

富硒营养素对关中灌区小麦 籽粒硒含量和产量的影响

高国英¹,张睿¹,汪娟梅²,王雅³,黄西社⁴,
武蓉⁵,王云奇¹,王笑鸽¹,赵建云¹

(1.西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100;2.陕西省三原县农业科学技术中心,陕西 三原 713800;
3.陕西省兴平市农业技术推广站,陕西 兴平 713100;4.陕西省武功县农业技术推广站,陕西 武功 712200;
5.陕西省临渭区农业技术推广中心,陕西 渭南 714000)

摘要:为探索适宜关中灌区富硒小麦生产的农艺技术,2018—2019年在关中灌区4个具有代表性的地点三原、兴平、武功和临渭进行试验,供试小麦品种为中麦578,试验设置CK、叶面单次喷施(T₁ 2.7 kg·hm⁻²、T₂ 5.4 kg·hm⁻²)和两次喷施(T₃ 2.7 kg·hm⁻²+2.7 kg·hm⁻²、T₄ 5.4 kg·hm⁻²+2.7 kg·hm⁻²)共5个处理,于抽穗后7 d和14 d进行叶面喷施富硒营养素。结果表明:在2.7 kg·hm⁻²和5.4 kg·hm⁻²单次喷施下,小麦籽粒硒含量较CK分别增加376.83%和604.62%,在单次喷施处理的基础上增加第二次2.7 kg·hm⁻²的喷施,籽粒硒含量分别较T₁、T₂提高193.93%和114.66%;叶面喷施富硒营养素后小麦产量提高3.14%~4.60%,千粒重增加1.01%~1.26%,穗粒数增加0.69%~2.27%,小穗数增加0.66%~2.61%,不孕小穗数增加2.00%~4.70%;首次用5.4 kg·hm⁻²富硒营养素处理使小麦二次加工品质湿面筋含量、稳定时间分别比首次用2.7 kg·hm⁻²处理提高3.49%、8.25%,一次加工品质籽粒硬度、蛋白质含量、沉降值在各处理下差异不显著;富硒营养素总用量相同下T₂单次喷施比T₃分次喷施湿面筋和稳定时间分别提高2.20%和4.73%。叶面喷施富硒营养素的用量和次数皆会影响小麦籽粒硒含量、产量和品质;同时,当地土壤硒含量和肥力状况也会影响叶面喷施富硒营养素后小麦籽粒对硒的富集效果,在关中灌区土壤硒含量丰富地区可采用高富硒营养素用量单次叶面喷施的方式来提高小麦籽粒硒含量,而土壤硒缺乏地区采用低富硒营养素用量多次喷施的方式可更加经济有效地生产籽粒硒含量高且能兼顾产量和品质的小麦。

关键词:富硒营养素;小麦;籽粒硒含量;产量;品质

中图分类号:S512.1 **文献标志码:**A

Effects of selenium-rich nutrient fertilizer on grains selenium content and yield of wheat in Guanzhong irrigation area

GAO Guoying¹, ZHANG Rui¹, WANG Juanmei², WANG Ya³, HUANG Xishe⁴,
WU Rong⁵, WANG Yunqi¹, WANG Xiaoge¹, ZHAO Jianyun¹

(1. College of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Sanyuan Agricultural Science and Technology Center, Sanyuan, Shaanxi 713800, China;

3. Xingping Agricultural Technology Station, Xingping, Shaanxi 713100, China;

4. Wugong Agricultural Technology Promotion Station, Wugong, Shaanxi 712200, China;

5. Linwei Agricultural Technology Promotion Center, Weinan, Shaanxi 714000, China)

Abstract: The purpose of this study was to explore the agronomic technology suitable for the production of selenium-rich wheat in Guanzhong irrigated area to provide technical support for the extension of the industrial chain of strong gluten wheat of Zhongmai 578. The experiment was carried out in four representative locations in Guanzhong irrigation area: Sanyuan, Xingping, Wugong and Linwei. The wheat variety Zhongmai 578 was selected

in the experiment. Five treatments of leaf spraying with selenium-rich nutrient were set including CK, T1 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), T2 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), T3 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and T4 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). With the increase of selenium-rich nutrient dosage, under the single application of $2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the grains selenium content of wheat was increased by 376.83% and 604.62%, respectively. Adding $2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for the second spraying treatment on the basis of two single spraying treatments further increased the grain selenium content by 193.93% and 114.66%, respectively. The yield, 1000-grain weight, grain number per ear, spikelet number and infertility spikelet were increased by 3.14% ~ 4.60%, 1.01% ~ 1.26%, 0.69% ~ 2.27%, 0.66% ~ 2.61% and 2.00% ~ 4.70% with selenium-rich nutrient spraying. Compared with $2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the wet gluten content and stabilization time of secondary processing quality of wheat treated with $5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ selenium-rich nutrients increased by 3.49% and 8.25%, respectively. There were no significant differences in grain hardness, protein content and sedimentation of primary processing quality under different treatments. The wet gluten and stabilization time of T2 with the same total amount of selenium enriched nutrients were increased by 2.20% and 4.73% respectively compared with T3. The amount and a number of times of leaf selenium-rich nutrient spraying affected the grain Se content, yield and quality of wheat. At the same time, the selenium content and fertility of local soil also affected the grain selenium enrichment capability after foliar spraying selenium-rich nutrient. In summary, the relatively high selenium soil in Guanzhong irrigation area is recommended to use a single and high dosage of selenium-rich nutrient spraying on the leaf to improve the grain selenium content, while the selenium deficient area with low dosages and multiple times of selenium-rich nutrient spraying can be an economical way to improve the content of grain selenium, wheat yield and quality of Zhongmai 578 wheat.

