

施用纳米氧化锌对小麦籽粒锌含量和锌利用率的影响

张 腾^{1,2},崔利利²,刘艳妮²,马 臣²,李顺莉²,毛 晖^{1,2},王朝辉^{1,2}

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

摘 要:采用田间小区试验,设置不施锌、土施硫酸锌、喷施硫酸锌、土喷结合硫酸锌以及土施纳米氧化锌、喷施纳米氧化锌和土喷结合纳米氧化锌 7 个处理,研究了不同锌肥施用方式对小麦产量、锌等微量元素含量和累积量以及锌利用率的影响。结果表明,各施锌处理对小麦籽粒产量均没有显著影响,而施用纳米氧化锌则显著增加籽粒锌含量,单独土施使锌含量从对照的 18.9 mg·kg⁻¹ 增加至 24.6 mg·kg⁻¹,增幅达 30%;单独喷施籽粒锌含量增加至 28.4 mg·kg⁻¹,增幅达 50%;土喷结合处理籽粒锌含量增加至 30.2 mg·kg⁻¹,增幅达 60%。单独喷施纳米氧化锌处理较硫酸锌处理提高籽粒锌强化指数近 3 倍,达到 9.7 mg·kg⁻¹;籽粒铁含量较喷施硫酸锌提高近 2.5 倍,达到 58.9 mg·kg⁻¹。同时,单独喷施纳米氧化锌显著增加了叶片锌累积量,使得地上部锌利用率达到 35%,较硫酸锌处理增加近 4 倍,差异达到显著水平。由此可见,喷施纳米氧化锌较硫酸锌对提高小麦籽粒锌铁含量有更好的效果,可能由于纳米颗粒的小尺寸效应降低了叶片上锌的脱落。

关键词:纳米氧化锌;喷施;土施;小麦;籽粒锌含量;锌肥利用率

中图分类号:S512.1;S143.7 **文献标志码:**A

Effects of ZnO NPs application on grain zinc content and zinc utilization of wheat

ZHANG Teng^{1,2}, CUI Li-li², LIU Yan-ni², MA Chen², LI Shun-li², MAO Hui^{1,2}, WANG Zhao-hui^{1,2}

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

Abstract: The field plot experiment was conducted to study the effects of different zinc fertilizer applications on the yield, grain zinc content and zinc accumulation and zinc utilization rate of winter wheat. Seven treatments were set up: , no zinc (CK), soil application of ZnSO₄, ZnSO₄ spray, soil+spray ZnSO₄, soil ZnO NPs, ZnO NPs spray and soil+spray ZnO NPs. The results showed that each application of zinc had no significant effect on grain yield, while the application of ZnO NPs significantly increased grain zinc content, and the individual application of soil increased the zinc content from the control's 18.9 mg·kg⁻¹ to 24.6 mg·kg⁻¹ with 30% increase range, ; the grain zinc content of the ZnSO₄ spray increased to 28.4 mg·kg⁻¹, increased by 50%; and the grain zinc content of the soil+spray ZnSO₄ treatment increased to 30.2 mg·kg⁻¹, increased by 60%; ZnO NPs spraying alone improved the grain zinc-enhanced index by nearly 3 times reaching 9.7 mg·kg⁻¹, the grain iron content was increased by 2.5 times compared with ZnSO₄ spray, reaching 58.9 mg·kg⁻¹. At the same time, ZnO NPs spray treatment significantly increased the amount of zinc accumulation in the leaves, making the utilization rate of zinc in the above-ground parts reach 35%, which was nearly 4 times higher than that of ZnSO₄ spray treatment, and reached a significant difference. It can be seen that the application of ZnO NPs compared with other treatments has higher efficiency and efficiency of zinc and iron in wheat grain, which may reduce the shedding of zinc in the leaves due to the small size effect of nanoparticles.

Keywords: ZnO NPs; spraying application; soil application; wheat; grain Zinc content; Zinc fertilizer utilization efficiency

全球近 1/3 人口面临缺锌问题^[1-2]。土壤有效锌含量低造成了作物缺锌^[3-4],进而导致人体缺锌。我国黄土高原 58.62% 的土壤有效锌不足^[5-6],导致该地区粮食作物锌含量较低,难以满足人体锌需求。为了解决这一问题,国内外已经开展了许多关于作物锌强化的研究,主要分为基因强化和农艺强化两种^[7-8]。锌的基因强化需要耗费大量的人力、物力和财力,而且强化后的作物品种会因自然环境等的改变使原本强化的锌基因发生改变,导致强化失败^[7,9],因此锌的农艺强化措施,尤其是施用锌肥仍然是解决作物及人体缺锌的主要措施,它能够在短时间内达到安全增锌的目的^[1,10]。然而,目前施用的锌肥主要是硫酸锌^[1,11],由于作物对其利用率低(土施锌肥锌利用率仅为 0.1% 左右,喷施锌肥也只达到 8% 左右^[4,12]),长此以往就会导致过多的锌肥残留在土壤中,带来一定的重金属污染风险。

