



孙小川,丁竞,王纪忠,等.外源硒对萝卜芽苗菜生长特性及营养品质的影响[J].黑龙江农业科学,2023(8):66-71.

外源硒对萝卜芽苗菜生长特性及营养品质的影响

孙小川¹,丁 竞²,王纪忠¹,周晓玉¹,徐 坤¹,王 娟¹

(1. 淮阴工学院 生命科学与食品工程学院,江苏 淮安 223003; 2. 江苏省淮安市淮安区农业技术推广中心,江苏 淮安 223003)

摘要:为提高萝卜芽苗菜产量和品质,开发富硒萝卜与芽苗菜,以‘四季青’萝卜为试材,设置6个亚硒酸钠处理浓度(0,2,4,6,8和10 mg·L⁻¹),研究外源硒浸种处理对萝卜种子萌发、芽苗菜的生长指标、生理指标和营养品质的影响。结果表明,适宜浓度的亚硒酸钠浸种处理能够有效促进萝卜种子萌发,提高芽苗菜的生长及营养品质。与对照相比,6 mg·L⁻¹亚硒酸钠浸种处理能有效促进萝卜种子萌发和芽苗菜生长,其发芽率、发芽率、鲜重和干重分别提高了7.22%、5.75%、43.43%和46.03%;提升了萝卜芽苗菜的抗氧化能力,SOD、POD和CAT等抗氧化酶活性显著提高,膜脂过氧化产物MDA含量得到抑制;同时,显著改善了芽苗菜的营养品质,其中硝态氮含量降低了23.30%,可溶性糖和可溶性蛋白含量分别提高了131.25%和80.92%。此外,萝卜芽苗菜中总硒含量随硒处理浓度升高而增加,在10 mg·L⁻¹时最高。综上所述,本试验条件下,最适宜萝卜种子萌发和芽苗菜生长的亚硒酸钠浸种处理浓度是6 mg·L⁻¹。

关键词:萝卜;芽苗菜;硒处理;萌发;生长指标;营养品质

硒(Se)是环境中重要的生命元素,也是人体必需的营养元素之一,在人体内能够发挥诸多效用。相关研究表明,人体缺硒可引起某些重要器官的功能失调,导致许多严重疾病的发生,如大骨节病和克山病可能与缺硒密切相关^[1-2]。我国是严重缺硒的国家之一,从东三省起斜穿至云贵高原,

占国土面积72%的地区缺硒,其中30%为严重缺硒地区,因而导致当地农作物硒含量较低,达不到人体的摄入需求^[3]。植物作为人类摄入硒元素的重要来源,补充硒营养的重要途径之一就是提高农产品硒含量。目前通过在作物生产中人工施用硒肥,可以增加作物产量,提高营养品质和硒含量,已在马铃薯^[4]、芒果^[5]、大豆^[6-8]、生菜^[9]、枣^[10]、蔬菜^[11]、水稻^[12]等作物上取得了一定成效。然而,硒对植物生长发育的影响也存在剂量效应,即适量的硒能够促进植物生长发育,提高作物产量与品质,但过量的硒则会对植物产生毒害作用,进而抑制植物生长^[13-14]。

收稿日期:2023-04-11

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(32102399);江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20181062);淮阴工学院博士科研启动基金(Z301B16556)。

