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) was higher than that of foliar application ($1.57\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$). The distribution of zinc content in wheat grains without zinc fertilizer ranged from $14.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $50.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 95.3% of wheat grains had zinc content $<40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The distribution of zinc content in grains after soil+foliar application ranged from $24.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $70.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 76.2% of wheat grains had zinc content $>40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The average increase rate of zinc content in grains under different application approaches was as follows: soil+foliar application (62.6%) > foliar application (47.2%) > soil application (24.6%). There was a significant positive correlation between the increase rate of wheat grain zinc content and the amount of exogenous zinc input in soil and foliar application, i.e., when the zinc input increased by 1 kg per hectare, the zinc content in grains increased by 0.74% and 16.39%, respectively. The average utilization efficiency of zinc fertilizer after foliar application (7.27%) was higher than that of soil application (0.59%) and soil+foliar application (0.94%). Therefore, the zinc content of wheat grains could be increased using different application methods; soil+foliar application was most effective, while foliar application possessed the highest zinc utilization efficiency.

Keywords: wheat; soil application of zinc; foliar application of zinc; zinc content; utilization efficiency

收稿日期: 2022-05-17 录用日期: 2022-07-13

作者简介: 陶焱金(1999—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,从事环境污染化学方面的研究。E-mail: 1816685372@qq.com

*通信作者: 万亚男 E-mail: wanyanan@cau.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2022TC121)

Project supported: The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2022TC121)

锌是人类和作物生长发育所必需的一种微量元素,在维持生理功能方面具有重要作用^[1]。锌存在于人体的各个器官中,参与多种酶及DNA和RNA的合成,发挥着维持神经系统、免疫系统和调节生殖激素分泌等作用^[2-3]。人体缺锌会影响智力、免疫系统和生长发育^[4]。在植物体内,锌参与了叶绿素合成、光合作用及呼吸作用等关键生理过程^[5]。作物缺锌会导致叶片失绿、叶脉出现黄斑、叶形变小、生长缓慢等^[6]。刘铮^[7]将土壤有效态锌含量分为5级,绘制了全国土壤有效态锌含量图,而我国小麦主要产区土壤属于缺锌土壤。在农业生产中,大量元素肥料的施用及连续多年高产也会导致农田土壤中微量元素锌的缺乏^[8]。同时,有研究表明我国约有1亿人群锌摄入不足^[9],而造成人体缺锌的主要原因之一是长期大量食用锌含量较低的谷物^[10]。张跃强^[11]测定了我国不同地区991份小麦样品,发现小麦籽粒中锌含量平均值仅为23.3 mg·kg⁻¹,难以满足人体的锌营养健康需求。因此,大力发展富锌农产品对于提升农产品品质和改善人体健康具有重大意义。

为了实现小麦锌生物强化的目的,可以通过选育富集锌的小麦品种等生物技术手段和外源施锌肥等农业措施来提高小麦籽粒锌含量。选育富集锌的小麦品种是一个复杂且耗时的过程,而且新品种可能会因为土壤锌含量偏低而难以发挥其优势。施用锌肥是一个很好的农艺措施,可以克服土壤锌不足,在短时间内显著增加作物籽粒中的锌含量^[12]。研究表明,对小麦进行土壤施用和叶面喷施锌肥均可以促进小麦生长,增加小麦籽粒中锌含量^[13]。通过合理施用锌肥对小麦进行生物强化有助于提高籽粒锌含量并改善人体锌营养健康。因此,本研究通过查阅文献,构建了我国小麦锌肥施用情况数据库,分析了我国小麦籽粒锌含量特征以及锌肥施用对小麦籽粒锌含量的影响,旨在为小麦锌生物强化和锌肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 文献查阅

本研究通过文献查阅和筛选,收集了全国范围内小麦锌肥施用量和籽粒锌含量数据。文献来源是中国知网文献数据库和万方数据库,文献数据主要为近30年的数据。以“小麦”和“锌”为关键字,发表时间选择1990—2021年,共检索得到1 786条结果。筛选的原则如下:试验为大田试验,无污水灌溉,采样点远