Keywords: selenium-rich nutrient; wheat; grains selenium content; yield; quality

硒是人体所必需的微量元素之一,在维持人体生理机能运转,促进人体代谢产生的自由基清除方面发挥着重要作用^[1]。在我国 72% 以上的地区为低硒区或缺硒区^[2-3],生产的作物硒含量低,导致我国居民膳食中硒摄入量仅有中国营养学会推荐人体每日硒摄入量最低标准的一半^[4]。硒在小麦籽粒中主要以有机态存在,占总硒的 83.34%^[5];同时,小麦对硒具有较高生物转化能力,在谷类作物中积累硒能力最强^[6],通过农艺措施就能够显著提高小麦籽粒的硒含量^[7-8]。因此,通过富硒小麦补充人体硒元素是一条简便、快捷的途径。目前富硒小麦生产方式主要有土壤施硒、硒肥浸种和叶面喷施硒肥 3 种,其中叶面喷施硒肥是最环保、高效、低成本的方式^[9-10]。研究表明,叶面喷施硒肥能显著提高小麦籽粒^[11]和面粉^[12]的硒含量,但会因喷施浓度、时期与次数^[13-14],及小麦品种^[15]、硒肥种类^[16]不同而存在差异。施用硒肥也能普遍提高小麦的产量^[17-18],但浓度过高则有降低产量的趋势^[19]。小麦籽粒品质受硒肥的影响也不尽相同^[20-22]。前人通过对小麦不同生育期多次施硒或同一生育期设置施硒肥浓度梯度来研究小麦籽粒硒含量、产量及品质的变化,而在最佳吸收时期多次喷施硒肥对小

麦籽粒硒含量、产量及品质的影响的问题研究较少。为此,本试验选择关中灌区主推的小麦新品种中麦 578,在关中灌区具有代表性的 4 个地点进行试验,以探讨适宜此地区富硒小麦生产的农艺技术,也为强筋小麦中麦 578 产业链延伸提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018—2019 年在陕西省咸阳市武功县武功镇凉马村、三原县陂西镇安乐社区服务中心西毛村、兴平市汤坊镇上新庄村和渭南市临渭区官道镇满寨村 4 个点进行,同属关中灌区,各试验点冬小麦播前土壤表层基础地力水平见表 1。供试作物为小麦品种中麦 578,由中国农业科学院作物科学研究所提供。硒肥采用富硒植物营养素(含有机硒为 $3.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),从长沙福山农业科技有限公司购买。

1.2 试验设计

试验设置 5 个处理,分别为 CK($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、T1 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、T2($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、T3($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和 T4($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。CK、T₁、T₂ 处理均在抽穗 7 d 后兑水 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,

表 1 各试验地冬小麦播前 0~20 cm 土壤基础地力

Table 1 Nutrient status of soil in 0~20 cm before winter wheat seeding in four locations

地点 Site	位置 Location	全氮 Total N /(g · kg ⁻¹)	速效氮 Available N /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg · kg ⁻¹)	速效硒 Available Se /(mg · kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)
三原 Sanyuan	34°61'N, 109°04'E	0.75	12.38	12.50	132.00	0.204	19.53
兴平 Xingping	34°24'N, 108°38'E	1.25	42.40	14.40	276.10	0.200	19.17
武功 Wugong	34°34'N, 108°08'E	1.06	22.71	29.80	256.10	0.039	29.72
临渭 Linwei	34°60'N, 109°46'E	0.52	50.16	8.90	132.20	0.025	21.34

等充分溶解后喷施; T3 为在抽穗 7 d 后先用 2.7 kg · hm⁻² 的富硒营养素进行第一次喷施, 在抽穗 14 d 后再用 2.7 kg · hm⁻² 的富硒营养素进行第二次喷施, 两次兑水均为 450 kg · hm⁻²; T4 为在抽穗 7 d 后先用 5.4 kg · hm⁻² 的富硒营养素进行第一次喷施, 在抽穗 14 d 后再用 2.7 kg · hm⁻² 的富硒营养素进行第二次喷施, 两次兑水均为 450 kg · hm⁻²。选择在没有雨且光照不强的时间段用喷雾器叶面喷施。其他栽培措施各试验地保持一致。试验小区面积为 20 m², 重复 4 次, 随机排列。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 小麦籽粒硒含量测定 小麦籽粒硒含量测定采用微波消解 HG-AFS 法^[23]。先准确称取 0.5000 g (精确到 0.1 mg) 烘干样品 3 份, 将每个样品放入聚四氟乙烯消化罐中, 加 3 ml HNO₃、1.5 ml H₂O₂, 同时做两份空白对照, 摇匀, 盖上垫片旋紧帽盖, 均匀放入微波炉内的转盘上, 中间放一盛水烧杯, 于低档消解 5 min, 中档消解 5~10 min, 冷却, 放入 50 ml 烧杯中, 低温蒸发至 1 ml 左右溶液时, 加入 5 ml 浓度 6 mol · L⁻¹ 的 HCL, 加热煮沸 5~10 min, 冷却, 洗入 10 ml 容量瓶中, 用 6 mol · L⁻¹ 的 HCL 定容, 然后用原子荧光光度计测定硒含量。

