

## 外源硒对荞麦、小麦、大麦农艺性状及硒钾钙铁含量的影响

刘钰<sup>1,3,4</sup>,周连玉<sup>1,3,4</sup>,张骏<sup>1,3</sup>,谢惠春<sup>1,3,4</sup>,罗巧玉<sup>1,3,4</sup>,郑万财<sup>2\*</sup>

1. 青海师范大学生命科学学院,青海 西宁 810008
2. 青海大学农林科学院,青海 西宁 810016
3. 青海省青藏高原药用动植物资源重点实验室,青海 西宁 810008
4. 青海师范大学高原科学与可持续发展研究院,青海 西宁 810008

**摘要:** 为探究浸种富硒技术提高农作物品质和矿质元素含量的作用,选用青海地区荞麦六桥1号(LQ1)、小麦青春11号(QC11)、大麦肚里黄(DLH)三种不同作物,以添加无菌水为对照组,采用不同浓度的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液对作物种子进行浸种处理,比较2.5 mg/L、5.0 mg/L、10 mg/L三个浓度的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液对种子活力和幼苗的农艺性状、硒、铁、钙、钾元素含量的影响。结果表明,2.5 mg/L的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液对种子活力无显著影响( $P>0.05$ );随着 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浓度变大,作物幼苗的根长、苗长、干物质的硒元素含量会显著提高( $P<0.05$ ); $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液为2.5 mg/L时,LQ1的硒含量高于QC11和DLH,对硒具有较高的敏感性;QC11和DLH的硒含量虽低于LQ1,但耐硒浓度更高且表现出良好的农艺性状;三种作物在 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液处理后,硒元素含量升高的同时钙铁钾等元素含量也随之升高。综上,添加2.5 mg/L  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液可以促进作物幼苗富集硒元素并改善幼苗品质,且 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浓度超过2.5 mg/L对促进作物生长的意义较小,本研究结果可为指导作物富硒生产提供依据。

**关键词:** 外源硒; 萌发品质; 种子; 元素含量

中图分类号: S567.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2025)05-0823-08

## Exogenous Selenium on Agronomic Traits and Contents of Selenium, Potassium, Calcium and Iron in Buckwheat, Wheat and Barley

LIU Yu<sup>1,3,4</sup>, ZHOU Lian-yu<sup>1,3,4</sup>, ZHANG Jun<sup>1,3</sup>, XIE Hui-chun<sup>1,3,4</sup>, LUO Qiao-yu<sup>1,3,4</sup>, ZHENG Wan-cai<sup>2\*</sup>

1. College of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China
2. Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Qinghai University, Xining 810016, China
3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Medicinal Plant and Animal Resources of Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810016, China
4. Academy of Plateau Science and Sustainability/Qinghai Normal University, Xining, 810008, China

**Abstract:** To investigate the effects of seed soaking selenium-rich technology on improving crop quality and mineral element content, this study selects three different crops from Qinghai region: Buckwheat Liuqiao 1 (LQ1), Wheat Qingchun 11 (QC11), and Barley Dulihuang (DLH). Using sterile water as the control, seeds are soaked in sodium selenite ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ) solutions at three concentrations (2.5 mg/L, 5.0 mg/L, and 10 mg/L) to compare their impacts on seed vigor, seedling agronomic traits, and the contents of selenium (Se), iron (Fe), calcium (Ca), and potassium (K). The results show that 2.5 mg/L  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  solution has no significant effect on seed viability ( $P>0.05$ ). With the increase of the concentration of  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  solution, root length, seedling height, and Se content in dry matter increase significantly ( $P<0.05$ ). At 2.5 mg/L  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ , LQ1 exhibits higher Se accumulation than QC11 and DLH, indicating greater sensitivity to selenium. Although QC11 and DLH accumulate less Se than LQ1, they exhibit higher selenium tolerance and demonstrated good agronomic traits. Treatment with  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  not only elevates Se content but also enhances the levels of Ca, Fe, and K in all three crops. In conclusion, soaking seeds in 2.5 mg/L  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  promotes selenium enrichment in crop seedlings and improves seedling quality. Moreover,  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  solution concentration exceeding 2.5 mg/L has little significance in promoting crop growth.

收稿日期: 2024-12-04

修回日期: 2025-08-24

基金项目: 国家自然科学基金地区基金资助项目(32260345); 2021年中央财政林草科技推广示范项目(青[2021]TG11号); 青海“昆仑英才·高端创新创业人才”计划特色人才项目(2022-027)

第1作者简介: 刘钰(2000-),女,硕士研究生,研究方向:微生物与植物互作。E-mail:116697037868@163.com

\*通讯作者: Author for correspondence. E-mail:13565849218@163.com

These findings provide a basis for guiding selenium-rich crop production.