第一作者:孙小川(1987—),男,博士,讲师,从事蔬菜作物遗传育种与分子生物学研究。E-mail: xchsun1987@163.com。

Abstract: *Amygdalus mira* (Koehne) is a deciduous tree of Rosaceae, which has excellent characteristics such as cold resistance and drought resistance. In order to explore the expression conditions of RanBP1 protein in *A. mira* Koehne and analyze its regulatory role in stress defense response, AmRanBP1 was obtained by homologous cloning using the gene sequence of *Prunus persica* in the database. The results showed the ORF of this gene was 696 bp in length, encoding 231 amino acids. Bioinformatics analysis results indicated it has no transmembrane region, stable hydrophilic, and no signal peptide structure. Protein sequence and phylogenetic analysis showed that AmRanBP1 had high homology with RanBP1 proteins of other plants, such as *Malus domestica*, *Glycine max*. The pET-21a-AmRanBP1 fusion expression vector was constructed, and the protein expression conditions were optimized. The recombinant protein with higher concentration was obtained at 40 °C, IPTG concentration of 2.00 mmol·L⁻¹ and induction time of 4.0 h. Monoclonal antibody was prepared after purification of AmRanBP1 fusion protein. Finally, the expression pattern of AmRanBP1-transformed strains in *E. coli* was investigated by simulating various abiotic stress conditions. The results showed that the stress resistance of AmRanBP1-transformed strains was better than that of empty vector under various stress conditions, and the advantages were significant under high temperature, NaCl and CuSO₄ stress, further indicating that RanBP1 may play a role in the defense response of *A. mira* Koehne. This study laid a foundation for revealing the biological role of AmRanBP1 protein.

Keywords: *Amygdalus mira* (Koehne); Ran binding protein 1; abiotic stress

芽苗菜被称为“活体蔬菜”,是一种无公害、绿色安全、营养丰富、清爽可口的新型蔬菜,近年来逐渐成为人们餐桌上深受欢迎的一道美食。芽苗菜具有较强的无机硒富集和转化能力,施硒之后的芽苗菜在生长特性、营养物质、生理活性等方面都得到显著提高^[15]。张凡等^[16]在豇豆芽苗菜的产量品质及保护酶活性的研究中发现,硒浸种浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时最适宜豇豆芽苗菜生长。在赤豆芽苗菜培育过程中,采用适量 ($4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的亚硒酸钠溶液浸种对赤豆芽产量和品质的提高非常有利,赤豆芽苗菜的可溶性糖、VC 含量显著提升,保护酶活性提高,硝酸盐含量降低^[17]。萝卜是十字花科萝卜属一二年生根菜类经济作物,在我国栽培历史悠久,种植面积广,作为大众蔬菜深受人们喜爱。但其在种植过程中存在生长周期长、栽培管理繁琐的弊端。因此,在营养价值等方面与萝卜相近、生长周期短、种植简单的萝卜芽苗菜受到广泛关注。目前针对萝卜芽苗菜的研究多集中于栽培基质、播种密度、光照条件等对芽苗菜产量和品质的影响^[18-22],也有相关研究发现硒处理影响了萝卜芽苗菜花青素的积累^[23],但关于施硒影响萝卜芽苗菜产量和营养品质的综合评价研究却鲜有报道。因此,本研究以常见的萝卜品种为试材,探究不同浓度硒浸种对萝卜种子萌发、芽苗菜生理特性及营养品质的影响,旨在为提高萝卜芽苗菜产量和品质,开发富硒萝卜与芽苗菜提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为‘四季青’萝卜,当地农资市场购买。该萝卜含水量高,通体青绿,食用起来脆甜爽口。

硒肥为亚硒酸钠(分析纯含量 99%),由西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司提供。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2021 年在淮阴工学院园艺实训基地进行,选取籽粒饱满均匀的萝卜种子,在常温条件下进行,采用 6 组不同浓度 Na_2SeO_3 溶液浸种处理,0(CK),2,4,6,8 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 分别记作 Se_0 、 Se_2 、 Se_4 、 Se_6 、 Se_8 和 Se_{10} 。每次浸种 6 h,重复 2 次,浸种完成后捞出种子用蒸馏水冲洗干净,沥干多余水分后均匀平铺于 $33 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$ 的育苗盘内,盘内铺设一张育苗纸并用清水浸湿,播

种密度为 $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,置于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温箱中避光培养,在此期间应保持种子一直处于温暖湿润的环境。

1.2.2 测定项目及方法 生长指标测定:在播种 2 和 6 d 后统计发芽种子数,并计算发芽率和发芽势。10 d 后收获并每个处理随机选取 20 株芽苗菜测定相关指标。采收后,用电子天平称取植株的鲜重,再用烘干称重法,将称重后的植株放入纸袋中,置于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱杀青 15 min,再用 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温烘干至恒重即为干重。