1.3.2 小麦产量和穗部性状测定 在成熟期每小区随机取 20 穗, 逐个调查每穗粒数、小穗数和不孕小穗数, 求出均值。每小区收获 4 m², 晒干脱粒后测定含水量 (使用 PM-8188-A 谷物水分测定仪测定) 并称量, 按 13% 含水量计算产量和千粒重。每小区 200 粒。

1.3.3 小麦籽粒品质测定 每小区取 50 g 籽粒样品, 采用德国赛多利斯集团生产的 Sartorius PMD 511-00U 近红外品质分析仪测定籽粒蛋白质含量 (%)、容重 (g · L⁻¹)、硬度 (%)、沉降值 (mL)、湿面筋含量 (%)、稳定时间 (min)。

1.4 数据分析

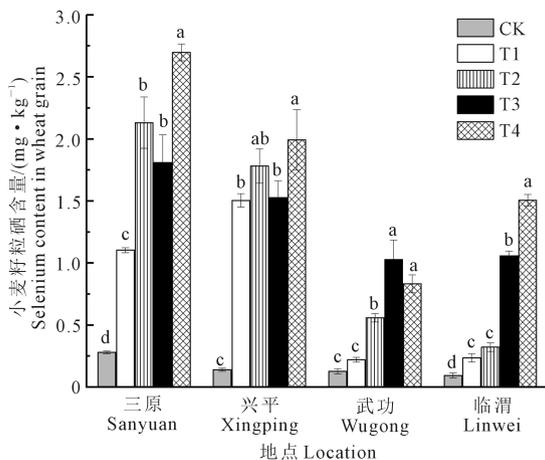
采用 Microsoft Excel 软件进行数据整理, 用 SPSS 20.0 进行方差分析和多重比较, 用 Origin2017 进行作图。

2 结果与分析

2.1 叶面喷施富硒营养素对小麦籽粒硒含量的影响

2.1.1 单次叶面喷施富硒营养素对小麦籽粒硒含量的影响 如图 1 所示, T1 (2.7 kg · hm⁻²) 和 T2 (5.4 kg · hm⁻²) 单次喷施富硒营养素处理显著提高籽粒硒含量, 提高 4.8~7.5 倍, 同时随着富硒营养素用量的增加, 小麦籽粒硒含量显著增加。不同处理小麦籽粒硒含量变化趋势为 CK (0.16 mg · kg⁻¹) < T1 (0.77 mg · kg⁻¹) < T2 (1.20 mg · kg⁻¹), 其中 T1 增幅 481.25%, T2 增幅 750.00%。因此, 单次叶面喷施可显著提高小麦籽粒硒含量, 富硒营养素用量增加 1 倍后籽粒硒含量仍可显著增加, 增幅为 74.85%。

2.1.2 分次叶面喷施富硒营养素对小麦籽粒硒含量的影响 如图 1 所示, T3 (2.7 mg · kg⁻¹ + 2.7 kg · hm⁻²) 分次处理可显著增加籽粒硒含量, 但与同等富硒营养素用量下的 T2 (5.4 kg · hm⁻²) 单次喷施相比, 籽粒硒含量变化在地区间有增有减。T3 分次喷施后 4 个试验点籽粒硒含量分别比 CK 增加了 546.43%、992.85%、692.31% 和 1077.78%。籽粒硒富集效果在地区间存在差异, 三原和兴平在 T2 单次喷施使籽粒硒含量提高 660.71% 和 1171.43% (对应增量为 2.13 mg · kg⁻¹ 和 1.78 mg · kg⁻¹), 而 T3 分次施用籽粒硒含量分别提高了 546.43% 和 992.86% (对应增量为 1.81 mg · kg⁻¹ 和 1.53 mg · kg⁻¹), T3 相比 T2 2 个试验点分别降低 15.02% 和 14.04% (对应减量为 0.32 mg · kg⁻¹ 和 0.25 mg · kg⁻¹), 但与 T2 差异不显著。武功和临渭在 T2 单次喷施使籽粒硒含量提高了 330.77% 和 255.56% (对应增量为 0.56 mg · kg⁻¹ 和 0.32 mg · kg⁻¹), 而 T3 分次施用籽粒硒含量分别提高了 692.31% 和 1077.78% (对应增量为 1.03 mg · kg⁻¹ 和 1.06 mg · kg⁻¹), T3 相比 T2 2 个试验点分别提高 83.93% 和 231.25% (对应增量为 0.47 mg · kg⁻¹ 和 0.74 mg · kg⁻¹), 且与 T2 差异显著。因此, 当施用富硒营养素总量相同时, 若单次喷施使籽粒硒的富集效果达到 6 倍以上, 则分次喷施意义



注:不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。

Note: Different lower case letters indicate significant difference among the treatments at the 0.05 level.

