

芽苗菜集硒特性及富硒芽苗菜生理活性研究进展

王露露¹, 肖园园¹, 徐晨凤¹, 张 驰¹, 邓伶俐¹, 商龙臣^{1,2*}

(1. 湖北民族大学生物与食品工程学院, 恩施 445000; 2. 恩施土家族苗族自治州农业科学院, 恩施 445000)

摘 要: 硒是人体的必需微量元素, 具有抗氧化、抗癌等多种生理活性, 缺硒往往导致慢性疾病的发生。发芽富硒培育是提高芽苗菜硒含量的有效途径。芽苗菜具有较强的无机硒富集和转化能力, 且因资源丰富、生物利用度高而备受消费者欢迎。众多研究表明, 富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。本文对芽苗菜的集硒途径、集硒条件、富硒芽苗菜的生理活性等方面的研究现状进行了综述, 在此基础上探讨了富硒芽苗菜的发展前景, 以期对富硒芽苗菜的开发利用提供一定的理论支撑。

关键词: 芽苗菜; 集硒特性; 有机硒; 生理活性

Research progress on selenium collection characteristics and physiological activity of selenium-rich sprouts

WANG Lu-Lu¹, XIAO Yuan-Yuan¹, XU Chen-Feng¹, ZHANG Chi¹,
DENG Ling-Li¹, SHANG Long-Chen^{1,2*}

(1. College of Biological and Food Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China; 2. Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture Academy of Agricultural Sciences, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China)

ABSTRACT: Selenium is an essential trace element for the human body, which has many physiological activities such as antioxidants and anticancer. Selenium deficiency often leads to chronic diseases. Selenium enriched germination cultivation is an effective way to increase selenium content in sprouts. The sprouts have a strong ability to enrich and transform inorganic selenium, and are popular among consumers because of their rich resources and high bioavailability. Many researchers have shown that the growth characteristics, nutrients and physiological activities of the sprouts enriched with selenium have been significantly improved. This paper systematically reviewed the research status relating to selenium-collecting methods and conditions, as well as the selenium-rich sprouts' physiological activity. On this basis, explored the development prospect of selenium-rich sprouts, which is expected to provide some theoretical support in guiding the development and utilization of selenium-rich sprouts.

KEY WORDS: sprout; selenium feature set; organic selenium; physiological activity

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划资助项目(D20221902)、湖北民族大学高水平科研成果校内培育项目(PY22009)、湖北民族大学生物与食品工程学院研究生创新项目(SGYC2022013)

Fund: Supported by the Science and Technology Research Project of Hubei Provincial Department of Education (D20221902), the High-level Scientific Research Achievement Cultivation Project of Hubei Minzu University (PY22009), and the Graduate Innovation Project of the College of Biology and Food Engineering, Hubei Minzu University (SGYC2022013)

***通信作者:** 商龙臣, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品物性与营养。E-mail: 2021021@hbmzu.edu.cn

***Corresponding author:** SHANG Long-Chen, Ph.D, Lecturer, College of Biological and Food Engineering, Hubei Minzu University, Xueyuan Road, Wuyangba District, Enshi 445000, China. E-mail: 2021021@hbmzu.edu.cn

0 引言

硒(Se)是人体的必需微量元素之一^[1-2]。然而不同地区的土壤硒含量差异很大, 现有研究表明, 包括欧洲、中东和我国在内的众多缺硒地区, 其居民的硒摄入量并不理想^[3]。人体硒元素的安全摄入范围为 50~200 $\mu\text{g}/\text{d}$, 欧洲食品安全局建议, 男性每日硒推荐摄入量为 70 $\mu\text{g}/\text{d}$, 女性为 60 $\mu\text{g}/\text{d}$, 哺乳期妇女为 75 $\mu\text{g}/\text{d}$, 这是一个更具体的剂量^[4]。土壤缺硒往往会导致严重的地方性硒相关疾病, 如克山病和大骨节病^[5]。而硒摄入过量同样会导致神经系统紊乱、指甲和毛发脱落等症状^[6]。富硒食品的摄入是重要的安全补硒途径。因此, 对植物性食品原物料进行硒强化成为了缺硒群体获取富硒食品的重要途径之一。