生理指标及营养指标测定:超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定;硝态氮含量采用水杨酸比色法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定。具体测定参照李合生^[24]的方法。

样品总硒含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定^[25]。

1.2.3 数据分析 采用 Excel 2016 进行数据处理及绘图制作,运用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 硒处理对萝卜种子萌发及芽苗菜生长指标的影响

由表 1 可知,使用 6 组不同浓度的硒溶液浸种处理后,整体上萝卜种子的发芽势、发芽率及芽苗菜的干重和鲜重均呈先升高后降低的趋势,且硒溶液浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,萝卜种子的萌发及芽苗菜的干重和鲜重均达到最大值,表明该浓度的硒浸种最大程度地促进了萝卜种子的萌发和芽苗菜的生长。 Se_6 处理使萝卜种子的发芽势和发芽率分别显著提高了 7.22% 和 5.75%,而 Se_{10} 处理显著降低了萝卜种子的发芽势和发芽率。

与对照相比, Se_2 、 Se_4 、 Se_6 和 Se_8 处理下的萝卜芽苗菜鲜重分别显著提高了 20.66%、22.31%、43.43% 和 13.45%,而 Se_{10} 处理则使其鲜重下降了 7.89%。不同硒处理($\text{Se}_2 \sim \text{Se}_{10}$)使萝卜芽苗菜干重分别提高了 23.02%、31.75%、46.03%、29.37% 和 4.76%。相关结果表明,硒对萝卜芽苗菜的生长存在剂量效应,即适宜浓度

(0~8 mg·L⁻¹)的硒处理有助于萝卜种子的萌发及芽苗菜的生长,且最佳硒处理浓度为 6 mg·L⁻¹,过量的硒(10 mg·L⁻¹)则起到抑制作用。

表 1 硒处理对萝卜种子萌发及芽苗菜生长指标的影响

处理	发芽势/%	发芽率/%	鲜重/g	干重/g
Se ₀ (CK)	83.51±1.74 b	93.09±1.08 bc	13.31±0.45 d	1.26±0.07 c
Se ₂	85.26±1.68 ab	94.31±1.26 ab	16.06±0.30 bc	1.55±0.08 b
Se ₄	82.12±3.57 bc	95.79±1.33 ab	16.28±0.43 b	1.66±0.10 b
Se ₆	89.54±1.55 a	98.44±0.78 a	19.09±1.02 a	1.84±0.08 a
Se ₈	81.78±1.38 bc	91.38±0.88 cd	15.10±0.58 c	1.63±0.06 b
Se ₁₀	78.40±1.54 c	88.07±1.62 d	12.26±0.73 d	1.32±0.11 c

注:不同小写字母表示在 P<0.05 水平差异显著。

2.2 硒处理对萝卜芽苗菜抗氧化能力的影响

2.2.1 抗氧化酶活性 由图 1A 可知,萝卜芽苗菜中抗氧化酶活性随着硒溶液浓度的增加呈现先升高后降低的趋势,其中,6 mg·L⁻¹ 处理后抗氧化酶活性达到峰值。与对照相比,在 Se₂、Se₄ 和 Se₆ 处理下,萝卜芽苗菜中 SOD 活性分别显著提高了 24.00%、40.41% 和 62.82%,POD 活性分别显著提高了 13.40%、31.34% 和 81.72%,CAT 活性分别显著提高了 53.03%、83.75% 和 114.80%,其中,6 mg·L⁻¹ 的硒处理对抗氧化酶活性的促进作用最显著。当硒溶液浓度过高(8~10 mg·L⁻¹)时,抗氧化酶活性受到一定的抑制,活性开始下降。

2.2.2 丙二醛(MDA)含量 由图 1B 可知,在适宜浓度的硒溶液处理下,萝卜芽苗菜中 MDA 含量显著降低。与对照相比,Se₂、Se₄ 和 Se₆ 处理下的萝卜芽苗菜中 MDA 含量分别显著下降了 26.01%、35.75% 和 57.63%,在硒溶液浓度为 6 mg·L⁻¹ 时,MDA 含量处于最低水平。当硒溶液浓度大于 6 mg·L⁻¹ 时,萝卜芽苗菜中的 MDA 含量逐步回升,且在 10 mg·L⁻¹ 处理下显著高于对照,表明高浓度的硒反而对植物有一定毒害作用,造成细胞膜通透性变差。