图 1 叶面喷施富硒植物营养素对小麦籽粒硒含量的影响
Fig.1 Effect of foliar spraying of selenium-rich nutrients on selenium content in wheat grains

不大;若单次喷施使籽粒硒的富集效果提高 2~3 倍时,要想达到更好的富硒效果可选用分次喷施。

2.1.3 加次叶面喷施富硒营养素对小麦籽粒硒含量的影响 如图 1 所示, T3、T4 分别在 T1 和 T2 第一次富硒营养素用量基础上再用 $2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的富硒营养素增加一次喷施皆可显著增加小麦籽粒硒含量,但籽粒硒富集效果在地区间存在差异。其中, T1 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 T3 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理组, T3 加次喷施后小麦籽粒硒含量比 T1 增加了 193.93%, 增量为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。三原、兴平、武功、临渭增幅分别为 64.55%、1.32%、368.18%、341.67%。T2 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 T4 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理组, T4 加次喷施后小麦籽粒硒含量比 T2 增加了 114.66%, 增量为 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。三原、兴平、武功、临渭增幅分别为 26.76%、11.80%、48.21%、371.88%。结果表明, 增加喷施次数可进一步提高小麦籽粒硒含量 154.30%, 但首次喷施富硒营养素用量加倍后进行第二次喷施的效果不及首次富硒营养素用量较低时进行二次喷施的效果。

2.1.4 首次高浓度叶面喷施富硒营养素对小麦籽粒硒含量的影响 如图 1 所示, T4 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 是所有处理中两次喷施且富硒营养素用量最大的处理, 相比 T3 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 仍可使籽粒硒含量增加, 且在 3 个试验点处理间差异显著。在三原、临渭和兴平 T4 比 T3 籽粒硒含量表现为增加, 增幅分别为 49.17%、42.45%

和 30.07%, 前两地差异显著, 而武功籽粒硒含量减少了 19.42%, 差异不显著。因此, 当喷施富硒营养素的总用量接近小麦吸收可接受的阈值时, 即使选用相对高效的分次喷施方式, 小麦籽粒硒含量的增加程度也会被限制。

2.2 叶面喷施富硒营养素对小麦产量和穗部性状的影响

叶面喷施富硒营养素处理小麦产量和穗部性状的变化见表 2。不同处理对小麦产量、千粒重、小穗数、穗粒数和不孕小穗有一定影响, 喷施可增产 3.14%~4.60%, 其中, T1、T2、T3 和 T4 产量分别较 CK 增加了 3.22%、3.44%、4.60% 和 3.14%, 三原和武功试验点 T3 与 CK 差异显著, 三原试验点 T2 与 CK 间也差异显著。上述结果说明, T3 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 分次喷施增产效果优于其他处理; 对于 T1 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 T2 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 单次喷施处理, 随着富硒营养素用量的增加小麦产量也增大, 但在 T2 用量的基础上又增加了一次 $2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 喷施即 T4 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 则导致产量降低, 说明富硒营养素用量过大增产幅度也会降低。

与 CK 相比, 喷施富硒营养素对千粒重和穗粒数没有显著影响, 处理间差异不显著。其中, T1、T2、T3 和 T4 千粒重较 CK 分别增加 1.13%、1.26%、1.26% 和 1.01%, 穗粒数较 CK 分别增加 1.82%、1.54%、2.27% 和 0.69%, 其增加趋势与产量一致。因此, 叶面喷施后穗粒数的增加使小麦增产, 但其对富硒营养素用量响应程度比千粒重高, 富硒营养素用量过大则会导致其增产效果减弱。

与 CK 相比, 喷施富硒营养素处理对小穗数和不孕小穗数影响不显著。其中, T1、T2、T3 和 T4 处理的小穗数分别较 CK 增加 2.61%、0.66%、1.61% 和 1.76%; 不孕小穗数分别增加 4.70%、2.00%、4.62% 和 5.54%; 不孕小穗占比分别增大 0.44%、0.33%、0.64% 和 0.86%。叶面喷施富硒营养素后小穗数呈增加趋势, 不孕小穗数也相应增多, 但不孕小穗占比差异很小, 所以不孕小穗数是随小穗基数增加而增多。

2.3 叶面喷施富硒营养素对小麦籽粒加工品质的影响

由表 3 可以看出, 小麦籽粒容重, 籽粒硬度、湿面筋、蛋白质含量、沉降值在地点间差异极显著, 稳定时间地点间差异显著; 叶面喷施富硒营养素后, 使籽粒湿面筋含量处理间差异极显著, 稳定时间处理间差异达到显著; 地点与喷施处理间交互作用仅湿面筋表现出显著差异。与 CK 相比, 喷施使籽粒

表 2 叶面喷施富硒营养素小麦产量和穗部性状的变化
Table 2 Wheat yield and spike characters with different selenium-rich nutrient treatments