离污染源,农田土壤符合我国土壤环境标准,小麦均为成熟期采样。经过筛选,获得关于小麦施用外源锌以及籽粒锌含量的可用文献46篇,将一个处理视为一组数据,根据施肥方式分类,最终获得:210组小麦锌肥施用数据,包括104组土壤施用数据、85组叶面喷施数据以及21组土壤施用+叶面喷施数据;296组小麦籽粒锌含量数据,包括86组不施锌肥时小麦籽粒锌含量数据和210组施用锌肥时小麦籽粒锌含量数据。其中锌肥施用小麦籽粒锌含量数据中,有104组为土壤施用数据,85组为叶面喷施处理数据,21组为土壤施用+叶面喷施处理数据。

1.2 数据处理

根据文献收集获得的数据,分别计算外源锌投入量、籽粒锌含量增率和锌肥利用率。计算公式如下:

$$I = \sum (W_n \times Q_n) \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: I 为外源锌投入量,kg·hm⁻²; W_n 为外源锌肥的锌含量,g·kg⁻¹; Q_n 为锌肥施用量,kg·hm⁻²。

$$C' = \frac{C - C_{ck}}{C_{ck}} \times 100 \quad (2)$$

式中: C' 为籽粒锌含量增率,%; C 为锌肥施用籽粒锌含量,mg·kg⁻¹; C_{ck} 为对照组籽粒锌含量,mg·kg⁻¹。

$$E = \frac{C \times Y - C_{ck} \times Y_{ck}}{I} \times 10^{-6} \times 100 \quad (3)$$

式中: E 为锌肥利用率,%; Y 为锌肥施用籽粒产量,kg·hm⁻²; Y_{ck} 为对照组籽粒产量,kg·hm⁻²。

对外源锌投入量、小麦籽粒锌含量、籽粒锌含量增率、锌肥利用率等数据进行统计分析(包括样本量、最小值、最大值、分位值、平均值及标准差),数据分析与绘图软件为Excel 2016、SPSS 25和Origin 2019b。

2 结果与讨论

2.1 我国小麦锌肥施用方式、锌投入量及锌肥品种

小麦锌肥施用方式主要有土壤施用、叶面喷施以及土壤施用+叶面喷施。土壤施用一般指将锌肥均匀撒到农田并使用机械翻耕,或者是将锌肥溶于水以便更均匀喷施到土壤上;叶面喷施一般是指将锌肥溶入水中,在小麦生长的关键时期,如拔节期、开花期和乳熟期对叶片进行喷施,溶液锌浓度一般为0.3%~0.5%;土壤施用+叶面喷施则是两者的结合^[14]。

锌肥投入量的统计分析如表1所示,几种施用方式下,锌的投入量均呈偏态分布。土壤施用锌肥时,投入量为2.16~33.8 kg·hm⁻²(以Zn计,下同);叶面喷施锌肥时,溶液锌浓度范围为0.1%~0.4%,且最常用的浓度是0.3%,锌投入量为0.23~3.62 kg·hm⁻²;土壤

表1 不同施用方式下锌肥投入量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,以Zn计)Table 1 Zinc fertilizer inputs under different application approaches($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,based on the weight of Zn)

施用方式及样本数 Application approach and sample number	最小值 Minimum	25%	50%	75%	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 SD	分布类型 Distribution pattern
土壤施用 Soil application($n=104$)	2.16	6.75	12.4	16.9	33.8	12.6	7.89	偏态分布
叶面喷施 Foliar application($n=85$)	0.23	0.85	1.35	2.16	3.62	1.57	0.96	偏态分布
土壤施用+叶面喷施 Soil+foliar application($n=21$)	5.54	12.3	13.1	16.5	16.5	13.4	3.55	偏态分布

施用+叶面喷施锌肥时,投入量为 $5.54\sim 16.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。土壤施用锌的投入量大于叶面喷施处理,其算术均值和中位数分别是叶面喷施处理的8.03倍和9.19倍。

通过文献分析发现,硫酸锌和氧化锌是我国最常见的锌肥,此外还有螯合态锌肥(EDTA-Zn)和含锌复合肥料等。其中,硫酸锌作为可溶性锌肥能迅速提高土壤溶液中锌浓度,而氧化锌是一种不溶于水的锌源,其溶解性主要取决于土壤酸碱性,在酸性土壤中氧化锌能迅速转化为可溶态形式^[15]。104组土壤施用锌肥数据中,使用纳米氧化锌和螯合态锌的均只有1组,其余的锌源是一水硫酸锌或七水硫酸锌。85组叶面喷施和21组土壤施用+叶面喷施数据中,均只有1组使用纳米氧化锌,其余的锌源是一水硫酸锌或七水硫酸锌。

