

# 土施和无人机配施锌肥对小麦产量和籽粒锌铁硒含量的影响

王 澜<sup>1,2</sup>, 蒋曦龙<sup>2,3</sup>, 陈利容<sup>2</sup>, 孔玮琳<sup>2</sup>, 贤伟华<sup>4</sup>, 马国兴<sup>5</sup>, 夏海勇<sup>1,2,6,7\*</sup>

(1. 山东师范大学生命科学学院, 济南 250014; 2. 山东省农业科学院作物研究所/山东省作物遗传改良与生态生理重点实验室/小麦玉米国家工程实验室, 济南 250100; 3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 4. 东明县植物保护站, 山东 东明 274500; 5. 东明县益康源食品有限公司, 山东 东明 274507; 6. 山东省农业科学院(菏泽)小麦产业技术研究院, 济南 250100; 7. 青岛农业大学农学院, 山东 青岛 266109)

**摘要:** 探讨不同施锌方式及锌肥用量对冬小麦产量及籽粒锌(Zn)、铁(Fe)和硒(Se)含量的影响, 以为小麦微量元素营养强化提供理论和技术依据。采用田间裂区试验, 在无人机统一喷施富硒肥基础上, 设置土施锌肥(Z)和无人机叶面喷施锌肥(F)两个施肥方式, 主区土施锌肥设置0、30 kg/hm<sup>2</sup>两个水平(Z<sub>0</sub>、Z<sub>1</sub>), 副区无人机叶面喷施设置锌肥0、4.5、9、13.5 kg/hm<sup>2</sup>四个梯度(F<sub>0</sub>、F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub>), 测定小麦成熟期籽粒产量及籽粒Zn、Fe和Se元素含量。结果表明:(1)土施+喷施锌提高了小麦产量、穗长和穗粒数, 对穗数与千粒重无显著影响, 与对照Z<sub>0</sub>F<sub>0</sub>和Z<sub>1</sub>F<sub>0</sub>相比, Z<sub>1</sub>F<sub>3</sub>处理增产13.29%~19.37%。(2)土施、喷施锌肥能提高小麦籽粒锌含量, Z<sub>0</sub>F<sub>1</sub>、Z<sub>1</sub>F<sub>1</sub>、Z<sub>1</sub>F<sub>2</sub>与Z<sub>1</sub>F<sub>3</sub>处理籽粒锌浓度分别为43.00、43.20、54.23、41.07 mg/kg, 达到籽粒锌强化目标值40~45 mg/kg, 较对照增加17.44%~55.08%。(3)叶面喷施富硒肥配合锌肥施用能够改善小麦籽粒硒营养品质, 小麦籽粒硒含量为0.22~0.37 mg/kg, 满足硒生物强化目标值0.15 mg/kg; 对小麦籽粒铁含量无显著影响。(4)土施锌肥配合无人机叶面喷施锌硒肥使小麦增收2 858.8~6 679.8元/hm<sup>2</sup>。通过土施锌肥配合无人机喷施锌硒肥是提高潜在性缺锌土壤上小麦籽粒产量及籽粒锌和硒微量元素含量较为经济的方式, 对改善小麦微量元素营养品质有较好作用。

**关键词:** 锌; 硒; 无人机; 籽粒产量; 生物强化

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)02-0016-05

## Effects of Soil and UAV Spraying Zn Applications on Wheat Grain Yield and Contents of Zn, Fe, Se in Grains

WANG Lan<sup>1,2</sup>, JIANG Xilong<sup>2,3</sup>, CHEN Lirong<sup>2</sup>, KONG Weilin<sup>2</sup>, XIAN Weihua<sup>4</sup>, MA Guoxing<sup>5</sup>, XIA Haiyong<sup>1,2,6,7\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Shandong Normal University, Ji'nan 250014; 2. Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Shandong Provincial Key Laboratory of Crop Genetic Improvement, Ecology and Physiology/National Engineering Laboratory for Wheat and Maize, Ji'nan 250100; 3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193; 4. Plant Protection Station of Dongming County, Dongming 274500; 5. Yikangyuan Food Co., Ltd., Dongming 274507; 6. Wheat Industrial Technology Research Institute of Heze, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100; 7. College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** The effects of different application methods and amounts of zinc (Zn) fertilizer on wheat grain yields and accumulation of Zn, iron (Fe) and selenium (Se) in grains were investigated to provide theoretical and technical basis for wheat grain micronutrient biofortification. In addition to the Se-rich fertilizer uniformly sprayed by the unmanned aerial vehicle (UAV), the current split-plot field experiment included two soil Zn application rates (0 and 30 kg/ha; Z<sub>0</sub>, Z<sub>1</sub>) as the main plots and four foliar Zn application rates (0, 4.5, 9, 13.5 kg/ha; F<sub>0</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>) as the split-plots. Wheat grain yields and grain Zn, Fe and Se concentrations were determined at maturity. The results indi-