近年来,纳米氧化锌作为一种新型材料在工业领域广泛应用^[13-14]。为此,许多学者也开始考虑将纳米氧化锌作为一种锌肥用于改善作物的锌营养^[15-16],如 Lin 等^[17]进行的黑麦草发芽试验表明,当施加纳米氧化锌的浓度超过 100 mg · L⁻¹ 时,其地

下部和地上部的锌浓度均较硫酸锌处理显著增加,Zhao 等^[18]等通过盆栽试验发现,施加 400、800 mg · kg⁻¹ 纳米氧化锌显著增加了黄瓜根、茎、叶以及果实中的锌含量,究其原因是纳米氧化锌与大颗粒的硫酸锌和氧化锌相比,具有更小的尺寸、更大的比表面积以及更高的反应活性,从而被认为可大大提高锌的生物可利用性^[19-20],增加籽粒锌含量,也有可能减少锌肥的用量。但是目前的研究多集中在水培以及盆栽试验,对大田试验的研究则较少。为此,本文通过大田试验研究了几种不同的纳米氧化锌施用方式对冬小麦生长及品质的影响,探索黄土高原典型缺锌地区改善作物缺锌的新途径。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 9 月至 2016 年 6 月在陕西省永寿县御驾宫镇御中村试验基地进行,该地区位于渭北旱塬丘陵沟壑区,是黄土高原典型的雨养农业区,属暖温带大陆性气候,作物一年一熟,土壤类型为黄绵土,年平均降雨量为 610 mm,平均气温为 10.2℃,无霜期 210 d^[21]。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验点土壤基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of the soil

pH	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 Avail. K /(mg · kg ⁻¹)	DTPA - Zn /(mg · kg ⁻¹)	DTPA - Fe /(mg · kg ⁻¹)	DTPA - Mn /(mg · kg ⁻¹)
8.50	15.5	1.04	18.8	154.5	0.58	2.79	7.08

1.2 试验设计

采用田间小区试验,针对不同锌源和不同施锌方式设置了 7 个处理,分别为:①不施锌(CK);②土施硫酸锌(SZn);③叶面喷施硫酸锌(FZn);④土喷结合硫酸锌(SFZn);⑤土施纳米氧化锌(SZnO);⑥叶面喷施纳米氧化锌(FZnO);⑦土喷结合纳米氧化锌(SFZnO)。其中,土施硫酸锌用量为 60 kg · hm⁻²(以 ZnSO₄ · 7H₂O 计,下同);土施纳米氧化锌用量为 102.3 kg · hm⁻²^[13,22];喷施硫酸锌用量为 2.4 kg · hm⁻²[浓度 0.4%(w/v),喷施用量 600 L · hm⁻²];喷施纳米氧化锌用量为 1.2 kg · hm⁻²(600 L · hm⁻²)^[23]。土施均在播前拌土混匀后一次性施入土壤,喷施均在傍晚于小麦冠层处喷洒,在小麦抽穗期喷施。7 个处理氮、磷肥用量相同,分别为 120 kg N · hm⁻² 和 90 kg P₂O₅ · hm⁻²,均在播前作为底肥一次施入,氮肥用尿素和磷酸二铵(计入

随磷肥施入的氮量),磷肥用磷酸二铵。小区面积为 9 m²(3 m×3 m),行距 20 cm,每个处理重复 4 次,采用完全随机区组设计。供试小麦品种为洛旱 6 号,播量为 150 kg · hm⁻²。

1.3 样品采集及测定方法

于小麦播种前,在试验田以“S”型布点采集 5 份表层土样品,风干后测定播前土壤基本理化性质。于小麦成熟期,避开边行和两端,在每个小区分别随机采集两个 1 m² 样方,用于测定籽粒产量和生物量,以烘干重计。由于化学分析的需要,再在每个小区的剩余部分随机选取 2 个 1 m 长样段,将小麦连根拔起后沿根茎结合处将根系减掉,同时采用抖落法收集根际土。把地上部分为茎、叶、穗三部分,风干并称重记录,穗脱粒后称风干籽粒重。然后称取一定量的茎、叶、颖壳、籽粒分别测定其含水量。再从风干样中取一部分样品用蒸馏水冲洗

干净,在烘箱中烘至恒重。之后用碳化钨球磨仪(莱驰 MM 400,德国)粉碎,密封保存。小麦收获后,于每个小区采集 3 份 0~20 cm 土壤样品,混匀后风干备用。