2.2 我国小麦籽粒锌含量特征及环境影响因素

小麦籽粒锌含量的统计分析结果如表2和图1所示。由图表可以看出,无论是否施用锌肥,小麦籽粒锌含量均呈偏态分布。不施锌肥时小麦籽粒锌含量范围为 $14.6\sim 50.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中有76.7%的数据分布在 $20\sim 35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,数据分布相对集中。Cakmak^[12]认为籽粒锌含量在 $40\sim 60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时锌营养水平最佳,但不施锌肥时95.3%籽粒锌含量低于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此难以满足大量食用小麦的人群的锌营养需求。土壤施用锌肥时小麦籽粒锌含量范围为 $17.7\sim 59.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中有62.5%的数据分布在 $20\sim 35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,85.6%的小麦籽粒锌含量低于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;叶面喷施锌肥时小麦籽粒锌含量范围为 $17.0\sim 84.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有24.7%的数据分布在 $35\sim 40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,38.8%小麦籽粒

锌含量高于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤施用+叶面喷施处理时小麦籽粒锌含量范围为 $24.0\sim 70.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有76.2%小麦籽粒锌含量高于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

由表2可知,我国小麦籽粒锌含量平均值在不施用锌肥、土壤施用、叶面喷施以及土壤施用+叶面喷施锌肥时分别为 26.2 、 29.9 、 $40.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $46.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Wang等^[16]分析了来源于13个国家的619个小麦籽粒锌含量数据,发现施用锌肥使籽粒锌含量均值从 $28.96\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $36.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中土壤施用、叶面喷施以及土壤施用+叶面喷施时籽粒锌含量平均值分别为 29.39 、 $42.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $40.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Zou等^[17]在7个国家共23个地点进行了小麦锌生物强化试验,结果表明不施用锌肥、土壤施用、叶面喷施以及土壤施用+叶面喷施锌肥时小麦籽粒锌含量平均值分别为 27.4 、 30.5 、 $48.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $49.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤施用+叶面喷施时籽粒锌含量略高于叶面喷施,与本研究结果一致。综合考虑成本与收益,通过叶面喷施锌肥来提高籽粒锌含量的方式更值得推荐。

小麦籽粒锌含量受到土壤中含锌量、pH值、方解石含量、碳酸氢盐含量和有效磷含量等影响^[18]。土壤中有效态锌主要包括锌离子(Zn^{2+})、螯合态锌和有机态锌,植物缺锌时的土壤可能存在以下一种或多种情况:土壤全锌含量低,碳酸盐含量高,有机质含量较高($>3\%$),中性或碱性pH,有效态磷含量高,长期渍水等^[19]。小麦品种不同也是造成锌含量差异的重要原因之一^[20],作物育种长期以产量为导向,而忽略了提高新品种的营养品质,已有研究发现自20世纪60年

表2 不同施用方式下小麦籽粒锌含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 Zinc content in wheat grains under different application approaches($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

施用方式及样本数 Application approach and sample number	最小值 Minimum	25%	50%	75%	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 SD	分布类型 Distribution pattern
不施锌肥 Without zinc fertilizer($n=86$)	14.6	22.3	25.6	30.0	50.0	26.2	6.46	偏态分布
土壤施用 Soil application($n=104$)	17.7	23.3	29.4	35.0	59.0	29.9	8.45	偏态分布
叶面喷施 Foliar application($n=85$)	17.0	32.9	36.5	47.0	84.6	40.4	13.2	偏态分布
土壤施用+叶面喷施 Soil+foliar application($n=21$)	24.0	44.0	44.9	54.5	70.9	46.6	12.7	偏态分布