2.3 硒处理对萝卜芽苗菜营养品质和硒含量的影响

2.3.1 硝态氮含量 由图 2 可知,在适宜浓度的硒溶液处理下,萝卜芽苗菜中硝态氮含量降低,能够减少进入人体内的硝酸盐含量,从而提高芽苗菜品质和适口性。与对照相比,Se₂、Se₄ 和 Se₆ 处理下的萝卜芽苗菜中硝态氮含量分别下降了 4.72%、8.69% 和 23.30%,在硒处理浓度为 6 mg·L⁻¹ 时,硝态氮含量最低。当硒溶液浓度超过 6 mg·L⁻¹

时,萝卜芽苗菜中的硝态氮含量逐步上升,且高于对照水平,可能影响萝卜芽苗菜的生长和品质。

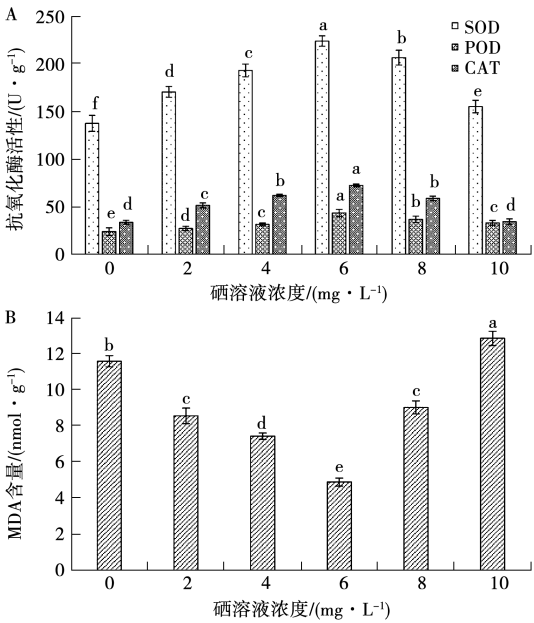


图 1 硒处理对萝卜芽苗菜抗氧化酶活性(A)和丙二醛含量(B)的影响

注:不同小写字母表示处理间在 P<0.05 水平差异显著。下同。

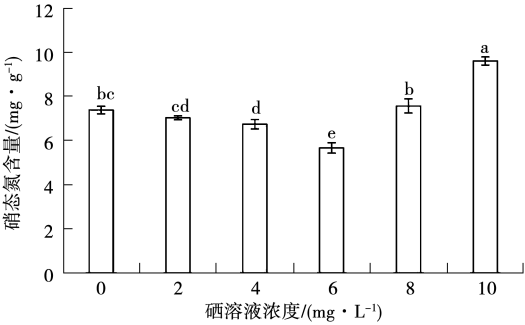


图 2 硒处理对萝卜芽苗菜硝态氮含量的影响

2.3.2 可溶性糖含量 由图 3 可知,使用不同浓度的硒溶液浸种处理后,萝卜芽苗菜中可溶性糖含量均显著高于对照,分别显著提高了 25.00%、50.00%、131.25%、62.50%和 31.25%。当硒溶液浓度为 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,萝卜芽苗菜中可溶性糖含量最高。随着处理浓度的进一步增加,可溶性糖含量逐渐下降,但仍高于对照。