土壤样品磨细并用尼龙筛过筛后测定其基本理化性质^[24]和有效锌、铁、锰(DTPA-Zn、Fe、Mn)含量。土壤有效锌、铁、锰采用 DTPA 浸提,石墨炉火焰原子吸收分光光度计(日立 Z-2000,日本)测定。植物样品采用浓 HNO₃-H₂O₂微波消解(屹尧 WX-8000,中国),石墨炉火焰原子吸收分光光度计测定其锌、铁、锰含量。

1.4 相关指标及计算方法

锌累积量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)= 锌含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\times$ 生物量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)/1000

籽粒锌强化指数[施用 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯锌使籽粒锌含量提高的值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)]=[施锌处理籽粒锌含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)-不施锌处理籽粒锌含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)]/施锌量(以纯锌计)($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[25]。

籽粒锌利用率(%)=[施锌处理籽粒锌累积量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)-不施锌处理籽粒锌累积量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)]/施锌量(以纯锌计)($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times 100$ ^[3]。

总锌利用率(%)=[施锌处理地上部锌累积量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)-不施锌处理地上部锌累积量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)]/施锌量(以纯锌计)($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times 100$ ^[25]。

1.5 数据处理

实验数据处理采用 SPSS 19.0 进行统计分析,采用 LSD 法进行多重比较,显著性差异为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同施锌处理对小麦产量、生物量及收获指数的影响

表 2 为不同锌肥和施用方式对小麦籽粒产量、地上部生物量以及收获指数的影响。与对照相比,施用硫酸锌和纳米氧化锌后,籽粒产量、生物量及收

表 2 不同施锌处理对小麦产量、生物量及收获指数的影响

Table 2 Effects of different Zn treatments on wheat grain yield, biomass and harvest index

处理 Treatment	产量 Grain yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物量 Biomass /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	收获指数 Harvest index/%
CK	7881 $\pm$ 216a	15381 $\pm$ 840a	51 $\pm$ 1.4a
SZnO	7572 $\pm$ 1187a	15253 $\pm$ 1598a	49 $\pm$ 2.8a
FZnO	7300 $\pm$ 437a	14897 $\pm$ 1139a	49 $\pm$ 1.4a
SFZnO	7392 $\pm$ 878a	15057 $\pm$ 1487a	49 $\pm$ 1.1a
SZn	7577 $\pm$ 824a	14876 $\pm$ 867a	51 $\pm$ 1.6a
FZn	7820 $\pm$ 692a	15603 $\pm$ 851a	50 $\pm$ 1.7a
SFZn	6775 $\pm$ 490a	13973 $\pm$ 876a	49 $\pm$ 2.1a

注:同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

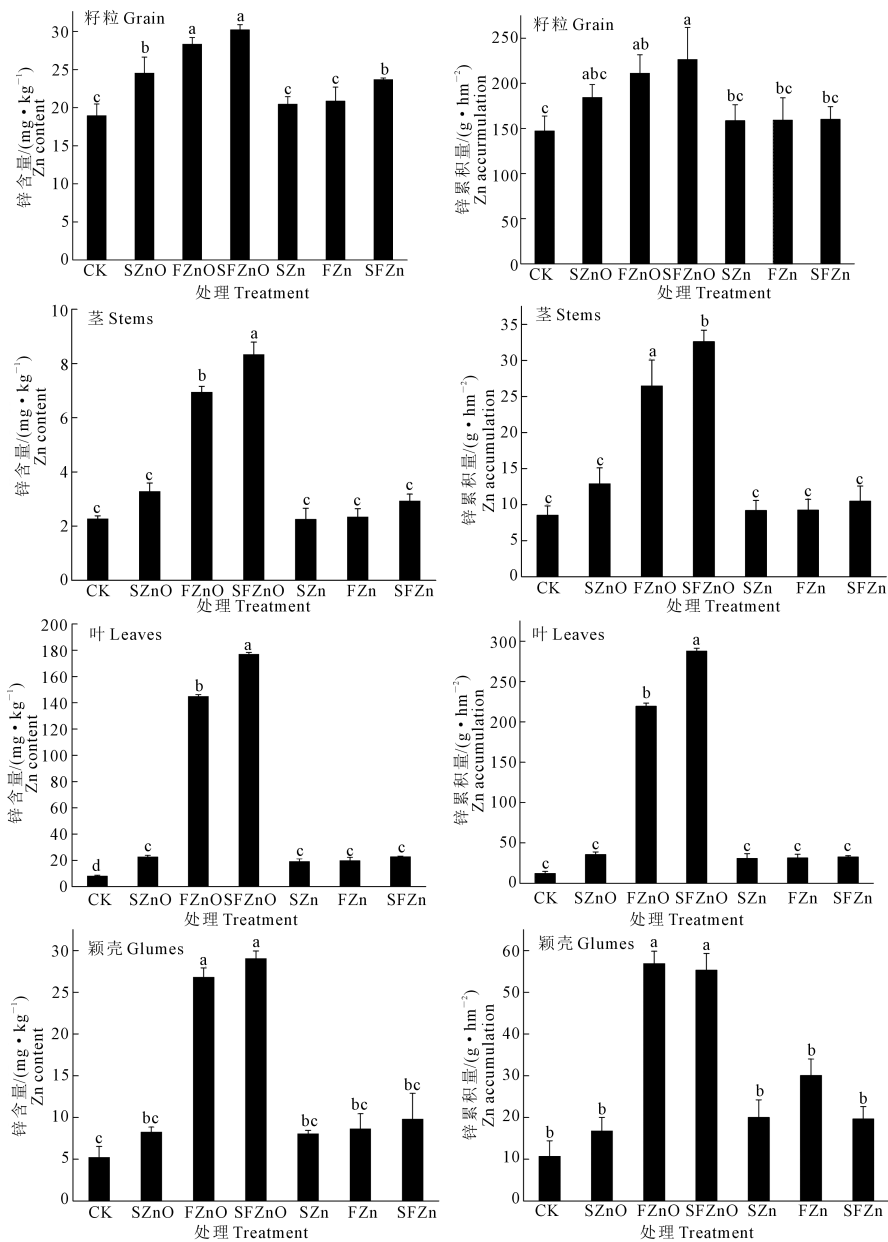
获指数均没有显著差异。7 个处理的籽粒产量平均值为 $7\,457 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,生物量平均为 $15\,027 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,收获指数平均为 49.5%。