**Keywords:** Exogenous selenium; germination quality; seed; elemental content

硒(Selenium, Se)是动植物机体必需的微量元素,因机体无法长期储存硒,外源硒的摄入可以发挥对机体组织、器官的保护作用,从而提高免疫、生殖、抗氧化、抗衰老、抗辐射等能力<sup>[1]</sup>。然而,我国居民缺硒问题较为严重,主要由土壤环境、饮食结构等引起,提高硒肥利用率以及硒产品种类丰富化是解决缺硒问题的关键。

近年来,无机、有机硒肥浇灌植物的研究较为丰富,如对小麦、玉米、青稞、荞麦、水稻等富硒能力较强作物的研究,集中提供多样化富硒产品。研究者发现在小麦玉米轮作田中施加 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液可显著提高两种作物的产量和籽粒硒含量<sup>[2]</sup>;0~1 mg/L浓度范围内的 $\text{Se}^{6+}$ 和 $\text{Se}^{4+}$ 在促进青稞种子萌发的同时也可被青稞吸收转运<sup>[3]</sup>;甜荞叶片施加 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液后可有效提高叶片光合利用率、籽粒产量等,平均籽粒硒元素含量为0.2 mg/kg<sup>[4]</sup>。数位学者的研究表明食物链具有富集硒元素作用,外源无机硒肥在植物中可转化为有机硒,硒元素在动物肠道中的代谢结果可演化出更高的生产效益,如提升牛肉的嫩度<sup>[5]</sup>、提高牛乳的SOD酶活力<sup>[6]</sup>、增加蛋鸡产蛋的数量和重量<sup>[7]</sup>等,而人类日常可食用富硒肉类、蛋类、乳类、蔬菜等补充硒元素。因此,谷物富硒应用前景广泛,富硒农产品加工具有一定的研究价值。

目前,施加外源硒的方法主要包括土壤施硒、叶面喷硒、生物强化三种,方法不同也会导致硒最终作用的植物器官和强化效果的不同,如禾本科植物在拔节期和抽穗期进行土壤施硒较好<sup>[8,9]</sup>,在灌浆期叶面施硒效果较好<sup>[10]</sup>,而生物强化主要是指在蔬菜、食用菌的生长过程中进行施加富硒菌<sup>[11-14]</sup>。此外,施加外源硒对作物中含有的其他矿质元素也具有积极影响,如降低植物体对砷、镉等重金属元素的富集<sup>[15,16]</sup>,增加硫、铁、锌等元素含量。前人研究发现硒浸泡种子得到富硒荞麦芽苗菜具有Cu、Cd、Pb、As等有害重金属含量低的优点<sup>[17]</sup>;研究者对白菜芽苗菜种子萌发过程中进行硒硫互作处理后发现硒可以有效缓解硫对其生长的抑制作用<sup>[18]</sup>;Santos等<sup>[19]</sup>在种植小麦的土壤中施加

0.25 mg/dm<sup>3</sup>的硒肥后,籽粒硒含量增加的同时硫、铁、锌等元素含量也会增加,Liu等<sup>[20]</sup>也发现土壤施硒后小麦籽粒中的铁、锌、锰含量增加。由此可见,富硒技术不同产生的效果也会有所差异,同时外源硒的添加对不同农产品中矿质元素含量也具有一定的影响。

荞麦、小麦、大麦等对作物土壤环境要求低,可作为施加外源硒的研究材料。本研究采用 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浸泡处理作物种子,通过对比不同作物种子的活力指标、幼苗的生理指标,并结合幼苗干燥粉末硒元素及钾钙铁等矿质元素含量,分析外源硒对不同作物种子的影响,为富硒作物生长繁育提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

3种供试种子由青海省农林科学院提供,荞麦为六桥1号、小麦为青春41号、大麦为肚里黄,缩写编号分别为LQ1、QC11、DLH,采用分析纯为99%的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 固体配制 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液,设置为3个浓度,分别是2.5 mg/L,5 mg/L,10 mg/L;以直径200 mm的玻璃培养皿为容器,沙土取自西宁市湟源县;硒元素标准品(1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ),钙元素标准品(1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ );硝酸、过氧化氢、次氯酸钠、盐酸、3,3'-二氨基联苯胺、乙二醇四乙酸二钠、甲苯、四苯硼钠、偶氮氯膦Ⅲ、氨水、氯化铵、三乙醇胺、邻菲罗啉、乙酸-乙酸钠、盐酸羟胺;所有试剂均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 方法

1.2.1 浸种及沙土培养方法 筛选饱满、无杂质的作物种子,先用体积分数为75%的乙醇浸泡1 min,再用体积分数为7%的次氯酸钠溶液浸泡10 min,最后用无菌水冲洗残留的次氯酸钠溶液并用无菌滤纸吸干种子表面水分。选取50粒饱满、大小均匀的作物种子为一组,做3组平行,均匀摆放培养皿中。在每个培养皿中一次性添加15 mL的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液,同时以无菌水作为对照组。浸泡种子24 h后填入无菌沙土继续培养,每天照射12 h的白光,期间