收稿日期: 2020-11-24

基金项目: 山东省重点研发计划(公益性科技攻关类)项目(2018GNC111012); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2016B04); 山东农业大学作物生物学国家重点实验室开放课题(2016KF05)

作者简介: 王 澜(1996-), 女, 在读硕士, 主要从事植物营养与生理生态方面的研究。

通讯作者: 夏海勇, 男, 博士, 副研究员, E-mail: haiyongxia@cau.edu.cn

cated that: (1) Soil + foliar applications of Zn fertilizer increased wheat grain yields, spike length and number, and had no significant effects on ear number and thousand-kernel weight. Compared with  $Z_0F_0$  and  $Z_1F_0$ ,  $Z_1F_3$  increased the wheat grain yield by 13.29%–19.37%. (2) Soil and UAV spraying applications of Zn fertilizer could increase grain Zn concentrations. The grain Zn concentrations in treatments of  $Z_0F_1$ ,  $Z_1F_1$ ,  $Z_1F_2$  and  $Z_1F_3$  were 43.00, 43.20, 54.23 and 41.07 mg/kg respectively, which had reach the target value of zinc biofortification 40–45 mg/kg and increased by 17.44%–55.08% when compared with the control. (3) The UAV Se-rich fertilizer foliar spraying in combination with Zn application could improve the nutritional quality of wheat grain Se and the grain Se concentrations ranged among 0.22–0.37 mg/kg, which meet the target value of Se biofortification 0.15 mg/kg. There was no significant effect on Fe concentrations in wheat grains.(4) Soil Zn application in combination with UAV spraying applications of Zn and Se fertilizer increased wheat revenue by 2,858.8–6,679.8 yuan/ha. Therefore, it is a more economical way to increase grain yields and Zn and Se concentrations in wheat grains in zinc-deficient soil by applying Zn fertilizer in soil and spraying Zn and Se fertilizer with UAV simultaneously, which has a better effect on improving nutritional quality of wheat micronutrient.

**Key words:** Zinc; Selenium; Unmanned aerial vehicle (UAV); Grain yield; Biofortification

人体锌元素缺乏是一个重要的世界性问题,以谷物为主食的地区缺锌尤其严重<sup>[1]</sup>。小麦作为我国主要谷物粮食作物,占人均每天能量摄取量的30%,其营养品质直接影响人体健康。满足人体健康需求的小麦籽粒锌元素营养目标值为40–45 mg/kg<sup>[2–3]</sup>,而我国小麦籽粒锌含量平均仅为23.3 mg/kg<sup>[4–5]</sup>,远低于营养目标值,土壤中的有效锌含量低是造成我国小麦籽粒锌含量偏低的主要因素。因此,通过施用锌肥来补充作物锌吸收,对提高小麦锌营养具有十分重要的意义<sup>[6]</sup>。

锌是植物生长所需的重要微量元素,在小麦生长发育过程中起着重要作用,是其他元素不可替代的<sup>[7]</sup>。研究表明,施用锌肥能明显促进小麦生长发育,对构成产量的各要素起到促进作用,进而提高小麦产量<sup>[8–12]</sup>。土施锌肥因可以同时保证产量和籽粒锌含量的提高而被广泛应用<sup>[13]</sup>,但是,土施锌肥仅有0.5%~4.0%被作物吸收,土施锌肥的利用率偏低也是目前亟待解决的问题<sup>[14]</sup>。通过叶面喷锌保持叶片中大量生理有效锌也是提高产量和籽粒锌浓度的重要手段<sup>[15–16]</sup>,叶面喷锌是一种具有可操作性强、效率高和成本低等优点的技术,对改善小麦籽粒锌含量起关键作用<sup>[17–18]</sup>。也有研究表明,锌、硒、铁之间存在一定协同吸收作用<sup>[19]</sup>,硒具有促进植物生长发育,参与调控植物光合和呼吸,抵御植物体内自由基的伤害、提高植物抗逆能力等作用。植物是自然界硒生态循环中的关键性中间环节,可把土壤环境中无机形态的硒转化为生物有机态硒,是人和动物摄入硒的重要来源<sup>[20]</sup>。然而仅靠天然食物中的硒含量往往达不到0.15 mg/kg的生物强化目标值,不足以满