2.2 不同施锌处理对小麦各器官锌含量及累积量的影响

各处理对收获期小麦地上部各器官锌含量和累积量的影响基本一致(图 1),均表现为锌肥的施用显著增加锌含量和累积量,且纳米氧化锌的效果优于硫酸锌。对籽粒而言,纳米氧化锌的三种施用方式均显著提高锌含量,土施使锌含量从对照的 $18.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅达 30%;喷施和土喷结合则使籽粒锌含量从对照的 $18.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加到 $28.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $30.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,提高了 50% 和 59%;累积量从 $147.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加到 $211.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $226.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,提高了 43% 和 54%。对茎秆而言,喷施以及土喷结合纳米氧化锌两种施锌处理使得锌含量从对照的 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加到 $6.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别提高了 206% 和 270%;累积量从 $8.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加到 $26.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $32.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较对照各提高了 211% 和 283%。与茎和籽粒相比,喷施以及土喷结合纳米氧化锌两种处理使叶中锌含量从对照的 $8.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加到 143.9 和 $177.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较对照分别提高了 1697% 和 2110%;累积量从 $12.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加到 219.2 、 $280.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别提高了 1 726% 和 2 233%。喷施以及土喷结合纳米氧化锌两种处理颖壳中锌含量从 $5.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加到 $26.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $29.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别提高了 413% 和 455%;累积量从对照的 $10.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加到 $56.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $55.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别提高了 432% 和 418%。可见,喷施的锌一部分被小麦吸收利用,转移到籽粒中,同时还有很大一部分未被利用,残留于茎叶以及颖壳中。

2.3 不同施锌处理对小麦各器官锌累积分配百分比的影响

由图 2 可知,各纳米氧化锌处理均显著影响地上部各器官锌累积分配百分比,且喷施和单独土施之间存在着显著差异。对单独土施而言,锌累积分配百分比表现为籽粒>叶>颖壳>茎;对喷施而言,则表现为叶>籽粒>颖壳>茎。对硫酸锌处理而言,土施和喷施则没有差异,均表现为籽粒>叶>颖壳>茎。从图中还能够看出,与对照相比,各施锌处理均降低了籽粒锌累积分配百分比,尤其是喷施锌肥。可能由于营养器官与生殖器官对锌的转运存在障碍,喷施的锌没有完全被植物吸收利用而残留在叶片所致^[12]。



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different small letters indicate significant differences ($P<0.05$) among treatments.

图 1 不同施锌处理对小麦各器官锌含量及积累量的影响

Figure 1 Effects of different Zn treatments on Zn content and accumulation of wheat organs

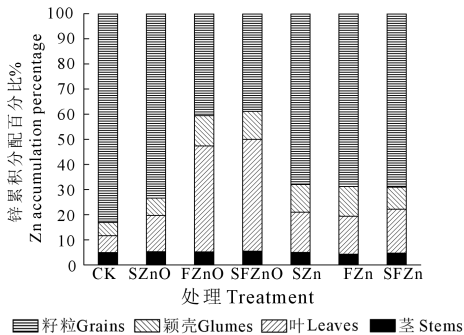


图 2 不同施锌处理对小麦地上部各器官锌积累分配百分比的影响
Figure 2 Effects of different Zn treatments on Zn accumulation percentage of above-ground organs of wheat