每隔8 h浇灌一次无菌水,每次5 mL,按照作物幼苗需水情况统一浇灌次数。培养至第7天后从沙土中取出,用无菌水冲洗根部并及时用滤纸吸干植物体表面水分,4 °C保存用于后续实验。

1.2.2 种子生长指标的测定 参考GB/T3543-1995《农作物种子检验规程》<sup>[21]</sup>对作物种子发芽率、作物幼苗根长及苗长进行测定。每间隔1 d统计一次种子发芽数量,按照公式(1)计算发芽指数;按照公式(2)对第3天的种子发芽数量计算发芽势;培养7 d后统计一次种子发芽数量,按照公式(3)计算发芽率。

$$\text{计算公式: } GI = \sum(G_i \div D_i) \quad (1)$$

$$GE = (N_3 \div N) \times 100\% \quad (2)$$

$$GR = (N_7 \div N) \times 100\% \quad (3)$$

式中:GI:发芽指数; $G_i$ :每d种子发芽数; $D_i$ :与 $G_i$ 相对应的天数;GE:发芽势; $N_3$ :第3天发芽种子数; $N_7$ :第7天发芽种子数; $N$ :每盘试验种子数;GR:发芽率。

在培养至第7天时,用镊子将幼苗根部从培养皿中挑出,快速用无菌水洗净,无菌干燥滤纸吸干水分,对三盘平行试验的幼苗进行称量鲜重,再进行根长和苗长的测量。最后将各组幼苗置于105 °C的鼓风烘干箱中杀青2 h,再调低温度至60 °C继续烘干10 h后称量干物质重量,按照公式(4)计算活力指数,按照公式(5)计算幼苗的含水量。使用搅磨机磨碎烘干的幼苗,过60目筛网,保存待测。

$$\text{计算公式: } VI = GR \times DW \quad (4)$$

$$MC = [(FW - DW) / FW] \times 100\% \quad (5)$$

式中:VI:活力指数;DW:幼苗干重;MC:含水率;FW:鲜重。

1.2.3 加硒作物中硒、钾、钙、铁元素含量的测定 称取0.5 g幼苗干物质粉末进行微波消解<sup>[22]</sup>,与5 mL硝酸、1 mL过氧化氢混合均匀后放置于微波消解仪中,仪器运行程序如表1。幼苗粉末消解后用电热板进行赶酸,当消解管内剩余2 mL左右时,将消解管取出冷却后加入2.5 mL盐酸(6 mol/L),继续加热至管内液体从橙红色变为无色,此时白烟冒出即为消解完成。将消解管内的溶液转移至10 mL容量瓶中并用超纯水定容至10 mL,混匀待测。采用3,3'-二

氨基联苯胺分光光度法<sup>[23]</sup>、四苯硼钠法<sup>[24]</sup>、偶氮氯磷Ⅲ法<sup>[25]</sup>、邻菲罗啉比色法<sup>[26]</sup>等方法进行硒、钾、钙、铁元素含量的测定,并按照各方法测定标准曲线。硒元素含量在0~2.5  $\mu\text{g/mL}$ 范围内呈线性,标准曲线的回归方程: $Y=0.0254X+0.0026$ ,相关系数 $r=0.994$ ;钾元素含量在0~80  $\mu\text{g/mL}$ 范围内呈线性,回归方程: $Y=0.7227X-0.0335$ ,相关系数 $r=0.9924$ ;钙元素含量在0~25  $\mu\text{g/mL}$ 范围内呈线性,回归方程: $Y=0.0081X+0.0858$ ,相关系数 $r=0.9912$ ;标准曲线在铁含量为0~1  $\mu\text{g/mL}$ 范围内呈线性,回归方程: $Y=0.6723X-0.01$ ,相关系数 $r=0.9985$ 。

表1 微波消解仪工作参数

步骤 step	功率/kw Power	升温时间/min Heating time	保留时间/min Retention time	温度/°C Temperature
1	8	6	1	120
2	8	3	5	145
3	8	5	10	180

### 1.3 数据处理

试验数据均开展3次平行测定,数值采用“平均值 $\pm$ 标准差”表示,通过统计分析软件SPSS statistics 26进行各项指标的单因素方差分析(LSD,  $P<0.05$ ),Origin 2021进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 外源硒对作物种子萌发的影响

3种作物种子在施加不同 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液的情况下的萌发指标如表2,作物LQ1、DLH的萌发变化趋势相似,经 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液处理后发芽指数没有显著变化( $P>0.05$ );10 mg/L的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液显著抑制LQ1和DLH的发芽势,5 mg/L的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液显著降低LQ1和DLH的发芽率( $P<0.05$ )。作物QC11在经不同浓度的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浸种后,其发芽指数、发芽势、发芽率与对照组对比均没有显著性的差异( $P<0.05$ )。结果表明,当 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浓度为2.5 mg/L时,种子的萌发情况与对照组无显著性差异,3种作物种子的萌发能力为:QC11>DLH>LQ1;但当浓度高于2.5 mg/L后,对LQ1、DLH两种作物发挥了抑制萌发作用;但对QC11的影响极小,说明其耐硒能力较强。