足人体的正常需要。通过叶面喷施等生物强化措施可有效提高作物硒富集程度,为人类提供更安全、有效的植物性硒源<sup>[21]</sup>。目前,我国叶面肥喷施仍以传统的人力背负喷杆喷雾器喷雾为主,药液使用量大,药液污染、漏喷现象严重,农药利用率低(35%左右)且施药效果差<sup>[22]</sup>。

无人机叶面喷施作为一种新型的农药、肥料喷洒技术,是目前农业机械行业的研究热点之一,其具有环境适应性强、人工效率高、肥料利用效率高、减轻环境污染、降低施肥成本等特点,真正意义上实现了降低人工成本、高效率、环保又安全的农业诉求<sup>[23]</sup>。与此同时,精准施肥在精准农业中起着举足轻重的作用,但目前无人机精准施肥技术还未成熟,在喷施叶面液态肥方面的应用需进一步研究<sup>[24]</sup>,以实现无人机智能化、精准化、多元化的发展目标,配合无人机植保技术,通过肥、药同喷可以进一步降低生产成本,提高生产效率与经济效益。

本文通过土施锌肥配合无人机叶面喷施锌硒肥技术,设计土施/喷施锌肥梯度,配合喷施硒肥,以期探究土施锌肥配合无人机叶面喷施锌硒肥技术对小麦产量及籽粒锌、铁和硒含量的影响,同时评估这一技术的经济效益,为微量元素综合施肥理论和技术提供有效支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验于2019年10月~2020年6月在山东省菏泽市东明县马头镇麦丰小麦种植专业合作社柳园基地(35°02'N, 115°07'E, 海拔60 m)开展。试验

点处于中纬度地带,土壤类型为壤土,属暖温带季风气候。季风明显、四季分明、冬冷夏热、雨热同期。本试验的前茬作物为夏玉米,长势收成均较好。小麦播前耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质:土壤pH 8.27,有机质含量 13.4 g/kg,全氮 0.79 g/kg,土壤有效磷 5.6 mg/kg,速效钾 39.6 mg/kg。

## 1.2 试验设计

试验于2019年10月5日播种,2020年5月29日收获。供试小麦品种为济麦44。试验采用裂区设计,主区为2个土施锌肥(Z)水平( $Z_0$ : 0 kg/hm<sup>2</sup>、 $Z_1$ : 30 kg/hm<sup>2</sup>),副区为4个无人机叶面喷施锌肥(F)水平( $F_0$ : 0 kg/hm<sup>2</sup>、 $F_1$ : 4.5 kg/hm<sup>2</sup>、 $F_2$ : 9 kg/hm<sup>2</sup>、 $F_3$ : 13.5 kg/hm<sup>2</sup>),对照处理(CK: 0 kg/hm<sup>2</sup>)为喷施等体积去离子水,单个试验小区面积 20 m×10 m=200

m<sup>2</sup>,重复三次;所有试验小区均用无人机统一叶面喷施硒肥。试验锌肥采用天津科密欧的ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O(优级纯),锌肥在小麦花后5天开始用无人机叶面喷施,之后每隔10天喷施一次,单次喷施量0、1.5、3、4.5 kg/hm<sup>2</sup>,共3次;硒肥采用菏泽市东明县马头镇麦丰小麦种植专业合作社生产的富硒肥2号(亚硒酸钠含量 1.1 g/L),硒肥分别在小麦抽穗和灌浆期用无人机各喷施一次,单次“富硒肥2号”喷施量 7.5 kg/hm<sup>2</sup>,共2次,具体喷施用量设计见表1。小麦播种前施入 750 kg/hm<sup>2</sup>复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O: 26-7-7)作为基肥,返青-拔节期追施尿素 300 kg/hm<sup>2</sup>;同时将土施锌肥(ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O)配制成溶液均匀喷施在小区土壤表面,再进行旋耕、播种。