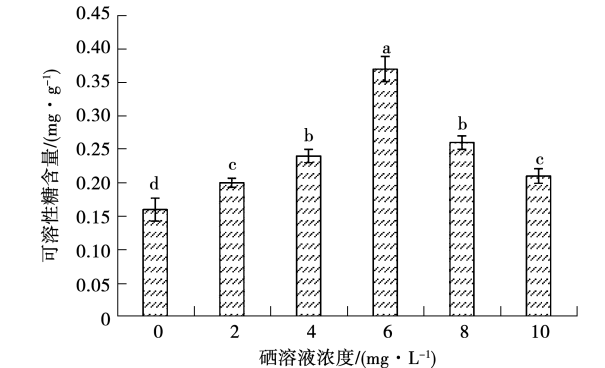


图 3 硒处理对萝卜芽苗菜可溶性糖含量的影响

2.3.3 可溶性蛋白含量 由图 4 可知,除 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 外,使用不同浓度的硒溶液浸种处理后,萝卜芽苗菜中可溶性蛋白含量均显著高于对照,分别提高了 42.66%、85.12%、80.92%和 28.37%。当硒溶液浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,可溶性蛋白含量达到最高值。随着处理浓度的增加,可溶性蛋白含量呈下降趋势,当硒浓度高达 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,与对照相比,可溶性蛋白含量下降 18.06%,表明过量的硒会对萝卜芽苗菜的营养品质造成不利影响。

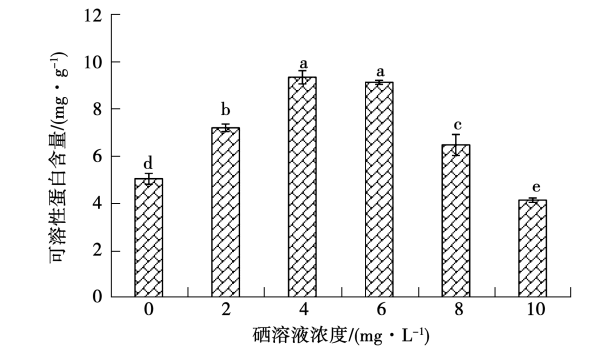


图 4 硒处理对萝卜芽苗菜可溶性蛋白含量的影响

2.3.4 总硒含量 由图 5 可知,不同浓度硒溶液浸种处理能有效提高萝卜芽苗菜的总硒含量。萝卜芽苗菜中总硒含量随硒溶液浓度增加而显著增加,在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最高,达到 $7.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比对照提高了 20.3 倍,表明在一定范围内萝卜芽苗菜中的总硒含量与硒溶液处理浓度呈正相关。

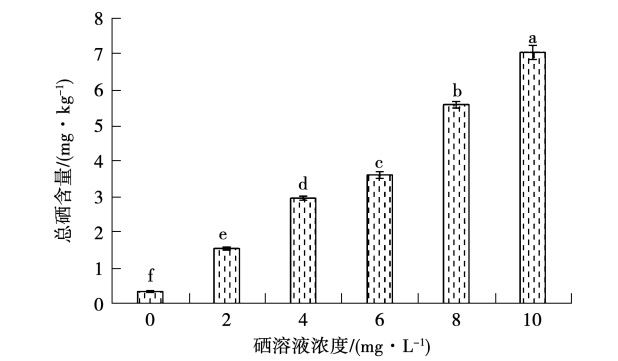


图 5 硒处理对萝卜芽苗菜中总硒含量的影响

3 讨论

种子萌发指标和芽苗菜产量是评判外源硒对萝卜芽苗菜生产的影响中最直观也是最受关注的指标。在本研究中,随着硒浸种溶液浓度的升高,萝卜种子及其芽苗菜在发芽率、发芽势、干重和鲜重等农艺性状方面均呈现先上升后下降的趋势,这与刘淑琴等^[6]、吴小丽等^[14]的研究结果相似,其中 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的亚硒酸钠浸种处理效果最佳。这一结果也符合一般必需微量元素的生物效应规律,即适量的硒能够增强植物体内的能量代谢,有效促进作物的种子萌发和幼苗生长,而过量的硒则会造成一定程度的毒害作用^[26]。与对照相比,当亚硒酸钠浸种浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时萝卜种子发芽势、发芽率和鲜重均有一定程度下降,而干重略微上升,表明萝卜种子萌发和芽苗菜生长在该硒剂量下表现出了一定的逆境生理变化,但在芽苗菜干物质的增长上仍然有促进作用。