表 2 外源硒对作物种子发芽指标的影响  
Table 2 Exogenous selenium on crop seed germination indexes

发芽指数 Germination index	作物 Crop	Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> /(mg/L)			
		0	2.5	5	10
发芽指数 Germination index	LQ1	57.87±4.28Ca	58.08±4.03Ba	54.93±9.25Ca	48.48±4.39Ca
	QC11	123.76±5.86Aa	125.59±0.61Aa	120.02±8.57Aa	125.79±1.18Aa
	DLH	75.52±3.27Ba	70.95±3.70Ba	78.40±4.79Ba	74.38±4.36Ba
发芽势/% Germination energy	LQ1	49.33±3.05Ca	47.33±5.03Cab	44.67±6.64Bab	38.00±5.29Cb
	QC11	98.67±2.31Aa	98.67±2.31Aa	94.67±9.24Aa	99.33±1.15Aa
	DLH	87.33±2.31Ba	79.33±3.06Bb	81.33±6.43Aab	74.67±1.15Bb
发芽率/% Germination rate	LQ1	59.33±1.15Ba	60.00±2.00Ba	53.33±1.15Bb	52.67±1.15Cb
	QC11	98.67±2.31Aa	98.67±2.31Aa	98.67±2.31Aa	99.33±1.15Aa
	DLH	99.33±1.15Aa	95.33±1.15Aab	94.00±4.00Abd	90.00±2.00Bd

注:a,b,c代表同一作物在不同浓度Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>处理后各发芽指标的显著性差异(P<0.05);A,B,C代表不同作物在同一浓度Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>处理后中各发芽指标的显著性差异(P<0.05)。

Note: Lowercase letters (a, b, c) indicate significant differences (P<0.05) in germination parameters of the same crop treated with different concentrations of Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>.

## 2.2 外源硒处理下作物幼苗根长和苗长指标

2.2.1 作物幼苗根长 不同浓度的Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液对3种作物根长的影响如图1所示,2.5 mg/L的Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液浸种的作物LQ1根长显著大于高浓度实验组(P<0.05);作物QC11的根长随着浇灌Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液浓度的升高而增大,经10 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液处理的作物QC11根长显著大于其他组别(P<0.05);作物DLH的根长随Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液浓度的升高而增大,各实验浓度组的根长均显著大于对照组,其中5 mg/L的Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液条件下生长的DLH根最长。对比相同浓度实验组中不同作物的根长发现,Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液促进作物QC11的根部生长最有效,QC11的根长(施加10 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液)是所有试验作物中根最长的,根长平均值为10.18 cm,是对照组根长的1.69倍。

2.2.2 作物幼苗苗长 不同浓度的Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液对3种作物幼苗苗长的影响如图2所示,2.5 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液实验组的LQ1幼苗比对照组长0.46 cm,但5 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液和10 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液实验组显著抑制了LQ1幼苗生长(P<0.05);施加Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液显著促进作物QC11幼苗的生长(P<0.05),随着Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液浓度的升高,作物QC11的幼苗越长,10 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液处理的QC11幼苗比对照组长2.9 cm;作物DLH幼苗随Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液浓度的提高而增长,各处理组的根长均显著大于对照组(P<0.05),其中

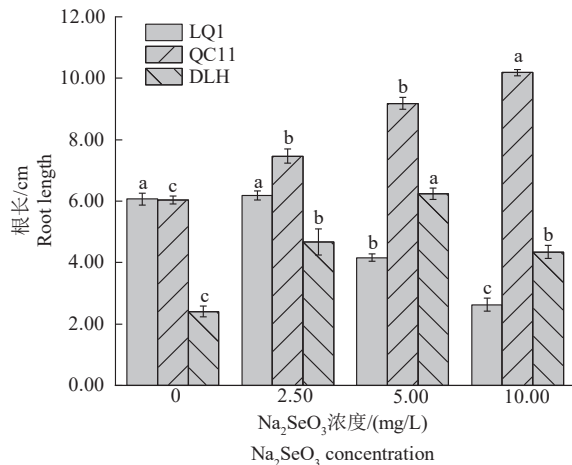


图 1 三种作物幼苗根长

Fig. 1 Root length of seedlings of three crops

注:a,b,c代表不同不同浓度Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>处理后作物的显著性差异(P<0.05),下同。

Note: The letters a, b, and c represent significant differences (P<0.05) among crops treated with different concentrations of Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, the same as below.