地点 Site	处理 Treatment	小穗数 Spikelet number per spike	不孕小穗数 Infertile spikelet number per spike	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 Thousand grain weight/g	产量 Yield /(kg · hm ⁻²)
三原 Sanyuan	CK	16.75a	3.80a	29.25a	50.38a	9389.35b
	T1	16.85a	3.93a	29.63a	51.02a	9586.72ab
	T2	16.65a	4.03a	30.08a	51.15a	9891.93a
	T3	16.88a	4.00a	29.53a	51.03a	9743.85a
	T4	16.50a	4.30a	29.60a	50.98a	9683.56ab
兴平 Xingping	CK	17.25a	4.03a	30.80a	49.33a	8250.45a
	T1	17.58a	4.13a	30.95a	50.30a	8578.54a
	T2	17.35a	4.00a	31.58a	50.72a	8686.81a
	T3	17.65a	4.15a	31.30a	50.66a	8610.60a
	T4	17.30a	3.98a	31.03a	49.88a	8537.43a
武功 Wugong	CK	16.85a	3.35a	30.53a	52.34a	9393.99b
	T1	17.65a	3.43a	31.03a	52.78a	9788.92ab
	T2	17.48a	3.20a	30.83a	52.42a	9548.20ab
	T3	17.20a	3.38a	31.30a	52.71a	9994.12a
	T4	17.78a	3.50a	30.65a	52.80a	9726.89ab
临渭 Linwei	CK	17.08ab	3.48a	28.38a	50.86a	8275.42a
	T1	17.63a	3.85a	29.48a	51.08a	8490.92a
	T2	16.90b	3.73a	28.33a	51.14a	8398.77a
	T3	17.30ab	3.80a	29.50a	51.03a	8596.62a
	T4	17.55ab	3.68a	28.50a	51.30a	8473.83a

注:同列数值后不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著,下同。

Note: Different lower-case letters following the values within the same columns indicate significant difference among the treatments at the $P<0.05$ level, the same below.

表 3 叶面喷施富硒营养素小麦籽粒品质的变化
Table 3 Wheat grain quality with different selenium-rich nutrient treatments

地点 Location	处理 Treatment	容重 Test weight /(g · L ⁻¹)	籽粒硬度 Hardness /%	湿面筋 Wet gluten (14%)/%	蛋白质含量 Protein /%	沉降值 Sedimentation /mL	稳定时间 Stability time /min
三原 Sanyuan	CK	776.70a	63.68a	26.86b	13.57a	29.25a	2.69a
	T1	778.69a	63.67a	26.52b	13.60a	29.36a	2.70a
	T2	778.41a	63.67a	27.62ab	13.70a	29.52a	2.75a
	T3	777.91a	62.80a	27.55ab	13.72a	29.51a	2.82a
	T4	779.13a	63.30a	28.65a	13.74a	29.37a	2.92a
兴平 Xingping	CK	801.22a	63.92a	28.66c	12.77a	28.52b	2.15c
	T1	804.34a	65.01a	31.16b	12.69a	28.41b	2.42bc
	T2	803.45a	66.07a	32.72a	13.12a	29.39a	3.30a
	T3	803.95a	64.47a	29.93bc	13.24a	29.41a	2.69bc
	T4	801.93a	64.44a	30.94b	13.35a	29.30a	2.93ab
武功 Wugong	CK	791.68c	65.00a	28.33b	14.05a	30.62b	2.97a
	T1	795.04ab	65.72a	28.40b	13.94a	30.46b	2.97a
	T2	795.46ab	65.46a	28.80ab	14.29a	30.65b	3.25a
	T3	793.63bc	65.96a	28.64ab	14.25a	30.65b	3.15a
	T4	796.19a	65.81a	29.42a	14.38a	31.25a	3.25a
临渭 Linwei	CK	775.09a	60.10a	23.88b	13.14a	28.32a	2.61a
	T1	777.14a	59.41a	23.49b	13.13a	28.37a	2.60a
	T2	779.03a	59.86a	24.07ab	13.19a	28.47a	2.63a
	T3	778.99a	61.30a	24.20ab	13.31a	28.80a	2.64a
	T4	778.40a	61.55a	25.64a	13.32a	28.64a	3.02a
F 值 F-value	地点 Location	344.357 **	86.939 **	241.256 **	51.644 **	63.698 **	6.517 *
	硒处理 Se treatment	2.603	0.852	13.006 **	3.900	3.204	4.502 *
	地点×硒处理 Location×Se	0.403	1.784	4.086 *	0.436	0.82	1.321

注 * 表示差异显著, ** 表示差异极显著。

Note: * indicates significant differences, ** indicates highly significant differences.

品质得到改善,其中,湿面筋含量在 T4 ($5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 喷施后提高 1.73%,且与其他处理差异显著,T2 ($2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} + 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 也可提高 1.37%;稳定时间在 T2、T4 分别提高 16.50%、17.49%,在兴平与其他处理差异显著;籽粒硬度也在 T2、T4 有最大增量(0.60%);容重在不同处理下增量保持在 0.31%~0.37%;蛋白质含量和沉降值从 T2~T4 逐渐增加,最大增量分别为 0.32%和 1.58%,两者在 T1 下基本不变。

由以上结果可知,叶面喷施富硒营养素对小麦二次加工品质的影响大于一次加工品质;富硒营养素单次用量的高低对品质改善的影响较大;相同用量的富硒营养素进行分次喷施反而会削弱对容重、湿面筋和稳定时间的增加效果。

3 结论与讨论

3.1 叶面喷施富硒营养素对小麦籽粒硒含量的影响

富硒小麦是一种安全可生物利用的有机硒源^[24],在促进人类利用富硒植物补硒方面发挥着很重要的作用。大量研究表明,通过外源硒肥生产富硒小麦主要取决于施硒时间、次数和施硒量。本试验 4 个喷硒处理均可显著提高小麦籽粒硒含量,与高新楼等^[19]、白小军等^[28]的研究结果一致。对于施硒时间,本试验将重点集中在小麦硒吸收最高效的抽穗~开花~灌浆期^[25],并设置抽穗一周后喷施富硒营养素和抽穗两周后二次喷施富硒营养素处理,通过对比发现,第二次喷施富硒营养素后小麦籽粒硒含量的增幅要高于第一次喷施后的增幅,可能与小麦抽穗后生长越来越旺盛,对喷施液吸收与转运速度加快,因此小麦通过叶片吸收的硒能更快转移到小麦籽粒中有关^[33]。对于施硒量,单次喷施富硒营养素处理结果显示,随着施硒量成倍增加,小麦籽粒硒含量也成倍增加。对于施硒次数,在增加第二次喷施后小麦籽粒硒含量仍显著增加,与彭涛等^[27]关于随着硒肥喷施次数增加小麦籽粒的硒含量增加的研究结果一致。