表1 土施锌与叶面喷施锌和硒试验处理

处理编号	土施七水 硫酸锌量 (kg/hm <sup>2</sup> )	单次七水 硫酸锌量 (kg/hm <sup>2</sup> )	次数	喷施七水 硫酸锌总量 (kg/hm <sup>2</sup> )	单次喷施 富硒肥量 (kg/hm <sup>2</sup> )	亚硒酸 钠纯度 (g/hm <sup>2</sup> )	次数	喷施富硒 肥总量 (kg/hm <sup>2</sup> )	亚硒酸 钠总量 (g/hm <sup>2</sup> )
Z <sub>0</sub> F <sub>0</sub>	0	0	3	0	7.5	8.25	2	15	16.5
Z <sub>0</sub> F <sub>1</sub>	0	1.5	3	4.5	7.5	8.25	2	15	16.5
Z <sub>0</sub> F <sub>2</sub>	0	3	3	9	7.5	8.25	2	15	16.5
Z <sub>0</sub> F <sub>3</sub>	0	4.5	3	13.5	7.5	8.25	2	15	16.5
Z <sub>1</sub> F <sub>0</sub>	30	0	3	0	7.5	8.25	2	15	16.5
Z <sub>1</sub> F <sub>1</sub>	30	1.5	3	4.5	7.5	8.25	2	15	16.5
Z <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	30	3	3	9	7.5	8.25	2	15	16.5
Z <sub>1</sub> F <sub>3</sub>	30	4.5	3	13.5	7.5	8.25	2	15	16.5

## 1.3 测定指标与方法

小麦收获后,进行人工考种、脱粒。脱粒后的籽粒用去离子水清洗,并于60~65℃烘箱中烘至恒重。取部分烘干样品于不锈钢研磨机中研磨粉碎,粉碎样品中微量元素采用美国环保署推荐HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>方法进行消解(EPA,1996),采用电感耦合等离子体发射光谱仪和质谱仪测定消化液中的锌铁硒浓度。

## 1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2007软件进行数据处理,用SPSS 18.0软件对数据进行方差分析(ANOVA),并在5%水平上用最小显著性差异法比较平均值;采用双因素方差分析产量、产量构成和籽粒养分含量的交互作用及显著性影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 无人机叶面喷施锌硒肥对产量及产量构成因素的影响

锌硒肥喷施与土壤施用交互作用对小麦籽粒

产量影响显著(表2)。其中Z<sub>1</sub>F<sub>3</sub>处理产量最高,为7 926.71 kg/hm<sup>2</sup>,比其他处理增产13.29%~19.37%;与对照相比,单独土壤施用锌肥能够增产1.32%~18.13%,单独喷施锌肥能够增产0.33%~14.93%,但处理间差异不显著。产量构成方面,锌硒肥喷施与土壤施用交互作用对小麦穗长、穗数和千粒重均无显著性影响,对穗粒数影响显著;处理间比较,施用锌肥增加了小麦的穗数,单独喷施锌肥Z<sub>0</sub>F<sub>2</sub>处理较对照穗数增加23.7%,达显著性差异,其他处理较对照处理穗数有所增加,但未达显著性差异;锌硒肥喷施与土壤共同施用能够有效提高小麦穗粒数,相较于单独喷施叶面锌硒肥穗粒数增加13.42%~24.7%;小麦籽粒的千粒重则没有受到锌肥施用的影响表现出明显增加的趋势。土壤施用锌肥与无人机叶面喷施锌肥较单独喷施锌肥处理,小麦穗长增加1.72%~8.95%;处理间比较,无人机叶面喷施锌硒肥处理较对照不施锌处理显著提高穗长,增幅为2.38%~9.26%。