5 mg/L的Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液处理的DLH幼苗最长。对比相同浓度实验组中不同作物的幼苗长度发现,Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液促进作物DLH幼苗的增长最有效。

## 2.3 外源硒处理后作物幼苗的含水量

各作物幼苗的含水量如图3所示,在不同浓度的Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液浇灌下,作物LQ1的含水量呈下降趋势,相比于对照组含水量减少13.01%~15.13%;作物QC11、DLH的含水量经Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>溶液浇灌后含水量显著升高(P<0.05),作物QC11

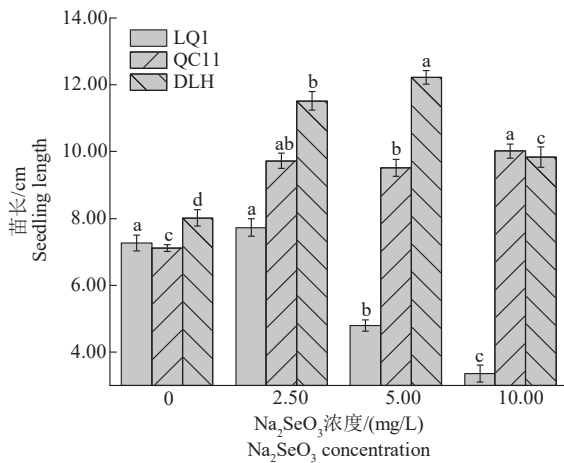


图2 三种作物幼苗苗长

Fig. 2 Stem length of Seedlings of three crops

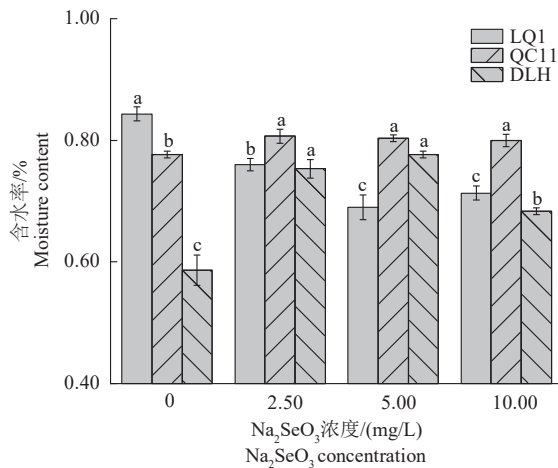


图3 三种作物幼苗含水量

Fig. 3 Seedling water content of three crops

含水量提高 2.24%~3.14%，作物 DLH 含水量提高 9.40%~18.81%。对比相同浓度实验组中不同作物幼苗的和含水量发现，Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液促进作物 QC11、DLH 幼苗含水量提高的效果显著高于作物 LQ1 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.4 外源硒处理后作物幼苗干物质中的硒含量

如图 4 所示，在该研究选择的 3 种作物中 2.5 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液对作物 LQ1 富集硒元素的影响最大，硒元素含量为 0.18 mg/kg，5 mg/L 和 10 mg/L 两个高浓度的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液显著抑制 LQ1 的硒元素积累 ( $P < 0.05$ )；作物 QC11 的富硒效果仅次于作物 LQ1，作物 QC11 硒元素含量随着 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液浓度的升高而增加，施加 10 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液处理的作物幼苗硒元素含量最高 (0.15 mg/kg)；作物 DLH 的富集硒元素结果是

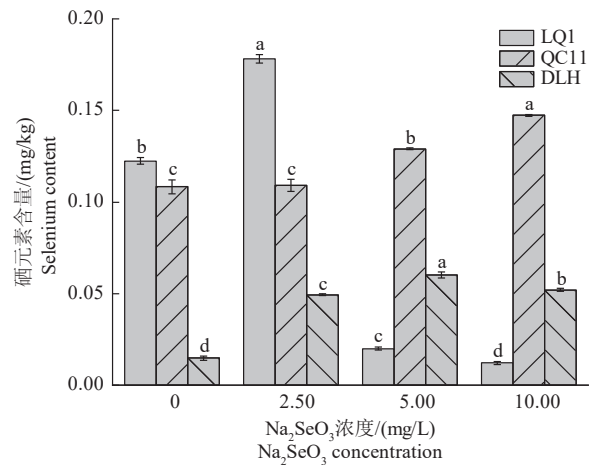


图4 三种作物幼苗硒含量的影响

Fig. 4 Selenium content of seedlings of three crops

3 种作物中最差的，其中 5 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液处理后的 DLH 中的硒元素含量显著高于其他两个浓度 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.5 外源硒处理后作物幼苗干物质中的钾、钙、铁含量

如表 3 所示，作物幼苗硒元素含量的增大促进了钾、钙、铁元素含量的积累，其中钾钙两种元素含量提升幅度较大。随 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液浓度升高，作物 LQ1 幼苗干物质中的钾元素含量提高 0.07~0.22 mg/kg，QC11 提高 0.34~0.81 mg/kg，DLH 提高 0.04~0.65 mg/kg。作物 LQ1 和 DLH 在 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液浓度为 5 mg/L 时钙元素含量最高，QC11 在 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液为 10 mg/L 时含量最高。然而，Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液对各作物的铁含量影响较小，2.5 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液促进 LQ1 和 DLH 的钙元素含量积累，但三种浓度的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液均对 QC11 的钙元素含量无任何影响。