2.4 不同施锌处理对小麦锌肥利用效率的影响

籽粒锌强化指数以及籽粒锌利用率和总锌利用率作为评价锌肥利用效率的重要指标,对于指导合理施用锌肥具有重要意义^[25]。7 种不同锌肥施用方式对小麦锌肥利用效率的影响见表 3。单独喷施纳米氧化锌对籽粒锌强化指数、籽粒锌利用率以及总锌利用率的影响最显著。从图中还能够看出,虽然单独喷施硫酸锌的效果不如纳米氧化锌,但是对于土施而言,纳米氧化锌和硫酸锌处理之间并没有差异。

表 3 不同施锌处理对小麦锌肥利用效率的影响

Table 3 Effects of different Zn treatments on wheat Zn utilization efficiency

处理 Treatment	籽粒锌强化指数 Grain Zn bio- fortification index/(mg·kg ⁻¹)	籽粒锌利用率 Grain Zn utilization efficiency/%	总锌利用率 Total Zn utilization efficiency/%
CK	—	—	—
SZnO	0.07±0.01c	0.04±0.03c	0.08±0.04c
FZnO	9.71±1.74a	6.63±2.72a	35.54±2.51a
SFZnO	0.14±0.01c	0.10±0.05c	0.56±0.03c
SZn	0.13±0.03c	0.10±0.05c	0.16±0.09c
FZn	3.47±0.07b	2.20±0.07b	9.42±0.01b
SFZn	0.33±0.08c	0.09±0.02c	0.32±0.07c

2.5 不同施锌处理对小麦各器官铁、锰含量的影响

由表 4 可以看出,除喷施纳米氧化锌外,其余处理对各器官铁含量均没有显著影响。对于小麦茎,喷施纳米氧化锌使铁含量平均提高了 13%;对叶片

表 4 不同施锌处理下小麦各器官铁、锰含量/(mg·kg⁻¹)

Table 4 Effects of different Zn treatments on Fe and Mn of wheat organs

处理 Treatment	茎 Stems		叶 Leaves		颖壳 Glumes		籽粒 Grains	
	Fe	Mn	Fe	Mn	Fe	Mn	Fe	Mn
CK	87.6±0.55b	31.1±0.06a	747.5±4.55b	191.6±1.13a	271.9±0.67b	83.0±0.89a	47.8±0.18b	50.1±0.76a
SZnO	86.1±1.31b	31.5±0.10a	746.1±3.67b	192.6±0.02a	267.3±0.75b	83.1±0.04a	47.1±1.21b	51.5±0.05a
FZnO	98.8±1.03a	31.4±0.79a	900.5±2.36a	193.0±0.09a	309.5±0.64a	83.5±1.21a	58.8±0.73a	49.6±0.07a
SFZnO	97.5±0.44a	31.6±1.34a	903.5±0.95a	190.8±1.34a	303.5±4.56a	82.6±0.78a	58.5±0.72a	49.9±0.88a
SZn	85.5±1.24b	31.9±0.51a	745.4±4.53b	193.1±0.04a	269.8±0.97b	82.9±1.78a	46.4±0.45b	50.6±0.37a
FZn	88.1±0.67b	32.7±0.11a	750.3±3.51b	194.6±0.78a	272.0±1.31b	83.3±0.03a	47.1±1.55b	50.4±0.14a
SFZn	87.7±0.21b	32.3±1.49a	757.6±7.03b	194.0±2.43a	275.0±4.14b	83.3±0.56a	48.9±2.34b	51.2±0.45a

表 5 不同施锌处理下小麦成熟期土壤有效锌、铁、锰含量/(mg·kg⁻¹)

Table 5 Effects of different Zn treatments on DTPA – Zn, Fe and Mn of mature period soil

处理 Treatment	DTPA – Zn		DTPA – Fe		DTPA – Mn	
	根际土 Rhizosphere soil	0~20cm	根际土 Rhizosphere soil	0~20cm	根际土 Rhizosphere soil	0~20cm
CK	0.29±0.03c	0.46±0.03b	1.50±0.05a	7.44±0.07a	4.46±0.40a	12.01±0.24a
SZnO	9.24±0.25a	1.06±0.08a	1.09±0.08c	5.55±0.68c	4.38±0.28a	11.88±0.31a
FZnO	0.33±0.09c	0.50±0.08b	1.47±0.01a	7.38±1.24a	4.59±0.16a	11.32±1.21a
SFZnO	9.47±0.78a	1.18±0.11a	1.08±0.05c	5.47±0.08c	4.76±0.20a	12.20±0.78a
SZn	2.56±0.76b	0.54±0.05b	1.29±0.07b	6.27±1.45b	4.55±0.35a	12.31±1.11a
FZn	0.35±0.11c	0.50±0.05b	1.48±0.09a	7.40±0.21a	4.66±0.75a	11.96±0.38a
SFZn	2.61±0.34b	0.53±0.01b	1.28±0.02b	6.31±0.89b	4.54±0.53a	11.51±0.97a