表2 不同处理对小麦产量及产量构成的影响

土施处理	喷施处理	穗长(cm)	穗数( $\times 10^4$ 个/hm <sup>2</sup> )	穗粒数	千粒重(g)	产量(kg/hm <sup>2</sup> )
Z <sub>0</sub>	Z <sub>0</sub> F <sub>0</sub>	7.66±0.33c	543.42±19.44b	27.67±4.04bc	41.89±1.09a	6806.70±802.58a
	Z <sub>0</sub> F <sub>1</sub>	7.93±0.21bc	598.71±64.90ab	27.00±2.00c	40.71±2.70ab	6996.70±804.14a
	Z <sub>0</sub> F <sub>2</sub>	8.37±0.19ab	672.86±64.89a	30.33±1.16bc	41.47±1.68a	7040.04±885.05a
	Z <sub>0</sub> F <sub>3</sub>	8.13±0.15abc	581.76±54.74ab	27.33±1.53bc	40.80±0.77ab	6710.03±1631.48a
Z <sub>1</sub>	Z <sub>1</sub> F <sub>0</sub>	8.47±0.32ab	565.96±54.72b	31.67±4.04ab	37.14±1.44b	6896.70±450.34a
	Z <sub>1</sub> F <sub>1</sub>	8.64±0.33a	598.26±2.55ab	33.67±0.58a	41.27±1.64a	6640.03±999.55a
	Z <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	8.27±0.38abc	587.58±21.89ab	30.00±0.20ab	39.03±4.00ab	6920.02±340.44a
	Z <sub>1</sub> F <sub>3</sub>	8.61±0.63a	635.71±58.07ab	31.00±1.00ab	36.99±3.99b	7926.71±551.85a
方差分析	土壤施用(Z)	**	**	***	**	ns
	叶面喷施(F)	**	ns	***	**	ns
	Z*F	ns	ns	**	ns	**

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ),“Z\*F”表示土施锌肥和叶面喷施锌肥共同作用,“ns”表示差异不显著,“\*\*”和“\*\*\*”分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的条件下差异显著,下同

## 2.2 无人机叶面喷施锌硒肥对籽粒微量元素含量的影响

由表3可以看出,土壤施用锌肥、无人机叶面喷施锌肥能够有效提高小麦籽粒锌含量。Z<sub>0</sub>F<sub>1</sub>, Z<sub>1</sub>F<sub>1</sub>, Z<sub>1</sub>F<sub>2</sub>和Z<sub>1</sub>F<sub>3</sub>处理籽粒锌浓度分别为43.00、43.20、54.23、41.07 mg/kg,均达到锌籽粒强化目标值40~45 mg/kg。相比于无人机叶面单独喷施锌硒肥,土壤施用与叶面喷施共同施用能够提升籽粒锌含量0.36%~37.53%。不同处理间籽粒铁含量无显著差异。喷施硒肥能够提高籽粒硒含量,其中土壤施用锌肥30 kg/hm<sup>2</sup>、叶面喷施4.5 kg/hm<sup>2</sup>锌肥处理Z<sub>1</sub>F<sub>1</sub>籽粒硒含量最高,为0.37 mg/kg,较其他处理达显著差异。

## 2.3 经济效益分析

如表4所示,土壤施锌肥及无人机叶面喷施锌

表3 不同处理对小麦籽粒锌铁硒浓度的影响 mg/kg

土施锌肥处理	喷施处理	锌	铁	硒
Z <sub>0</sub>	Z <sub>0</sub> F <sub>0</sub>	30.47±0.81c	41.00±4.01a	0.26±0.03b
	Z <sub>0</sub> F <sub>1</sub>	43.00±6.24ab	39.73±1.53a	0.22±0.05b
	Z <sub>0</sub> F <sub>2</sub>	39.43±3.89b	43.03±5.40a	0.28±0.01b
	Z <sub>0</sub> F <sub>3</sub>	38.80±6.76b	45.00±3.86a	0.29±0.05b
Z <sub>1</sub>	Z <sub>1</sub> F <sub>0</sub>	34.97±2.25b	46.67±5.44a	0.25±0.07b
	Z <sub>1</sub> F <sub>1</sub>	43.20±0.92b	39.70±6.35a	0.37±0.02a
	Z <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	54.23±5.22a	44.27±1.10a	0.23±0.07b
	Z <sub>1</sub> F <sub>3</sub>	41.07±2.84b	44.33±2.93a	0.27±0.05b

硒肥能有效增加小麦经济收益。其中单独喷施锌硒肥Z<sub>0</sub>F<sub>1</sub>和Z<sub>0</sub>F<sub>2</sub>处理的粮食收益高于Z<sub>0</sub>F<sub>0</sub>、Z<sub>0</sub>F<sub>3</sub>处理;土壤施锌肥及无人机叶面喷施锌硒肥处理间比较,Z<sub>1</sub>F<sub>3</sub>处理增收效益最高,为6 679.8元/hm<sup>2</sup>。