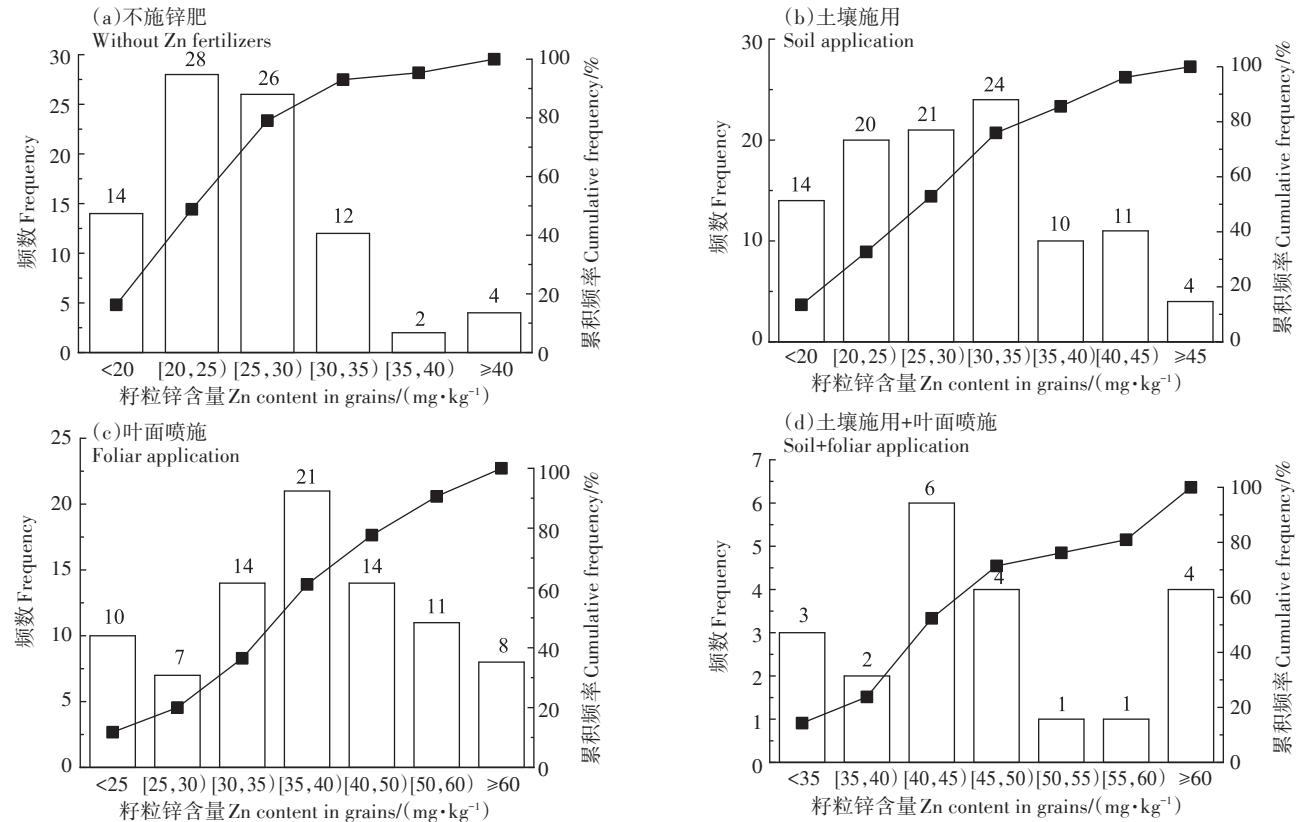


图1 不施或施用锌肥时小麦籽粒锌含量频数分布和累积频率

Figure 1 Frequency distribution and cumulative frequency of Zn content in wheat grains without or with Zn fertilizer application

代以来小麦籽粒中矿物质含量持续下降^[21]。此外,底肥的种类和施用量的不同也可能对小麦的增锌效果产生影响,有研究发现锌肥配合适量氮肥可以更高效提高小麦籽粒锌含量^[22],在开花期后较低的磷肥施用量(<50 kg·hm⁻²)促进了锌的累积及其向籽粒的转移,而较高的磷肥用量(>50 kg·hm⁻²)则降低了植物体内的锌含量^[23]。

2.3 我国小麦籽粒锌含量增率

土壤施用锌肥时,有94.2%的研究结果表现为籽粒锌含量的增加(6组数据中小麦籽粒锌含量与对照相比没有增加,籽粒锌含量增率视为0),而叶面喷施处理和土壤施用+叶面喷施处理均不同程度地增加了小麦籽粒的锌含量。从表3可以看出,不同施肥方式下小麦籽粒锌含量增率均呈偏态分布。土壤施用锌肥使小麦籽粒锌含量提高了0~94.7%,算术平均值