硒作为谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的组成成分,已被证实能够显著增强富硒芽苗菜的抗氧化能力^[27-28]。刘霄霏等^[29]的研究发现,施加适量的硒可显著提高镉胁迫下黑麦草的 SOD 和 POD 活性,降低 MDA 含量,从而缓解植株遭受的重金属胁迫伤害。吴小丽等^[14]的研究成果也表明,使用适宜浓度的亚硒酸钠溶液浸种处理甜瓜种子对于增强甜瓜幼苗体内 SOD、POD 和 CAT 的活性有着明显的促进作用。本试验结果表明,萝卜芽苗菜在硒浸种浓度为 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的 SOD、POD 和 CAT 酶活性最高,MDA 含量最低,表明该剂量的硒处理对萝卜芽苗菜的保护效果最好。相对于 POD 和 CAT,硒处理后的萝卜芽苗菜 SOD 酶活性差异更显著,这可能是由于硒间接通过 GSH-Px 系统调控 SOD 活性从而达到清除植物体内自由基的效果^[30]。此外,随着硒溶液浓度的增加,抗氧化酶活性也有所降低,这同样可能

是由高硒对植物的毒害作用引起的,也与外界环境条件、硒作用形式的多样性等因素有关。

可溶性糖和可溶性蛋白是作物品质重要的评价指标,而硝酸盐含量与营养安全密切相关,已成为蔬菜无公害生产的限制因素之一^[31]。宋波等^[13]发现叶面喷施适宜浓度($2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的有机硒溶液可以促进生菜生长,提高 VC、可溶性糖和蛋白质含量。以不同浓度亚硒酸钠溶液浸种花生种子后发现,适量的硒浸种可提高花生芽苗菜的品质,其中浸种浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时花生芽苗菜的 VC、可溶性糖含量最高, $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的硝酸盐含量最低^[32]。随着硒浸种浓度的升高,绿豆芽的可溶性蛋白、VC 含量先升高后下降,可溶性糖含量则逐渐上升^[33]。在本研究中,适量的硒浸种可提高萝卜芽苗菜的营养品质,其中 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浸种处理下可溶性糖和可溶性蛋白含量最高,硝酸盐含量最低,这与闫春花等^[17]的研究结果一致。此外,张弛等^[34]研究表明,当补硒浓度 $< 15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,油菜幼苗的硝酸还原酶、淀粉酶活性随着硒浓度的增加而提高,这可能也是本试验中萝卜芽苗菜可溶性糖含量增加和硝酸盐含量降低的原因。当硒浓度继续增加后,萝卜芽苗菜的营养品质指标迅速下降,进一步证实了过量硒会对植物造成毒害作用。

然而,要综合评价硒浸种处理对萝卜芽苗菜营养品质的影响,本试验还有改进空间,更多营养品质指标(如 VC 含量、游离氨基酸、纤维素含量等)的测定将能更全面地反映出施硒对萝卜芽苗菜营养品质的促进作用。

本试验还发现,不同浓度硒溶液浸种显著提高了萝卜芽苗菜中硒含量,且硒含量与硒溶液处理浓度呈正相关,在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最高,达到 $7.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。过去我国卫生部发布的《食物中硒限量卫生标准》(GB 13105—1191)及《食品中污染物限量标准》(GB 2762—2005)中规定了鲜蔬菜中硒含量的最高限值为 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,此后相关限制取消,对于食品中的硒含量不做限制。然而硒摄入量的安全范围较窄,我国营养学会推荐的成人摄入量为 $50\sim 250\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,日常膳食硒最高安全摄入量为 $400\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,人体硒中毒界限量为 $800\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。而本研究中不同浓度硒浸种处理下的萝卜芽苗菜硒含量均超过先前规定的 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 限值,因此,还需进一步研究硒浸种对萝卜各个生育时期及萝卜肉质根硒含量的影响,确定安全浸种浓度。后续将进一步探索其他