表4 不同施肥处理小麦经济效益

土施锌肥	喷施处理	小麦产量(kg/hm <sup>2</sup> )	籽粒价格(元/kg)	粮食收益(元/hm <sup>2</sup> )	锌硒肥成本(元/hm <sup>2</sup> )	无人机喷施成本(元/hm <sup>2</sup> )	增收收益(元/hm <sup>2</sup> )
Z <sub>0</sub>	Z <sub>0</sub> F <sub>0</sub>	6 806.70	2.2	14 973.20	-	-	-
	Z <sub>0</sub> F <sub>1</sub>	6 996.70	3	20 990.10	19.5	100	5 938.4
	Z <sub>0</sub> F <sub>2</sub>	7 040.04	3	21 120.12	39.0	100	6 048.9
	Z <sub>0</sub> F <sub>3</sub>	6 710.03	3	20 130.09	58.5	100	5 039.3
Z <sub>1</sub>	Z <sub>1</sub> F <sub>0</sub>	6 896.70	2.4	16 552.08	389.7	-	-
	Z <sub>1</sub> F <sub>1</sub>	6 640.03	3	19 920.09	409.2	100	2 858.8
	Z <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	6 920.02	3	20 760.06	428.7	100	3 679.3
	Z <sub>1</sub> F <sub>3</sub>	7 926.71	3	23 780.13	448.2	100	6 679.8

注:普通小麦收购价2.2元/kg,富锌小麦收购价2.4元/kg,富硒+锌小麦收购价3元/kg

## 3 讨论与结论

在本研究中,田间条件下土施锌肥配合无人机

喷施叶面锌肥一定程度提高了小麦穗数、穗长和穗粒数,Z<sub>1</sub>F<sub>3</sub>处理小麦产量达到7 926.71 kg/hm<sup>2</sup>,较对照增产13.29%~19.37%,具有明显的增产效应,这

与前人报道一致<sup>[25-26]</sup>。而单独使用无人机叶面喷施锌硒肥对小麦成穗数和穗长影响显著,较对照增产0.33%~14.93%,对千粒重和穗粒数无显著影响,这与前人研究结果有所不同<sup>[27-29]</sup>,可能与小麦不同时期喷施锌肥有关。综合来看,喷施锌硒肥配合土施锌肥相较于单一措施更有助于提高小麦籽粒产量,但施锌用量则需要进一步探讨优化。

本研究中,通过土施锌肥配合无人机叶面喷施锌硒肥,能够有效提高小麦籽粒锌含量,这与前人研究相一致<sup>[30]</sup>。锌硒肥共同喷施能促进小麦籽粒硒含量累积,小麦籽粒硒含量为0.22~0.37 mg/kg,满足硒生物强化目标值0.15 mg/kg。此外研究发现,锌硒肥施用对铁元素影响不显著,这可能与小麦锌、硒、铁三种元素吸收过程中的相互作用(竞争或促进)有关<sup>[31-32]</sup>。因此,通过叶面喷施锌、硒肥能否提高籽粒铁含量仍需进一步研究证实。