与中位数分别为24.6%和15.2%,有43组数据的籽粒锌含量增率小于10%;叶面喷施处理使小麦籽粒锌含量提高了4.40%~175%,算术平均值与中位数分别为47.2%和40.0%;土壤施用+叶面喷施处理使小麦籽粒锌含量提高了27.7%~130%,算术平均值与中位数分别为62.6%和56.9%。由此可以看出,土壤施用+叶面喷施处理对于提升小麦籽粒锌含量的效果最佳,其次是叶面喷施处理。

研究表明,土壤施用锌肥可改善土壤有效锌供给,缓解小麦锌吸收不足时的抑制效应,促进生长并提高产量,而叶面喷施锌可以更显著地提高籽粒锌含量^[24]。叶面喷施锌肥提高小麦籽粒锌含量的效果优于土壤施用锌肥,可能是因为锌元素在小麦韧皮部具有较高的流动性^[25],叶面喷施锌肥能将小麦中有效锌含量维持在较高的水平,使锌更容易地转运到籽粒

表3 不同施用方式下小麦籽粒锌含量增率(%)

Table 3 Increase rate of zinc content in wheat grain under different application approaches (%)

施用方式及样本数 Application approach and sample number	最小值 Minimum	25%	50%	75%	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 SD	分布类型 Distribution pattern
土壤施用 Soil application (n=104)	0	5.38	15.2	43.4	94.7	24.6	23.5	偏态分布
叶面喷施 Foliar application (n=85)	4.40	21.7	40.0	54.6	175	47.2	34.4	偏态分布
土壤施用+叶面喷施 Soil+foliar application (n=21)	27.7	41.4	56.9	85.2	130	62.6	26.8	偏态分布

中。而土壤施用的锌肥易受土壤因素影响,中性或石灰性土壤施用锌肥易导致 Zn^{2+} 被固定,使锌肥生物有效性降低^[26]。土壤中的 Zn^{2+} 被植物根系吸收后需要经过木质部负载转移到韧皮部,经过多种生理生化反应后,部分锌才能转运到籽粒中累积^[27]。锌肥在土壤中的空间分布及其与根系的接触面也影响锌肥的有效性^[28]。我国小麦主产区华北平原土壤有效锌含量低且成熟阶段气候干燥,也限制了小麦生育后期根对锌的吸收和转运^[29]。曹玉贤等^[30]研究发现施用锌肥后土壤有效锌含量显著提高,但小麦籽粒锌含量没有显著提高,而在小麦生长后期叶面喷施锌肥可以提高小麦籽粒的锌含量。

对小麦籽粒锌含量增率与外源锌投入量进行 Pearson 相关性分析,结果如图2所示。随着施锌量的增加,小麦籽粒锌含量增率呈现出增加的趋势。土壤施用锌肥时,小麦籽粒锌含量增率与锌投入量呈显著正相关 ($P<0.05$),线性回归方程为 $y=0.737\ 8x+15.572$;叶面喷施锌肥时,小麦籽粒锌含量增率与锌投入量也呈显著正相关 ($P<0.01$),线性回归方程为 $y=16.391x+21.438$ 。因此可以得到,每公顷锌投入量增加 1 kg,小麦籽粒锌含量分别提高 0.74%(土壤施用)和 16.39%(叶面喷施)。而土壤施用+叶面喷施锌肥时,小麦籽粒锌含量增率与锌投入量无显著相关性。

2.4 锌肥的利用率

锌肥土壤施用、叶面喷施以及土壤施用+叶面喷施时,分别有 72.1%、67.9% 和 71.4% 的小麦呈现出增产效果。不同施肥方式下小麦籽粒锌肥利用率的统计分析结果如表4所示,锌肥的利用率均呈偏态分布。土壤施用时锌肥的利用率为 0~5.69%,算术平均值与中位数分别为 0.59% 和 0.24%;叶面喷施时锌肥的利用率为 0~34.2%,算术平均值与中位数分别为 7.27% 和 4.03%;土壤施用+叶面喷施时锌肥的利用率为 0.20%~2.38%,算术平均值与中位数分别为 0.94% 和 0.68%。由此可见,土壤施用和土壤施用+叶面喷施处理的锌利用率较低,叶面喷施锌肥的锌利用率最高。叶面喷施锌肥的利用率算术平均值和中位数分别是土壤施用处理的 12.3 倍和 16.8 倍。