本试验虽在气候条件相似的 4 个试验地同时进行,但由于各地土壤肥力和硒含量存在差异,因此籽粒硒含量的变化在地区之间的一致性减弱。其中,不同富硒营养素用量下三原和兴平小麦籽粒硒含量的增加速度远高于武功和临渭地区;分次喷施富硒营养素后,三原和兴平小麦籽粒硒含量对喷施次数的响应并不明显,武功和临渭则相反。而根据 4 个试验地土壤肥力和各对照籽粒硒含量测定结

果,三原土壤硒含量为其他地区 5~10 倍,CK 籽粒硒含量高 2~3 倍,可能在小麦生长前期植株已经通过土壤吸收了一部分硒,从而叶面施硒后在生殖生长阶段能通过硒转运通道来快速提高小麦籽粒硒含量;在 4 个试验点中,兴平土壤硒含量居中等水平,其 CK 籽粒硒含量也如此,但其土壤全氮、速效氮和速效钾含量几乎是三原的 2 倍,可能是高肥在促进小麦生长的同时协同加速了对硒的吸收,致使形成与三原相似的变化趋势;而武功虽土壤肥力和兴平基本一致,但其土壤硒含量相对较低。由于这一部分的相关研究较少,具体机理有待进一步验证。因此,在关中灌区,对于三原、兴平一类的地区单次高用量叶面喷施富硒营养素对提高籽粒硒含量更有效,而武功、临渭一类则更适宜低用量多次喷施来提高小麦籽粒硒含量。

3.2 叶面喷施富硒营养素对小麦产量和穗部性状的影响

前人研究结果表明,小麦加施硒肥在一定程度上可影响小麦产量及产量构成因素^[19,26-27]。本试验处理下,小麦产量、千粒重、穗粒数以及小穗数都有增加趋势。这可能与硒处理缓解了小麦膜脂过氧化和活性氧对植株的毒性,从而减少了不利于小麦生长发育的负面影响^[25]相关。且有研究表明开花期叶面喷施硒肥可延长旗叶的功能期^[9],最终使小麦产量得到提高。而白小军等^[28]在小麦灌浆初期用同种富硒植物营养素对小麦叶面喷施得出施硒可增产但效果不显著,对小麦穗长、小穗数、不孕小穗几乎无影响。在本试验中小麦小穗数、不孕小穗数有增加的趋势,但都不显著,与彭涛等^[27]的研究结果一致。根据不孕小穗占比几乎无变化,可得出两者并不能导致穗粒数增加。有研究也得出在小麦返青期到开花期这一阶段施硒能显著提高产量,但在灌浆期施硒对产量影响不显著^[25]。而 Wang 等^[29]的研究表明在小麦不同生育时期无论叶面喷施硒酸盐还是亚硒酸盐对小麦籽粒产量无显著影响。本试验中小麦产量 T3 在两地显著增加,T2 处理在一地表现显著增加。且通过比较叶面喷施富硒营养素后籽粒硒含量变化与产量间的关系发现,在三原和兴平小麦产量随籽粒硒含量升高有先增加后降低的趋势,在 T4 籽粒硒含量增加最大的情况下,产量却低于籽粒硒含量次之的 T2、T3 处理。有研究证明,低剂量的富硒营养素能够在非生物胁迫下维持小麦的正常生理代谢,提高抗氧化能力,进而稳定或增加小麦产量^[30];高剂量的硒肥则抑制小麦生长或拮抗其他营养元素的吸收^[31]。武

功和临渭小麦产量在 T1、T3 单次富硒营养素用量均为 $2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理高于 T2、T4 首次富硒营养素用量为 $5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理,且增加喷施次数比只进行单次喷施的产量高。4 个试验地的共同点在于小麦对富硒营养素转运速度快则产量提高多,但富硒营养素用量对提高产量存在阈值。

3.3 叶面喷施富硒营养素对小麦籽粒品质的影响

生产优质强筋小麦是育种和栽培追求的一个长期目标,而施用硒肥在提高小麦籽粒硒含量的前提下并可改善强筋小麦籽粒品质^[32-34],这对于富硒功能小麦的生产更具优势。籽粒蛋白质含量和容重是衡量小麦一次加工品质的重要指标,刘庆等^[35]的研究表明施硒仅能提高小麦籽粒中粗蛋白含量,对容重基本无影响。本试验中小麦一次加工品质和二次加工品质在各喷硒处理后都有所改善,且在富硒营养素用量为 $5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理下改善程度优于 $2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 用量的处理。通过与各喷硒处理下小麦籽粒对硒的富集程度比较,籽粒硒含量越高则小麦品质改善程度也相应增大。由于三原、兴平在 T1、T2 处理籽粒硒含量达武功、临渭的 5 倍左右,所以三原、兴平两地品质指标在 T1、T2 的增加幅度大于武功和临渭。