本研究利用无人机进行锌硒叶面肥喷施配合土施锌肥提高小麦产量和籽粒品质,叶面喷施13.5 kg/hm<sup>2</sup>锌肥处理较对照经济效益提高6 679.8元/hm<sup>2</sup>,取得较好生产与经济效应。该研究实现了基于无人机叶面喷施配合土施锌肥的综合施肥技术并有效地对小麦生产、品质、经济效果进行评价,研究结果对于提高植保无人机喷施锌肥的作业效率、减少肥料浪费、提高肥料利用率、提高小麦产量品质提供一定的理论依据与技术支持。通过土施锌肥配合无人机喷施叶面锌硒肥是提高潜在性缺锌土壤上小麦籽粒产量及籽粒锌硒等微量元素含量较为经济的方式,对改善小麦微量元素营养品质有较好作用,本研究推荐的锌肥和硒肥施用量(锌肥土施30 kg/hm<sup>2</sup>、叶面喷施13.5 kg/hm<sup>2</sup>,富硒肥2号叶面喷施15 kg/hm<sup>2</sup>)是实际生产中可操作的,经济上是合算的,对农田环境也是安全的。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Welch R M, Graham R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 396: 353-364.
- [ 2 ] Bouis H E, Welch R M. Biofortification- A sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south[J]. *Crop Science*, 2010, 50(2, Suppl. S): S20-S32.
- [ 3 ] Cakmak I, Hoffland E. Zinc for the improvement of crop production and human health[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361: 1-2.
- [ 4 ] Chen X, Zhang Y, Tong Y, et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7016.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Cakmak I, Kutman U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 69(1): 172-180.
- [ 7 ] 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: 167-178.
- [ 8 ] Liu B, Ai S, Zhang W, et al. Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 822-829.
- [ 9 ] Yilmaz A, Ekiz H, Gültekin I, et al. Effect of seed zinc content on grain yield and zinc concentration of wheat grown in zinc-deficient calcareous soils[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21(10): 2257-2264.
- [ 10 ] Gomez-Coronado F, Poblaciones M J, Almeida A S, et al. Zinc (Zn) concentration of breadwheat grown under Mediterranean conditions as affected by genotype and soil/foliar Zn application [J]. *Plant and Soil*, 2016, 401: 331-346.
- [ 11 ] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地小麦长期土施锌肥的增产作用及土壤效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 377-380.
- [ 12 ] 张艳华, 常旭虹, 王德梅, 等. 不同土壤条件下追施锌肥对小麦产量及品质的影响[J]. *作物杂志*, 2019, 35(5): 109-113.
- [ 13 ] Xia H, Wang L, Qiao Y, et al. Elucidating the source-sink relationships of zinc biofortification in wheat grains: a review [J]. *Food and Energy Security*, 2020, 9(4): e243.
- [ 14 ] Singh B, Natesan S K A, Singh B K, et al. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency[J]. *Current Science*, 2005, 88(1): 36-44.
- [ 15 ] 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 Agriculture and Food Chemistry*, 2010, 58(23): 12268-12274.
- [ 16 ] 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: 119-130.
- [ 17 ] 张纪元, 张平平, 马鸿翔, 等. 喷施微肥对小麦产量、品质及籽粒微量元素含量的影响[J]. *江西农业科学*, 2012, 24(3): 64-66.
- [ 18 ] Xue Y F, Yue S C, Zhang Y Q, et al. Grain and shoot zinc accumulation in winter wheat affected by nitrogen management[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361: 153-163.
- [ 19 ] Behera S K, Shukla A K, Singh M V, et al. Yield and zinc, copper, manganese and iron concentration in maize (*Zea mays* L.) grown on vertisol as influenced by zinc application from various zinc fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38(10): 1544-1557.
- [ 20 ] 陈 铭, 谭见安, 王五一, 等. 环境硒与健康关系研究中的土壤化学与植物营养学[J]. *土壤学进展*, 1994, 22(4): 1-10.
- [ 21 ] 曹庆军, 张兆琴, 杨粉团, 等. 叶面喷施硒肥对吉林省春小麦产量及籽粒富硒作用的影响[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(5): 6-8, 46.

厚度、皮渣率不同程度受到细胞质遗传的影响,说明玉米细胞质遗传也占有一定因素。此外,不同糯玉米 $F_1$ 代性状表现与双亲自交系间也有密切联系,在糯玉米制种中不仅要考虑 $F_1$ 制种产量问题,也需要兼顾糯玉米的“食用口感”问题。

综合本研究结果得出,甜糯型糯玉米杂交种吉科糯18和糯玉米杂交种吉糯3号的 $F_1$ 代制种产量、蒸煮品质不受正反交效应影响,在实际生产中正反交组配模式均可用于制种。本试验由于受供试材料数量及试验年限的限制,使得本研究结果不具有全面性,因此在糯玉米种子生产中仍需结合田间实际情况选择最优糯玉米组配模式。