锌肥的利用率与小麦产量、小麦籽粒中锌含量和锌肥施用量有关。王孝忠等^[31]通过数据分析发现,土壤施用锌肥提高小麦产量的效果最佳,而且在一定范围内,增产率随着土壤施用锌肥量增加而增加。叶面喷施锌肥对小麦增产效果不明显,可能是因为锌肥施用量较低且易受气候影响,叶面吸收的锌不易转运到小麦根部,难以满足根部对锌的需求^[14]。有研究表明小麦的产量和籽粒中锌含量呈负相关^[32],也有研究表明小麦的产量和籽粒中锌含量之间呈正相关关系^[33],

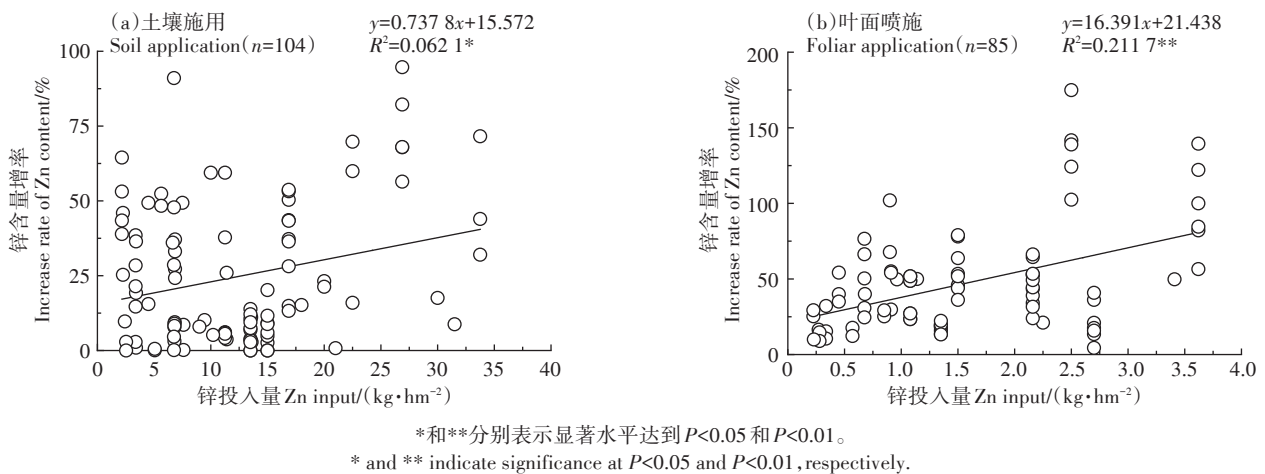


图2 小麦籽粒锌含量增率与外源锌投入量的相关性分析

Figure 2 Correlation analysis of zinc content increase rate in wheat grain with exogenous zinc input

表4 不同施用方式下锌肥的利用率(%)

Table 4 Utilization efficiency of zinc fertilizer under different application approaches (%)

施用方式及样本数 Application approach and sample number	最小值 Minimum	25%	50%	75%	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 SD	分布类型 Distribution pattern
土壤施用 Soil application (n=104)	0	0.10	0.24	0.54	5.69	0.59	0.93	偏态分布
叶面喷施 Foliar application (n=85)	0	2.73	4.03	7.50	34.2	7.27	8.34	偏态分布
土壤施用+叶面喷施 Soil+foliar application (n=21)	0.20	0.50	0.68	1.20	2.38	0.94	0.62	偏态分布

若小麦籽粒中锌含量上升但产量下降也可能导致锌肥利用率下降。陆欣春等^[22]的研究表明,土壤施用锌肥虽然显著提高了土壤有效锌含量,但小麦籽粒锌含量及产量没有显著增加,锌肥的利用率偏低。锌在小麦籽粒中的积累很大程度上依赖于生殖阶段营养组织中锌的再转运^[34],叶面喷施锌肥能维持小麦营养组织中较高浓度的锌,显著促进小麦籽粒锌的生物强化^[20]。同时,喷施锌肥时施用量相对偏低,因此锌肥的利用率较高。李孟华等^[35]的研究也表明在低锌旱地叶面喷施锌肥的锌利用率远高于土壤施用和土壤施用+叶面喷施,叶面喷施时锌肥的利用率为6.02%~9.40%,是土壤施用锌肥的80倍左右。