硒肥类型(如有机硒)和施用方式(如土壤补充、叶面喷施硒肥)对萝卜芽苗菜产量和品质的影响,以便更好地为富硒萝卜和芽苗菜生产提供参考。

4 结论

适宜浓度的外源硒浸种处理可以有效提高萝卜芽苗菜生长和营养品质,其中 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的亚硒酸钠溶液浸种处理可以有效促进萝卜种子的萌发和芽苗菜的生长,诱导萝卜芽苗菜中 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性,抑制膜脂过氧化产物 MDA 含量,减少硝态氮含量,提高可溶性糖和可溶性蛋白等营养品质及硒含量,对富硒萝卜芽苗菜生产具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] RAYMAN M P. Selenium and human health[J]. Lancet, 2012,379(9822):1256-1268.
- [2] 王凯,卢维宏,张乃明,等.土壤作物系统中的硒与人体健康[J].肥料与健康,2020,47(1):5-10,69.
- [3] 屈兰竺,杨松杰,嵇苏,等.微量必需元素硒的作用探析[J].中国农学通报,2010,26(7):94-97.
- [4] 王素华,万国安,秦玉芝,等.外源硒对马铃薯农艺性状及产量品质的影响[J].农业科学研究,2021,42(4):37-44,55.
- [5] 陈锦平,农梦玲,何景云,等.不同硒肥处理对芒果果实硒含量及品质的影响[J].热带农业科学,2021,41(6):1-5.
- [6] 刘淑琴,陈永波,秦邦,等.硒浸种对大豆种子发芽率和富集效果的影响[J].微量元素与健康研究,2018,35(6):45-46.
- [7] 卫玲,肖俊红,刘博,等.叶面喷施硒肥对黑大豆生长及品质的影响[J].大豆科技,2020(4):1-5,19.
- [8] HUANG Y, LEI N, XIONG Y, et al. Influence of selenium biofortification of soybeans on speciation and transformation during seed germination and sprouts quality[J]. Foods, 2022,11(9):1200.
- [9] 孙崇庆,马晓春,高艳明,等.硒肥对植物工厂水培生菜生长及品质的影响[J].中国瓜菜,2020,33(6):24-29.
- [10] 王清华,井大炜,杜振宇,等.不同时期叶面喷施对冬枣含硒量与品质的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(2):226-232.
- [11] 王彩霞,谢良商,张文,等.不同浓度硒对薤菜产量和品质的影响[J].广东农业科学,2014,41(10):55-58.
- [12] 杨益花,袁卫明,单建明,等.叶面硒肥施用量对稻谷总硒含量及产量的影响[J].河北农业科学,2013,17(3):51-54.
- [13] 宋波,温佳乐,陆佳怡,等.外源硒对沙质栽培生菜生长和品质的影响[J].现代园艺,2021,44(4):3-5.
- [14] 吴小丽,马留辉,卢明,等.外源硒对甜瓜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].现代农业科技,2021(13):63-66.
- [15] 王露露,肖园园,徐晨凤,等.芽苗菜集硒特性及富硒芽苗菜生理活性研究进展[J].食品安全质量检测学报,2023,14(10):103-109.
- [16] 张凡,崔晓萌,杜新民.硒对豇豆芽苗菜产量品质及保护酶活性的影响[J].农业与技术,2013,33(10):2-3.
- [17] 闫春花,杜新民.硒对赤豆芽苗菜产量品质及保护酶活性

的影响[J]. 现代农业科技, 2014(21):71-72.

[18] 余婷,王前贵,田强,等. 光照强度对豌豆、萝卜芽苗菜营养品质及酚类含量的影响[J]. 农业工程, 2021, 11(7): 113-119.

[19] 张静,薛芾,卢燕,等. 不同基质对萝卜芽苗菜生长及营养品质的影响[J]. 现代农业科技, 2020(19):66-68,75.

[20] 孙丽,张静祎,刘振威,等. 不同光质对萝卜芽苗菜生长和品质的影响[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(3):257-261.

[21] 鲁燕舞,张晓燕,耿殿祥,等. 光质对萝卜芽苗菜总酚类物质含量及抗氧化能力的影响[J]. 园艺学报, 2014, 41(3): 545-552.