### 3 讨论

植物作为生态系统中的生产者对硒元素具有转化作用<sup>[27]</sup>，富硒植物经牛羊等消费者的摄入和多级转化，进而在食物链中进行多级转化，一方面富硒植物对牧畜的肌肉萎缩症和白肌病具有调节作用<sup>[28]</sup>，另一方面食物链中硒的多级转化对人体缺硒疾病具有缓解作用<sup>[29]</sup>。同时，浸种处理富硒作物幼苗具有节约土地、培养时间短、培养难度低等优点，相较于液面施硒节约转化时间，比土壤施硒减少硒肥使用量和降低土壤破坏力度。Xia 等<sup>[30]</sup>通过灌注紫花苜蓿种子发现

表 3 外源硒对作物幼苗干物质中钾、钙、铁元素含量的影响  
Table 3 Exogenous selenium on potassium, calcium, and iron contents in dry matter of crop seedlings

元素类型 Element type	Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> 浓度/(mg/L) Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> concentration	各作物中元素含量/(mg/kg) Element content in each crop		
		LQ1	QC11	DLH
钾 K	0	1.21±0.05Bb	1.34±0.17Bc	1.85±0.02Ab
	2.5	1.28±0.06Ca	1.68±0.02Bb	1.89±0.02Ab
	5	1.40±0.09Ba	1.82±0.19Ab	2.06±0.10Ab
	10	1.43±0.15Ca	2.15±0.02Ba	2.50±0.21Aa
钙 Ca	0	2.54±0.17Cb	3.26±0.14Bd	4.90±0.26Ab
	2.5	4.31±0.22Ba	4.07±0.20Bc	5.43±0.35Ab
	5	5.00±0.34Ba	4.52±0.07Bb	6.53±0.37Aa
	10	4.54±0.39Ba	5.16±0.30Aa	4.11±0.07Bc
铁 Fe	0	0.7±0.02Cab	0.86±0.01Aa	0.80±0.02Bb
	2.5	0.73±0.02Ca	0.86±0.02Ba	0.97±0.02Aa
	5	0.7±0.02Cab	0.83±0.01Bc	0.91±0.06Aa
	10	0.66±0.03Bb	0.85±0.01Ab	0.24±0.06Cc

注:a,b,c代表同一作物在不同浓度Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>处理后元素含量的显著性差异(P<0.05);A,B,C代表不同作物在同一浓度Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>处理后元素含量的显著性差异(P<0.05)。

Note: a, b, c represent the significant differences in element content of the same crop after being treated with different concentrations of Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> (P<0.05); A, B, C represent the significant differences in element content of different crops after being treated with the same concentration of Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> (P<0.05).

0.5 mmol/L 和 1 mmol/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液可提高种子的发芽率、发芽指数、幼苗活力指数和平均发芽时间等。有机硒肥(硒含量>4 mg/kg)浸种后对玉米种子的发芽率、根长、茎叶长、幼苗鲜重等均具有促进增长的作用<sup>[31]</sup>。此外,针对硒肥浓度的探索,有研究发现 0.5 mg/L 的硒肥促进水稻的发芽,而 5 mg/L 的硒肥则会抑制<sup>[32]</sup>。冯魁等<sup>[33]</sup>的研究发现 1 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液浸种对春小麦的发芽率和发芽势促进作用最大,发芽率提高 5%,发芽势提高 7.66%;而在 2.5 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液浸种后相比对照组发芽率仅提高了 1%,发芽势提高 5.66%。也有研究者发现,5 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液处理,提高了豌豆种子的发芽率、发芽指数及活力指数<sup>[34]</sup>。10~50 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液对大麦浸种处理后,发芽率降低 2.1%~2.6%,但鲜重麦苗出率提高 13.71%~21.75%,干重麦苗出率提高 0.88%~2.38%<sup>[35]</sup>。Ashotovich 等<sup>[36]</sup>的研究表明大麦种子在 5 g/mL 的硒纳米颗粒处理下根长和苗长生长情况最佳。本研究发现,不同浓度的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液对荞麦种子 LQ1 进行浸种后,对其影响较小,仅 2.5 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液对其种子活力、根长苗长等有促进作用,但增长值与对照组没有显著性差异

(P>0.05);小麦种子 QC11 随 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液浓度的升高,根长、苗长、含水量呈现上升趋势且显著大于对照组(P<0.05);大麦种子 DLH 经 2.5~10 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液浸种后,种子活力被显著性抑制(P<0.05),但 5 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液有改善农艺性状的表现,其幼苗根长、苗长、含水率得以提高。以上结果说明 2.5 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 溶液浸种有改善作物农艺性状的作用,与前人研究报道的硒肥浸种设置的浓度区间接近,对麦类作物对无机硒肥适用浓度区间具有一定的参考意义。