2.5 不同地区锌肥施用效果

本研究还分析了锌肥施用对不同试验地点(陕西、河北和河南)小麦籽粒锌含量的影响,结果如表5所示。在陕西,对照组小麦籽粒锌含量明显低于河北和河南,土壤施用锌肥未能明显提高籽粒锌含量,可能是土壤锌含量较低,且影响土壤有效锌的因素较多,有研究表明在西北缺锌区不适合通过土壤施用锌肥来提高小麦籽粒锌含量^[35],而叶面喷施及土壤施用+叶面喷施锌肥均使籽粒锌含量增率超过60%。在河北,土壤施用锌肥时籽粒锌含量增率较低,叶面喷施及土壤施用+叶面喷施锌肥时籽粒锌含量和籽粒锌含量增率均较高。在河南,不同锌肥施用方式均使籽粒锌含量超过了40 mg·kg⁻¹,且土壤施用+叶面喷施锌肥的效果显著优于叶面喷施。上述3个地区小麦锌肥利用率最高的方式均为叶面喷施。

3 结论

本研究通过对我国小麦锌肥施用状况以及锌肥

施用方式对小麦籽粒锌含量的影响进行统计和相关性分析,得到以下结论:

(1)我国小麦锌肥施用方式主要有土壤施用、叶面喷施以及土壤施用+叶面喷施,且土壤施用时的平均投入量(12.6 kg·hm⁻²)为叶面喷施(1.57 kg·hm⁻²)处理的8.03倍。

(2)叶面喷施及土壤施用+叶面喷施锌肥可有效提高小麦籽粒锌含量,不同施肥方式下小麦籽粒锌含量平均增率排序为土壤施用+叶面喷施(62.6%)>叶面喷施(47.2%)>土壤施用(24.6%)。土壤施用或叶面喷施锌肥时,小麦籽粒锌含量增率与外源锌投入量均呈显著正相关。

(3)土壤施用及土壤施用+叶面喷施时锌肥的平均利用率较低(0.59%、0.94%),而叶面喷施时锌肥平均利用率较高(7.27%)。

参考文献:

[1] 朱盼盼, 马彦平, 周忠雄, 等. 微量元素锌与植物营养和人体健康[J]. 肥料与健康, 2021, 48(5): 16-18. ZHU P P, MA Y P, ZHOU Z X, et al. Trace element zinc, plant nutrition and human health[J]. *Fertilizer & Health*, 2021, 48(5): 16-18.

[2] GIBSON R S. Zinc deficiency and human health: Etiology, health consequences, and future solutions[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361 (1/2): 291-299.

[3] LEVENSON C W, MORRIS D. Zinc and neurogenesis: Making new neurons from development to adulthood[J]. *Advances in Nutrition*, 2011, 2(2): 96-100.

[4] CHASAPIS C T, LOUITSIDOU A C, SPILIOPOULOU C A, et al. Zinc and human health: An update[J]. *Archives of Toxicology*, 2012, 86(4): 521-534.

[5] CAKMAK I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species[J]. *New Phytologist*, 2000, 146 (2): 185-205.

表5 锌肥施用对陕西、河南和河北地区小麦籽粒锌含量的影响

Table 5 Effects of zinc fertilizer application on zinc content in wheat grains in Shaanxi, Henan and Hebei provinces

试验地点 Experimental location	施用方式 Application approach	对照组籽粒锌含量 Zinc content in grains in control group/(mg·kg ⁻¹)	施肥后籽粒锌含量 Zinc content in grains after fertilizer application/(mg·kg ⁻¹)	籽粒锌含量增率 Increase rate of zinc content in grains/%	锌肥利用率 Utilization efficiency of zinc fertilizer/%
陕西 Shaanxi	土壤施用	21.4	24.9	16.3	0.32
	叶面喷施	24.5	39.3	60.3	4.59
	土壤施用+叶面喷施	24.8	41.4	66.9	0.54
河北 Hebei	土壤施用	32.7	37.7	15.3	0.85
	叶面喷施	30.5	45.9	50.4	12.3
	土壤施用+叶面喷施	30.0	45.9	52.8	1.84
河南 Henan	土壤施用	32.3	40.9	26.6	1.77
	叶面喷施	31.5	46.3	47.0	13.4
	土壤施用+叶面喷施	40.5	64.0	57.8	1.22