[22] 刘乃森,刘福霞,胡群,等. 播种密度对萝卜芽苗菜产量及品质的影响[J]. 北方园艺, 2009(7):84-85.

[23] CHEN J, CHEN H, WANG H, et al. Selenium treatment promotes anthocyanin accumulation in radish sprouts (*Raphanus sativus* L.) by its regulation of photosynthesis and sucrose transport [J]. Food Research International, 2023, 165: 112551.

[24] 李合生. 植物生理学实验技术指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.

[25] 谭均,李隆云,彭锐. 硒元素 ICP-OES 分析方法研究[J]. 重庆中草药研究, 2017(1):1-5.

[26] LI Y, ZHU N, LIANG X, et al. A comparative study on the accumulation, translocation and transformation of selenite, selenate, and SeNPs in a hydroponic-plant system [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 189:109955.

[27] LAZO-VELEZ M A, GUARDADO-FELIX D, AVILES-GONZALEZ J, et al. Effect of germination with sodium selenite on the isoflavones and cellular antioxidant activity of soybean (*Glycine max*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 93:64-70.

[28] SAYRA N, DANIELA G F, JANET A. Changes in digestibility of proteins from chickpeas (*Cicer arietinum* L.) germinated in presence of selenium and antioxidant capacity of hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2019, 285:290-295.

[29] 刘霄霏,李惠英,陈良,等. 外源硒对镉胁迫下黑麦草生长和生理的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(1):72-79.

[30] 覃新云,农可懿,吕其壮,等. 微量元素硒的抗氧化作用研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(10):272-278.

[31] LI H, WANG Z, LI B. Relationship between vegetable nutrition and nitrate content [J]. The Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9):1667-1672.

[32] 杜新民,张海春. 硒对花生芽菜产量、品质及保护酶活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(15):3568-3570.

[33] 张华华,李航宇,秦少伟,等. 硒浸种对绿豆芽用特性及营养品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(8):1-4.

[34] 张驰,周大寨,吴永尧,等. 硒对油菜苗期生长和生理生化指标的影响[J]. 湖北农业科学, 2007(3):363-365.

Effects of Exogenous Selenium on Growth Characteristics and Nutritional Quality of Radish Sprouts

SUN Xiaochuan¹, DING Jing², WANG Jizhong¹, ZHOU Xiaoyu¹, XU Kun¹, WANG Juan¹

(1. College of Life Sciences and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China;
2. Huai'an District Agricultural Technology Extension Center, Huai'an 223003, China)

Abstract: In order to improve the yield and quality of radish sprouts and develop selenium-rich radish and sprouts, six different concentrations (0, 2, 4, 6, 8, 10 mg·L⁻¹) of Na₂SeO₃ solutions were utilized to explore the effects of exogenous selenium on the seed germination, growth indices, physiological indices and nutritional quality of radish sprouts using the radish cultivar 'Sijiqing' as the test materials. The results suggested that the seed soaking treatment with appropriate concentration of Na₂SeO₃ solution could effectively promote the germination of radish seeds and further improve the growth and nutritional quality of radish sprouts. Compared with the control, the seed soaking treatment with 6 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ solutions could effectively promote the germination of radish seeds and the growth of sprouts, with the germination potential, germination rate, fresh weight and dry weight increased by 7.22%, 5.75%, 43.43% and 46.03%, respectively. The antioxidant capacity of radish sprouts was improved. The activity of antioxidant enzymes such as SOD, POD and CAT were significantly increased, and the content of MDA in membrane lipid peroxidation products was inhibited. Meanwhile, the nutritional quality of sprouts was significantly elevated, in which the content of nitrate nitrogen decreased by 23.30%, whereas the contents of soluble sugar and soluble protein increased by 131.25% and 80.92%, respectively. Furthermore, the total selenium content in radish sprouts would go up with the increase of selenium treatment concentration, which was the highest at 10 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ solutions. In conclusion, the most optimum Na₂SeO₃ concentration of seed soaking for the radish germination and sprout growth was 6 mg·L⁻¹ in this experiment.

Keywords: radish; sprouts; selenium treatment; germination; growth indices; nutritional quality