前人对富硒种子相关矿质元素含量的研究主要是针对小麦,缺乏对荞麦和大麦的富硒后矿质元素含量的研究。周让让等<sup>[37]</sup>发现小麦籽粒中的硒元素与铁元素含量具有相关性,铁元素含量会随小麦籽粒硒含量在富硒水平范围内的增加而升高;Tobiase 等<sup>[38]</sup>研究发现,5 μM 和 15 μM 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> 溶液与营养液复配后对小麦幼苗中的铁、钙、钾等元素含量没有影响(P>0.05);SOUZA 等<sup>[39]</sup>发现在根长约为 3 cm 的小麦幼苗中施加低浓度的亚硒酸盐溶液后,对小麦幼苗的生长及钙含量具有抑制作用。本研究获得的小麦 QC11 幼苗中铁元素含量高于对照组,高出的

含量范围在0.45~1.08 mg/kg,其铁含量变化趋势与周让让等<sup>[37]</sup>针对小麦籽粒的研究结论相似。QC11幼苗中的钾元素含量与硒元素含量有极显著的相关性( $P<0.01$ ),该结果与Tobiase等<sup>[38]</sup>观点相反,这可能与本试验施加的硒肥浓度高、浸种培育方式、种质资源不同等有关。QC11幼苗同样表现出钙元素含量随 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浓度升高而下降的现象,与Souza等<sup>[39]</sup>的研究结论接近,但QC11变化趋势较小,对照组的钙元素含量为0.86 mg/kg,而实验组(2.5~10 mg/L  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液)的钙元素含量范围在0.83~0.86 mg/kg,由此可见, $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浸种处理下对QC11幼苗的钙元素含量影响极小。综上所述, $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浸种对作物农艺性状、硒含量具有促进作用,对铁、钙、钾三种矿质元素含量也无消极影响, $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液的浓度以低于2.5 mg/L为参考临界点。

#### 4 结论

本研究采用不同浓度亚硒酸钠溶液浸种的方式,研究外源硒对荞麦、小麦、大麦种子萌发及幼苗硒钙铁含量的影响,研究发现2.5 mg/L的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液对种子活力无显著影响,荞麦种子对硒敏感性最强,小麦种子耐硒能力最强。三种作物在 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液处理后,硒元素含量升高的同时钙铁钾等元素含量也随之升高,其中钾钙含量升高的幅度较大。因此,本研究确定 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液浓度超过2.5 mg/L对促进作物生长的意义较小,可为指导作物富硒生产提供依据。

#### 参考文献

- [1] Li LL, Liu Z, Quan JQ, et al. Dietary nano-selenium alleviates heat stress-induced intestinal damage through affecting intestinal antioxidant capacity and microbiota in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2023, 133: 108537-108537.
- [2] Wang Q, Yu Y, Li JX, et al. Effects of different forms of selenium fertilizers on se accumulation, distribution, and residual effect in winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(6): 1116-1123.
- [3] Péter R, Tünde T, Áron S, et al. Quantitative analysis of selenium species in the edible parts of cabbage, carrot, tomato and green pea treated with selenate-enriched irrigation water[J]. *Plant and Soil*, 2023, 496(1-2): 341-360.
- [4] 雷新慧,冷佳俊,陶金才,等. 叶面喷施亚硒酸钠对甜荞光合特性、产量及硒积累效应的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49(06): 1678-1689.
- [5] 魏慧娟. 日粮添加有机硒对肉牛生长性能、牛肉品质及肌肉硒富集规律的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2023.
- [6] 朱松波,庞坤,陈权军,等. 纳米硒对奶牛抗氧化能力的影响[J]. *家畜生态学报*, 2015, 36(12): 56-59.
- [7] Khan MT, Mahmu A, Zahoor I, et al. Organic and inorganic selenium in Aseel chicken diets: Effect on hatching traits[J]. *Poultry Science*, 2017, 96(5): 1466-1472.
- [8] Huang GX, Ding CF, Yu XY, et al. Characteristics of the time-dependent selenium biofortification of rice (*Oryza sativa L.*) [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66: 12490 - 12497.
- [9] Zhou XB, Shi WM, Yang LZ, et al. Genotypical differences and characteristics of se uptake and accumulation in rice[J]. *Soils*, 2007, 39: 731 - 736.
- [10] Li XJ, Su JJ, Li WS, et al. Effect of foliar application of the selenium-rich nutrient solution on the selenium accumulation in grains of Foxtail millet (Zhangzagu 10) [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 29(4): 5569-5576.
- [11] Chen Y, Liu Z, Zeng W, et al. Screening and identification of soil selenium-enriched strains and application in auricularia auricula[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(6): 1136.
- [12] 王浩然,张旸一,刘超杰,等. 微生物富硒菌肥在叶用莴苣生产上的应用[J]. *北京农学院学报*, 2019, 34(02): 51-55.
- [13] 黄皓婷,王浩然,周慧妍,等. 叶面喷施微生物富硒菌肥对快菜产量及品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(25): 66-71.
- [14] 张廷浩,王浩然,黄皓婷,等. 叶面喷施富硒菌肥对菠菜产量及品质的影响[J]. *北京农学院学报*, 2018, 33(04): 31-35.
- [15] Liu Q, Wu T, Wu Q, et al. Effects of soil amendment and foliar selenium applications on cadmium immobilization in soil and accumulation in wheat[J]. *Pedosphere*, 2024, 34(6): 1123-1135.
- [16] Luo H, Zhang C, Zhang S, et al. Influence of sulfur