### 参考文献:

- [1] 赵佃英,李寅书,胡婷婷,等.鲜食糯玉米主要农艺性状的遗传相关及通径分析[J].吉林农业科学,2011,36(1):4-7.
- [2] 李艳茹,吉士东,郑大浩,等.糯玉米的营养价值和前景[J].延边大学农学学报,2003,25(2):146-148.
- [3] 谢孝顺,蔡志飞,印志同,等.糯玉米育种概论[J].玉米科学,2003(专刊):58-67.
- [4] 彭泽斌,田志国.我国糯玉米产业现状与发展战略[J].玉米科学,2004,12(3):116-118.
- [5] 贾恩吉,栾奕,车殿珍,等.加工型糯玉米新品种“吉农大糯603”选育报告[J].吉林农业大学学报,2018,40(5):655-658.
- [6] 卢华兵,石丽敏,胡贤女,等.甜糯玉米正反交 $F_1$ 代产量和主要农艺性状的差异性分析[J].浙江农业科学,2015,56(5):633-634.
- [7] 李智海,祖文龙,李宁,等.复合杂交改良西双版纳鲜食小糯玉米研究初报[J].东北农业科学,2019,44(4):1-4,93.
- [8] Coe E H. The properties, origin and mechanism of conversion-type inheritance at the *B* locus in maize[J]. Genetics, 1966, 53: 1035-1063.
- [9] 郭春明,李建平,任景全,等.低温胁迫对玉米光合特性及粒重的影响[J].东北农业科学,2017,42(4):5-10.
- [10] 蔚荣海,祁新,赵仁贵,等.鲜食糯玉米新品种“吉糯3号”选育报告[J].吉林农业大学学报,2006,28(2):139-141.
- [11] 孙伟振,赵森,吴洪婕,等.糯玉米营养品质和风味品质的鉴定分析[J].大麦与谷类科学,2011(4):1-5.
- [12] 许卫猛,邢永峰,魏常敏,等.不同糯玉米自交系正反交 $F_1$ 代产量和品质的差异性分析[J].种子科技,2018,36(5):104-105.
- [13] 曹庆军,杨粉团,姜晓莉,等.玉米抗茎倒能力评价及理想株型[J].东北农业科学,2017,42(2):17-21.
- [14] 孙宁,孟祥盟,边少锋,等.吉林省湿润区不同玉米品种产量及农艺性状比较研究[J].东北农业科学,2017,42(1):5-7.
- [15] 王丹妮.张掖市玉米产业的现状及发展对策分析[D].兰州:兰州大学,2016.
- [16] 赵博,王丽英,蔡菲菲,等.我国种业发展现状、制约问题及战略对策研究[J].种子,2013,32(6):64-66.
- [17] 石清琢,王延波,李哲.玉米单交种正反交 $F_1$ 代产量及主要农艺性状差异初探[J].国外农学—杂粮作物,1999,19(6):37-38.
- [18] 钱洪慧.玉米正反交杂种主要性状相关分析[J].内蒙古农业科技,1996(6):5-6.
- [19] 王天宇,祝云芳,陈华璋,等.玉米正反交杂种 $F_1$ 主要性状的差异性分析[J].玉米科学,2007,15(4):52-55.
- [20] 丰光,刘志芳,吴宇锦,等.玉米正反交对主要性状和产量影响的研究[J].作物杂志,2009(2):70-72.

(责任编辑:王昱)

(上接第20页)

- [22] 刘京蕊,李震,熊波,等.北京设施蔬菜和标准化果园病虫害防治及植保机械使用情况调查[J].农业工程学报,2017,12(7):69-77.
- [23] Tsouros D C, Bibi S, Sarigiannidis P G. A review on UAV-based applications for precision agriculture[J]. Information, 2019, 10(11): 349.
- [24] 田婷,张青,张海东.无人机遥感在作物监测中的应用研究进展[J].作物杂志,2020,36(5):1-8.
- [25] 薛艳芳,李宗新,张慧,等.氮素供应对小麦锌吸收、转运和向籽粒累积影响的研究进展[J].中国农学通报,2015,31(36):24-30.
- [26] Liu D, Liu Y, Zhang W, et al. Zinc uptake, translocation, and remobilization in winterwheat as affected by soil application of Zn fertilizer[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 426.
- [27] 孟丽梅,杨子光,张珂,等.喷施微肥对小麦籽粒产量及微量元素含量的影响[J].安徽农业科学,2014,42(14):283-285.
- [28] 鲁璐,吴瑜.3种微量元素对小麦生长发育及产量和品质的影响研究进展[J].应用与环境生物学报,2010,16(3):435-439.
- [29] 于丽敏,薛艳芳,高华鑫,等.小麦富硒研究进展[J].山东农业科学,2015,47(6):137-144.
- [30] 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.
- [31] Cakmak I, Yilmaz A, Kalayci M, et al. Zinc deficiency as a critical problem in wheat production in Central Anatolia[J]. Plant and Soil, 1996, 180: 165-172.
- [32] 刘玉敏.长期土施锌肥对高产冬小麦-夏玉米轮作体系生态与健康效应的影响[D].北京:中国农业大学,2019.

(责任编辑:王丝语)