参 考 文 献:

- [1] 孟惠平,吕明.微量元素硒的抗衰老作用研究[J].微量元素与健康研究,2008,25(5):62-64.
MENG H P, LU M. Study on anti-aging effect of trace element selenium[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2008, 25(5): 62-64.
- [2] 蒋彬,李志刚,叶正钱,等.硒从土壤向食物链的迁移[J].土壤通报,2002,33(2):149-152.
JIANG B, LI Z G, YE Z Q, et al. The transfer of selenium from soil to food chain [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(2): 149-152.
- [3] 周越,吴文良,孟凡乔,等.土壤中硒含量、形态及有效性分析[J].农业资源与环境学报,2014,31(6):527-532.
ZHOU Y, WU W L, MENG F Q, et al. Review on the content, speciation of selenium and its availability in soils[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(6): 527-532.
- [4] ROMAN M, JITARU P, BARBANTE C. Selenium biochemistry and its role for human health[J]. Metallomics, 2014, 6(1): 25-54.
- [5] 向东山.富硒小麦籽粒中硒分布规律的研究[J].食品科学,2008,29(9):52-54.
XIANG D S. Study on distribution law of selenium in selenium-enriched wheat grain[J]. Food Science, 2008, 29(9): 52-54.
- [6] 唐玉霞,王慧敏,杨军方,等.河北省冬小麦硒的含量及其富硒技术研究[J].麦类作物学报,2011,31(2):347-351.
TANG Y X, WANG H M, YANG J F, et al. Studies on the selenium content and selenium enriched technique of winter wheat in Hebei

- Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(2):347-351.
- [7] HART D J, FAIRWEATHER-TAIT S J, BROADLEY M R, et al. Selenium concentration and speciation in biofortified flour and bread: retention of selenium during grain biofortification, processing and production of Se-enriched food [J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1771-1778.
- [8] GALINHA C, FREITAS M D C, PACHECO A M G, et al. Selenium supplementation of Portuguese wheat cultivars through foliar treatment in actual field conditions [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2013, 297(2): 227-231.
- [9] 宋家永,王海红,朱喜霞,等.叶面喷硒对小麦抗氧化性能及籽粒硒含量的影响[J].麦类作物学报,2006,26(6):178-181.
SONG J Y, WANG H H, ZHU X X, et al. Effect of spraying selenium to the leaves on the performance of antioxidation of wheat and grain selenium content[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(6): 178-181.
- [10] 周鑫斌,施卫明,杨林章.叶面喷硒对水稻籽粒硒富集及分布的影响[J].土壤学报,2007,44(1):73-78.
ZHOU X B, SHI W M, YANG L Z. Effect of foliar application of selenite on selenium accumulation and distribution in rice [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 73-78.
- [11] 张晓,卜冬宁,李瑞奇,等.叶面喷施微肥对冬小麦产量和品质的影响[J].麦类作物学报,2012,32(4):747-749.
ZHANG X, BU D N, LI R Q, ET al. Effects of foliar spraying microelement fertilizers on yield and quality of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(4): 747-749.
- [12] 张平平,马鸿翔,姚金保,等.叶面喷施硒肥对小麦籽粒及面粉硒含量的影响[J].核农学报,2019,33(11):2254-2260.
ZHANG P P, MA H X, YAO J B, et al. Effects of selenium foliar spray on selenium distribution in milling fractions in common wheat [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(11): 2254-2260.
- [13] 唐玉霞,王慧敏,杨军方,等.河北省冬小麦硒的含量及其富硒技术研究[J].麦类作物学报,2011,31(2):347-351.
TANG Y X, WANG H M, YANG J F, et al. Studies on the selenium content and selenium enriched technique of winter wheat in Hebei Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(2): 347-351.
- [14] 晋永芬,高炳德.叶面硒肥对春小麦的富硒效应及硒素吸收分配的影响[J].中国土壤与肥料,2018(2):113-117.
JIN Y F, GAO B D. Effect of selenium fertilizer on Se-enrich reaction and Se absorption and distribution of spring wheat[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2018(2): 113-117.
- [15] 马玉霞,杨胜利,赵淑章.强筋小麦富硒技术研究初报[J].河南职业技术学院学报,2004,32(3):9-10.
MA Y X, YANG S L, ZHAO S Z. Early report on the high selenium technique study of the strong gluten wheat[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology, 2004, 32(3): 9-10.
- [16] 卢鹏飞,高志强,孙敏,等.外源硒肥对小麦籽粒产量及植株硒元素积累的影响[J].河北农业大学学报,2020,43(3):17-22.
LU P F, GAO Z Q, SUN M, ET al. Effects of exogenous selenium fertilizer on grain yield and selenium accumulation in wheat[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2020, 43(3): 17-22.
- [17] 刘慧,杨月娥,王朝辉,等.中国不同麦区小麦籽粒硒的含量及调控[J].中国农业科学,2016,49(9):1715-1728.