- and selenium application on wheat growth in arsenic-contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2025, 290: 117543-117543.
- [17] 肖含磊. 富硒荞麦芽苗菜生产工艺及其食用品质分析[D]. 成都: 成都大学, 2022.
- [18] 赵爽, 周羽琪, 杨旭妍, 等. 硒硫互作对白菜芽苗菜硫代葡萄糖苷含量及抗氧化性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(01): 22-29.
- [19] Santos DCL, Martins SG, Benevenuto NAP, et al. Soil application of selenium in wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress improves grain quality and reduces production losses[J]. *Plants*, 2024, 13(24): 3460-3460.
- [20] Liu YX, Hu SH, Jiang ZH, et al. Selenium biofortification modulates plant growth, microelement and heavy metal concentrations, selenium uptake, and accumulation in black-grained wheat [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12748523-748523.
- [21] 中华人民共和国国家标准. 农作物种子检验规程: GB/T3543.1-3543.7[M]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [22] 刘新菲, 卢正才, 崔荣敏, 等. 微波消解法测定大米中的硒[J]. *质量与安全检验检测*, 2022, 32(01): 26-28.
- [23] 蒋卓儒, 蒋益中. 3,3'-二氨基联苯胺分光光度法水质总硒测定的方法验证[J]. *中国检验检测*, 2018, 26(03): 11-15.
- [24] 傅晓莉. 分光光度法测定中药注射剂中钾离子的含量[J]. *成都医药*, 1998, 24(03): 176-177.
- [25] 钟国秀, 黄清华, 杨浩义. 偶氮氯膦III分光光度法测定硅铁中钙[J]. *冶金分析*, 2010, 30(07): 69-71.
- [26] 马美范. 邻菲罗啉比色法测定啤酒中铁含量及试验条件的探讨[J]. *山西食品工业*, 1996, (04): 37-39.
- [27] Puccinelli M, Malorgio F, Pezzarossa B. Selenium enrichment of horticultural crops[J]. *Molecules*, 2017, 22(6): 933-933.
- [28] Broadley RM, White JP, Bryson JR, et al. Biofortification of UK food crops with selenium[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2006, 65(2): 169-181.
- [29] 周诗悦, 李 荣, 周晨霓, 等. 硒在"土壤-作物-食品-人体"食物链中的流动[J]. *食品科学*, 2023, 44(09): 231-244.
- [30] Xia FS, Wang CC, Li YY, et al. Influence of priming with exogenous selenium on seed vigour of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Legume Research - An International Journal*, 2021, 44(9): 1124-1127.
- [31] 王淑英, 樊廷录, 程万莉, 等. 硒肥浸种对低温胁迫玉米种子发芽和幼苗生长的影响[J]. *玉米科学*, 2022, 30(06): 54-58.
- [32] 张昊楠. 低温下硒对水稻种子萌发及根系活力的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [33] 冯 魁, 马艳明, 田新年, 等. 亚硒酸钠浸种对春小麦种子萌发特性的研究[J]. *种子*, 2017, 36(09): 39-43.
- [34] 何士敏, 张 燕, 易 涵. 硒浸种对豌豆种子萌发的生理生化效应[J]. *种子*, 2012, 31(02): 42-47.
- [35] 王晓洁, 阮 新, 杨 波, 等. 大麦苗富硒研究[J]. *食品科学*, 2008(08): 253-257.
- [36] Ashotovich AN, Vladimirovich AB, Anusha SS, et al. Effect of selenium nanoparticles on biological and morphofunctional parameters of barley seeds (*Hordéum vulgáre* L.) [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 6453-6453.
- [37] 周让让, 刘 韬, 陈 红, 等. 青海富硒地区 31 份小麦新品系硒、铁、锌含量分析[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(08): 2725-2732.
- [38] Tobiasz A, Walas S, Filek M, et al. Effect of selenium on distribution of macro- and microelements to different tissues during wheat ontogeny [J]. *Biologia Plantarum*, 2014, 58(2): 370-374.
- [39] Souza DAG, Carvalho DGJ, Rutzke M, et al. Evaluation of germplasm effect on Fe, Zn and Se content in wheat seedlings[J]. *Plant Science*, 2013, (210): 206-213.