3 讨 论

3.1 不同施锌处理对小麦籽粒产量和生物量的影响

本试验田的 DTPA – Zn 为 0.58 mg·kg⁻¹,处于 0.5~1.0 mg·kg⁻¹之间,属于潜在缺锌土壤。土施、喷施以及土喷结合硫酸锌均没有提高小麦产量和生物量,这与杨月娥^[25]和李孟华^[4]等在这一地区的研究结果一致。Du 等^[22]在常熟农业生态试验站进行的大田微区试验表明,土施纳米氧化锌没有显著

和颖壳,喷施使得铁含量分别提高了 20% 和 12%;对籽粒,则提高了 22%。两种锌肥的施用均没有改善地上部各器官锰含量。

2.6 不同施锌处理对土壤有效锌、铁、锰含量的影响

由表 5 可见,不同施锌处理对根际土和表层土壤有效锌的影响趋于一致,均表现为土施和土喷结合锌肥显著增加土壤中有效锌含量,但施用纳米氧化锌的影响更显著,土施纳米氧化锌使根际土有效锌含量从对照的 0.3 mg·kg⁻¹增加到 9.3 mg·kg⁻¹,平均提高了 3 128%;表层土有效锌含量较对照平均提高了 143%。但是土施锌肥均显著降低了根际土和表层土中有效铁含量,尤以纳米氧化锌处理更显著,各处理之间土壤有效锰含量没有差异。

影响小麦生物量;Torabian 等^[23]则研究了喷施纳米氧化锌对向日葵的影响,结果表明喷施对其地上部生物量没有显著影响。这些均与本试验研究结果一致,即土施或者喷施纳米氧化锌对小麦产量和生物量没有显著影响。由此可见,对于黄土高原典型的雨养农田来说,单纯施锌肥不能达到增产目的^[12]。

3.2 不同施锌处理对籽粒锌含量及锌肥利用率的影响

相较于硫酸锌,喷施纳米氧化锌在较低的用量

水平下,达到籽粒锌含量和累积量显著提高效果,分析其原因是纳米颗粒的小尺寸效应减少了叶面纳米氧化锌的脱落,从而利于向籽粒转移。Erenoglu 等^[25]采用 Zn^{65} 同位素标记手段研究了小麦对锌的吸收利用,结果也表明叶面喷施锌肥可以使锌更高效地转移到籽粒中。Prasad 等^[26]于 2010 年进行大田喷锌的试验表明,即使纳米氧化锌的用量减少到硫酸锌用量的 1/15,花生果实中的锌含量仍然较硫酸锌处理高 42%,达到 $40.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对土施硫酸锌而言,由于石灰性土壤本身较高的 pH 值以及碳酸钙含量使得施入的锌肥很快转化为钝化形态^[12],而降低其生物有效性。关于土施纳米氧化锌后其存在形态的转变也有报道,Wang 等^[27]研究了盆栽条件下土施纳米氧化锌后其在豇豆以及土壤中形态,结果表明,纳米氧化锌在土壤进行了快速溶解,豇豆地上部锌的存在形态与对照相比没有差异。但值得注意的是,此试验所用的两种土——老成土和氧化土均呈酸性,这极大地增加了纳米氧化锌的溶解。Milani 等^[28]研究了在没有植物生长的条件下,石灰性土壤中施入尿素或者磷酸二铵包裹的纳米氧化锌后锌形态的转变,结果显示,纳米氧化锌与尿素混合施入土壤后,尿素表面仍存在氧化锌,而与磷酸二铵包裹之后,其表面的锌则主要以 $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Zn}(\text{NH}_4)\text{PO}_4$ 两种钝化形态存在,这可能是由于尿素较高的 pH 值降低了纳米氧化锌的溶解和扩散所致。之后随着试验时间的延长,两者均以钝化形态存在。表明土施纳米氧化锌同样会存在钝化的问题而降低植物利用效率。

目前评价锌肥利用效率的参数主要有:籽粒锌利用率、总锌利用率以及籽粒锌强化指数^[3,29]。本试验中,土施和土喷结合处理的籽粒锌利用率均很低,平均为 0.065%;总锌利用率均高于籽粒,可能与土施增加地上部其它器官的锌累积量有关,但仍低于 0.6%。长此以往,势必会导致土壤重金属累积风险。相较于土施,单独喷施锌肥则显著增加了两者的量,其中喷施纳米氧化锌的提高幅度均是硫酸锌的 3 倍。且喷施纳米氧化锌对籽粒锌强化指数的贡献也已达到硫酸锌的近 3 倍,达到了 $9.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即每公顷喷施 1 kg 纯锌,可使小麦籽粒锌含量平均提高 $9.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这显著高于杨月娥等^[29]在全国 31 个试验站的平均结果 ($4.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,喷锌量为 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,以 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 计)。说明喷施纳米氧化锌可以作为一种提高作物锌含量和吸收量的有效途径。