- LIU H, YANG Y E, WANG C H, et al. Selenium content of wheat grain and its regulation in different wheat production regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9): 1715-1728.
- [18] 李鸣凤,邓小芳,付小丽,等.不同硒源对小麦生长、硒吸收利用以及玉米后效的影响[J].*农业环境科学学报*,2017,36(1):1-7.
- LI M F, DENG X F, FU X L, et al. Effects of different selenium sources on wheat growth, selenium uptake and utilization and the after effects on maize [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2017, 36(1): 1-7.
- [19] 高新楼,秦中庆,苏利,等.喷施富硒液对富硒小麦籽粒硒含量及产量的影响[J].*安徽农业科学*,2007,35(18):5498-5499.
- GAO X L, QIN Z Q, SUL, ET al. Effect of spraying selenium rich liquid on selenium content in grain and yield of wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(18): 5498-5499.
- [20] 张睿,刘曼双,王荣成,等.叶面喷施富硒植物营养素对小麦产量及品质的效应[J].*麦类作物学报*,2015,35(6):856-859.
- ZHANG R, LIU M S, WANG R C, et al. Effect of foliar spraying of plant Se-nutrients on wheat yield and quality[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(6): 856-859.
- [21] 蒋方山,张海军,吕连杰,等.叶面喷施亚硒酸钠对黑粒小麦籽粒硒含量、产量及品质的影响[J].*麦类作物学报*,2018,38(12):1496-1503.
- JIANG F S, ZHANG H J, LU L J, et al. Effect of foliar sodium selenite on selenium content, yield and quality in grains of black kernel wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(12): 1496-1503.
- [22] 税杨,杨文平,夏清,等.施硒肥方式对强筋小麦产量、硒累积分配及籽粒营养品质的影响[J].*应用与环境生物学报*,2021,27(1):112-120.
- SHUI Y, YANG W P, XIA Q, ET al. Methods of selenium application differentially modulate yield, selenium accumulation, and nutrient quality in strong gluten wheat[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2021, 27(1): 112-120.
- [23] 赵锁劳,段敏,孙新涛,等.微波消解 HG-AFS 法测定小麦中硒含量的研究[J].*麦类作物学报*,2004,24(1):66-69.
- ZHAO S L, DUAN M, SUN X T, et al. Determining selenium content in wheat by HG-AFS with microwave digestion [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24(1): 66-69.
- [24] FENECH M, WU J, GRAHAM R, ET AL. Selenium biofortified wheat [M]//PREEDY V, SRIRAJASKANTHAN R, PATEL V. *Handbook of food fortification and health*. New York: Humana Press, 2013: 349-356.
- [25] CHU J Z, YAO X Q, YUE Z W, et al. The effects of selenium on physiological traits, grain selenium content and yield of winter wheat at different development stages [J]. *Biological Trace Element Research*, 2013, 151(3): 434-440.
- [26] 史芹,高新楼.不同时期喷施富硒液对小麦籽粒硒含量及产量的影响[J].*山地农业生物学报*,2011,30(6):562-564.
- SHI Q, GAO X L. Effect of application time of selenium fertilizer on wheat yield and grain selenium content[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2011, 30(6): 562-564.
- [27] 彭涛,于金林,成东梅,等.不同喷施硒时期和次数对小麦产量及硒含量的影响[J].*安徽农业科学*,2015,43(17):104-105,108.
- PENG T, YU J L, CHENG D M, et al. Effect of spraying stage and time of selenium rich liquid on wheat yield and grain selenium content[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(17): 104-105, 108.
- [28] 白小军,李红霞,白冰,等.“清旺”富硒植物营养素对春小麦产量构成及籽粒硒含量的影响[J].*安徽农业科学*,2012,40(25):12449-12451.
- BAI X J, LI H X, BAI B, et al. Effects of enriched selenium plant nutrient ‘Qingwang’ on yield components and selenium content of grain in spring wheat (*Triticum aestivum* Linn.) [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(25): 12449-12451.
- [29] WANG M, ALI F, WANG M K, et al. Understanding boosting selenium accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) following foliar selenium application at different stages, forms, and doses [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(1): 717-728.
- [30] NAWAZ F, AHMAD R, ASHRAF M Y, et al. Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress [J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2015, 113: 191-200.
- [31] GUERRERO B, LLUGANY M, PALACIOS O, et al. Dual effects of different selenium species on wheat [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 83: 300-307.
- [32] 林匡飞,徐小清,金霞,等.Se 对小麦的生态毒理效应及临界指标研究[J].*农业环境科学学报*,2004,23(6):1082-1085.
- LIN K F, XU X Q, JIN X, et al. Eco-toxicological effects of selenium stress on wheat (*Triticum aestivum* L.) and its critical value[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2004, 23(6): 1082-1085.
- [33] 宋家永,张万业,王永华,等.小麦富硒生产技术研究[J].*中国农学通报*,2005,21(5):197-199.
- SONG J Y, ZHANG W Y, WANG Y H, et al. Studies on technique in producing wheat of enriched selenium[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(5): 197-199.
- [34] 李根林,高红梅.喷施亚硒酸钠对小麦产量的影响[J].*中国农学通报*,2009,25(18):253-255.
- LI G L, GAO H M. Effects of spraying NaSeO₃ on yield of wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(18): 253-255.
- [35] 刘庆,田侠,史衍玺.施硒对小麦籽粒硒富集、转化及蛋白质与矿物质元素含量的影响[J].*作物学报*,2016,42(5):778-783.
- LIU Q, TIAN X, SHI Y X. Effects of Se application on Se accumulation and transformation and content of gross protein and mineral elements in wheat grain [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 778-783.