- [6] 张莉, 任媛媛, 张岁岐. 锌缺乏对植物生长发育的影响[J]. 现代农业研究, 2020, 26(5): 54–55. ZHANG L, REN Y Y, ZHANG S Q. Effects of zinc deficiency on plant growth and development[J]. *Modern Agriculture Research*, 2020, 26(5): 54–55.
- [7] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994(1): 30–37. LIU Z. Regularities of content and distribution of zinc in soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994(1): 30–37.
- [8] KHOSHGOFTARMANESH A H, SCHULIN R S, CHANEY R L, et al. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(1): 83–107.
- [9] 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 Nutrition*, 2008, 11(6): 632–638.
- [10] GRAHAM R D, WELCH R M, BOUIS H E. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: Principles, perspectives and knowledge gaps[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 70: 77–142.
- [11] 张跃强. 我国小麦玉米籽粒锌营养状况及其调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2012. ZHANG Y Q. The status of grain zinc in wheat and maize from production systems in China and its management[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012.
- [12] ÇAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2): 1–17.
- [13] ÇAKMAK I, KUTMAN U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1): 172–180.
- [14] 庞丽丽, 邹春琴. 主要粮食作物生产体系中锌肥的合理利用[J]. 中国农学通报, 2011, 27(27): 12–17. PANG L L, ZOU C Q. Progress in zinc fertilization in the production system of main cereal crops[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(27): 12–17.
- [15] MCBEATH T M, MCLAUGHLIN M J. Efficacy of zinc oxides as fertilisers[J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 843–855.
- [16] WANG M, KONG F M, LIU R, et al. Zinc in wheat grain, processing, and food[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7: 124.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] ALLOWAY B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, 31(5): 537–548.
- [20] ÇAKMAK I, PFEIFFER W H, MCCLAFFERTY B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87(1): 10–20.
- [21] FAN M, ZHAO F, FAIRWEATHER S J, et al. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2008, 22(4): 315–324.
- [22] 陆欣春, 田霄鸿, 杨习文, 等. 氮锌配施对不同冬小麦品种产量及锌营养的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 923–928. LU X C, TIAN X H, YANG X W, et al. Effect of combination use of Zn and N fertilizers on yield and Zn content in winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5): 923–928.
- [23] ZHANG W, LIU D, LI C, et al. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 155–161.
- [24] ZHAO A, TIAN X, CAO Y, 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.
- [25] HASLETT B S, REID R J, RENDEL Z. Zinc mobility in wheat: Uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots[J]. *Annals of Botany*, 2001, 87(3): 379–386.
- [26] RENDEL Z, BATTEN G D, CROWLEY D E. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60(1/2): 27–40.
- [27] LIU D Y, LIU Y M, ZHANG W, 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.
- [28] LIU D, ZHANG W, PANG L, et al. Effects of zinc application rate and zinc distribution relative to root distribution on grain yield and grain Zn concentration in wheat[J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1/2): 167–178.
- [29] LIU S, MO X, LIN Z, et al. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1195–1209.
- [30] 曹玉贤, 田霄鸿, 杨习文, 等. 土施和喷施锌肥对冬小麦籽粒锌含量及生物有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1394–1401. CAO Y X, TIAN X H, YANG X W, et al. Effects of soil and foliar application of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1394–1401.
- [31] 王孝忠, 田娣, 邹春琴. 锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 998–1004. WANG X Z, TIAN D, ZOU C Q. Yield responses of the main cereal crops to the application approaches and rates of zinc fertilizer in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(4): 998–1004.
- [32] McDONALD G K, GENC Y, GRAHAM R D. A simple method to evaluate genetic variation in grain zinc concentration by correcting for differences in grain yield[J]. *Plant and Soil*, 2008, 306(1/2): 49–55.
- [33] CHATTHA M U, HASSAN M U, KHAN I, et al. Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 281.
- [34] WATERS B M, UAUY C, DUBCOVSKY J, et al. Wheat (*Triticum aestivum*) NAM proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen compounds from vegetative tissues to grain[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(15): 4263–4274.
- [35] 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. Effect of Zn application methods on wheat grain yield and Zn utilization in Zn-deficient soils of dryland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(6): 1346–1355.