3.3 不同施锌处理对小麦各器官铁、锰含量的影响

施用锌肥不仅对小麦各器官锌含量有影响,对其它微量元素也会产生影响。本研究中,单独土施锌肥没有显著影响地上部各器官铁含量,这可能与植物体内锌铁转运蛋白的调控作用有关^[30-31]。王衍安等^[32]通过实验也发现,与根系中铁含量随锌含量的增加而增加相反,苹果叶中铁含量却没有显著变化。相比土施,喷施两种不同的锌肥对铁含量的影响效果不同。喷施硫酸锌铁含量没有增加,而喷施纳米氧化锌则显著增加了各器官的铁含量,这与 Dimkpa 等^[33]的研究结果一致。其可能原因是喷施的小尺寸纳米氧化锌通过叶片上的气孔、排水孔、皮孔以及角质层^[34]等进入组织中增加了锌含量,植物为了保持体内离子平衡,相应的金属转运体就会开始工作^[30],而铁在韧皮部的转移又处于中间位置^[35],这就会出现锌增加的同时铁含量也增加。相比于铁,各处理对锰含量均没有影响。这与 Mukherjee 等^[36]的研究结果一致,可能由于锰的转移性较差,限制了器官中锰的转运所致^[37]。另外值得注意的是,本研究中喷施纳米氧化锌不仅显著增加了籽粒中的锌含量,同时也极大地增加了铁的含量。在铁缺乏与锌缺乏是同等重要的情况下^[10,38],喷施纳米氧化锌对于改善这一问题就显得尤为重要。

3.4 不同施锌处理对成熟期土壤有效锌、铁含量的影响

虽然土施锌肥均显著增加了根际土、表层土的有效锌含量,但是对于黄土高原干旱地区来说,水分才是限制农作物生长的关键因素,而且在小麦生长后期籽粒中的锌主要来自于营养器官的再转移,这两种因素的联合作用使得成熟期土壤有效锌含量很高而地上部锌含量却很低。土施锌肥在增加土壤有效锌含量的同时却显著降低了土壤有效铁含量。这是因为土施锌肥后,土壤中有效锌含量大幅度提高,而有效铁含量仍很低(播前 DTPA-Fe 为 $2.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} < 4.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于极低的水平),因此植物为了充分利用有限的铁,就会出现根际土有效铁含量显著低于表层土的现象。有研究得出,遏兰菜和拟南芥根中铁和锌浓度呈正相关^[39],根系中锌含量增加铁含量也随之增加,土壤中铁含量就会相应减少,这可能是由于高锌诱导植物根系 *FRO1*、*FRO2*、*FRO3* 和 *IRT1*、*IRT2* 等锌铁转运蛋白基因的超表达,增强了根系对铁的吸收所致^[10]。喷施则可能只增加了地上部各器官对铁的吸收,但并没有改变土壤中铁含量,具体机理有待深入研究。

4 结 论

施用两种锌肥均没有提高籽粒产量。土施硫酸锌和纳米氧化锌使土壤有效锌含量分别提高了8.6倍和31倍,但籽粒锌含量却没有显著增加。单独喷施纳米氧化锌则显著提高了籽粒锌和铁的含量,使籽粒锌强化指数达到 $9.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著优于硫酸锌的 $3.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,也优于全国31个试验点的平均值 $4.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [29]。同时,喷施纳米氧化锌也显著提高了地上部总锌利用率,达到35%。因此,通过喷施纳米氧化锌提高黄土高原潜在缺锌区作物锌营养,是一条有效和环境友好的新途径。

参 考 文 献:

- [1] Manzeke G M, Mtambanengwe F, Nezomba H, et al. Zinc fertilization influence on maize productivity and grain nutritional quality under integrated soil fertility management in Zimbabwe[J]. *Field Crops Research*, 2014, 166(9): 128-136.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 刘合满,张兴昌,苏少华.黄土高原主要土壤锌有效性及其影响因素[J].*农业环境科学学报*, 2008, 27(3): 898-902.
- [6] 景可.黄土与黄土高原[J].*大自然*, 2005, 3(1): 11-15.
- [7] 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(1-2): 279-290.
- [8] 郝元峰,张勇,何中虎.作物锌生物强化研究进展[J].*生命科学*, 2015, 27(8): 1047-1054.
- [9] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1-2): 1-17.
- [10] Palmgren M G, Clemens S, Williams L E, et al. Zinc biofortification of cereals: problems and solutions[J]. *Trends in Plant Science*, 2008, 13(9): 464-473.
- [11] Prasad R, Shivay Y S, Kumar D. Agronomic biofortification of cereal grains with iron and zinc[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 125: 55-91.
- [12] 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.
- [13] García C, Babin M, Obrador A, et al. Integrating ecotoxicity and chemical approaches to compare the effects of ZnO nanoparticles, ZnO bulk, and ZnCl₂ on plants and microorganisms in a natural soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(21): 16803-16813.
- [14] Dimkpa C O, Latta D E, McLean J E, et al. Fate of CuO and ZnO nano- and microparticles in the plant environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(9): 4734-4742.
- [15] Liu R Q, Lal R. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 131-139.
- [16] Ditta A A, Muhammad. Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2016, 5(2): 209-229.
- [17] Lin D, Xing B. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(15): 5580-5585.
- [18] Zhao L J, Sun Y P, Hernandez J A, et al. Influence of CeO₂ and ZnO Nanoparticles on Cucumber Physiological Markers and Bioaccumulation of Ce and Zn: A Life Cycle Study[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(49): 11945-11951.
- [19] Watson J L, Fang T, Dimkpa C O, et al. The phytotoxicity of ZnO nanoparticles on wheat varies with soil properties[J]. *Bio-Metals*, 2015, 28(1): 101-112.
- [20] Dimkpa C O, McLean J E, Britt D W, et al. Bioactivity and Bio-modification of Ag, ZnO, and CuO Nanoparticles with Relevance to Plant Performance in Agriculture [J]. *Industrial Biotechnology*, 2012, 8(6): 344-357.
- [21] 李孟华,于荣,杨月娥,等.低锌旱地土壤水分对小麦产量和锌利用的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 388-394.
- [22] Du W, Sun Y, Ji R, et al. TiO₂ and ZnO nanoparticles negatively affect wheat growth and soil enzyme activities in agricultural soil.[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, 13: 822-828.
- [23] Torabian S, Zahedi M, Khoshgoftar A H. Effects of foliar spray of two kinds of zinc oxide on the growth and ion concentration of sunflower cultivars under salt stress [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(2): 172-180.
- [24] 鲍士旦,土壤农化分析[M].(第三版).北京:中国农业出版社,2000.
- [25] Erenoglu B, Nikolic M, Römhelt V, et al. Uptake and transport of foliar applied zinc (⁶⁵Zn) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 251-257.
- [26] Prasad T, Sudhakar P, Sreenivasulu Y, et al. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35(6): 905-927.
- [27] Wang P, Menzies N W, Lombi E, et al. Fate of ZnO nanoparticles in soils and cowpea (*Vigna unguiculata*)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(23): 13822-13830.
- [28] Milani N, Hettiarachchi G M, Kirby J K, et al. Fate of Zinc Oxide nanoparticles coated onto macronutrient fertilizers in an alkaline calcareous Soil[J]. *PlosOne*, 2015, 10(5): e126275.
- [29] 杨月娥,王森,王朝辉,等.我国主要麦区小麦籽粒锌含量

(上接第6页)

- [18] 赵长盛,胡承孝,孙学成,等.温度和水分对华中地区菜地土壤氮素矿化的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(7):861-866.
- [19] Sierra J. Relation between mineral N content and N mineralization rate in disturbed and undisturbed soil samples incubated under field and laboratory condition[J]. Aust. J. Soil Res., 1992, 30(4): 477-92.
- [20] 李贵才,韩兴国,黄建辉,等.森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J].生态学报,2001,21(7):1187-1195.
- [21] 杨小红,董云社,齐玉春,等.内蒙古羊草草原土壤净氮矿化研究[J].地理科学进展,2005,24(2):30-37.
- [22] 巩杰,黄高宝,陈利顶,等.旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究[J].干旱地区农业研究,2003,21(3):69-73.
- [23] 陈海藩,韩蔚娟,邹春野,等.黑土氮素矿化规律的研究[J].东北农业科学,2016,41(1):59-63.
- [24] 章燕平.环境因素对菜地土壤氮素转化及其生物学特性的影响[D].杭州:浙江大学,2010.
- [25] Zhang H Y, Liu Q J, Yu X X, et al. Effects of plastic mulch duration on nitrogen mineralization and leaching in peanut (*Arachis hypogaea*) cultivated land in the Yimeng Mountainous Area[J]. China. Agr. Ecosyst. Environ., 2012, 158: 164-171.
- [26] Stanford G, Epstein E. Nitrogen mineralization-water relations in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(1): 103-107.
- [27] Hai L, Li X G, Liu X E, et al. Plastic Mulch Stimulates Nitrogen Mineralization in Urea-Amended Soils in a Semiarid Environment[J]. Agron. J., 2015, 107(3): 921-930.
- [28] 董放,王媛,关维刚,等.旱地不同栽培模式和施氮对土壤水分、温度及氮素矿化的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(12):108-114.