植物的硒强化通常指的是以硒酸盐、亚硒酸盐或硒代蛋氨酸等含硒物质为硒源, 采用土壤补充、叶面或果实喷洒以及种子浸泡等方法提高植物体硒含量的措施^[7]。其中, 借助植物种子的萌发过程以强化其硒含量是生产富硒食品较为简单、快速和有效的方法^[8]。处于发芽过程中的种子是可以用于植物集硒的高效载体, 由种子发育而成的芽苗因而被称为硒积累器, 其可吸收不同类型的硒并将其积累同化存于体内。在种子的萌发过程中, 源于外界的硒元素会参与植物体中蛋白质、多糖等生物大分子的合成, 从而实现硒的富集和转化^[9]。也正因如此, 包括芽苗菜在内的多种植物芽作为功能性食品资源日渐引人关注^[10]。现有研究表明, 发芽后的富硒谷物不仅可以提高种子的营养价值, 而且富硒后谷物的硒含量可提高 68%~98%, 并在萌发 5~8 d 后硒浓度达到最高^[11]。因此, 发芽的谷物和豆类有望成为兼具保健和药用价值的功能性膳食硒补充剂。

芽苗菜的集硒能力强且富含多种生物活性物质, 具有抗炎、抗氧化、抗癌等多种生物活性^[12]。因而非常适合用于富硒食品的开发。本文从芽苗菜的集硒途径和集硒条件、富硒芽苗菜的生理活性及其开发状况等方面综述了富硒芽苗菜近年来的研究进展, 以期对富硒芽苗菜作为补硒营养源的进一步研究和开发提供参考。

1 芽苗菜的集硒途径

植物硒代谢不仅与硒的剂量密切相关, 同时也与硒的集硒途径有关。因此, 为了更高效对芽苗菜进行生物硒强化, 有必要探讨适合芽苗菜的集硒途径, 从而促进其无机硒向有机硒的转化。芽苗菜的主要施硒方式如图 1 所示。

1.1 施硒方式对芽苗菜集硒特性的影响

1.1.1 种子浸泡

浸泡是芽苗菜生产工艺中的重要单元操作, 可确保种子吸收足够的水分以进入发芽阶段。用含硒溶液浸泡种子后, 硒可参与植物种子的一系列代谢过程而成为芽



图 1 芽苗菜的主要施硒方式

Fig.1 Main selenium application methods of sprouts

苗菜体内的含硒营养成分。 Na_2SeO_3 作为一种无机硒, 其用于人体补硒时的安全剂量范围十分狭窄(每日最大安全量为 400 μg)。而通过含硒溶液浸泡种子的方式, 可在一定程度上将无机硒转化成有机硒, 从而减少无机硒的毒害作用。GUARDADO-FÉLIX 等^[13]使用不同浓度的 Na_2SeO_3 溶液浸泡处理鹰嘴豆, 其发芽后的总异黄酮、苯丙氨酸解氨酶活性和抗氧化能力分别显著提高了 83%、56%和 33%。这与 GUARDADO-FÉLIX 等^[14]报道的集硒方式相似。郭博涵^[15]则探究了 3 种施硒方式对绿豆集硒特性的影响, 方式 1 是使用不同浓度的富硒培养液连续培养 3 d, 方式 2 是先用富硒培养液培养 1 d 后再用超纯水继续培养 2 d, 方式 3 是每天更换等浓度的富硒培养液, 连续培养 3 d。其研究结果显示, 若只考虑绿豆芽的萌发率、下胚轴长、根长等生理指标, 则前两种施硒效果更好。但若以绿豆芽干粉中总硒、水溶态硒、酸溶态硒和碱溶态硒含量为观测指标, 则第 3 种方式较优。因此, 需要根据具体的观测指标来选择合适的集硒方式。PAWEL 等^[16]选用质量浓度为 15 mg/L 的 6 种有机硒化合物浸泡羽衣甘蓝种子, 以豆芽机培育 7 d, 每天浇水 150 mL, 70%的湿度, 光照条件下持续 10 h 以上。结果显示, 实验组硒含量显著性高于对照组, 并且不同有机硒化合物浸泡豆芽后的硒剂量存在显著差异。这与羽衣甘蓝和大头菜芽硒强化的实验结果相似^[17]。由以上研究可知, 随着硒元素的施加, 芽苗菜其根系含硒化合物浓度增大, 其体内有机硒含量升高。此外, 硒的施加也有助于提高芽苗菜的生物量, 也促进了其营养物质的合成。因此, 硒溶液浸泡是有效的芽苗菜硒强化途径。

1.1.2 叶面喷施和根部灌溉

硒生物强化的主要方法是叶面喷施和根部灌溉, 叶面喷施是将含硒溶液直接喷洒在植物的叶面上, 利用植物叶片吸收硒元素。根部灌溉是将含硒溶液直接注入植物的根系区域, 让植物通过根部吸收。在 SILVA 等^[18]的实验中, 29 种豇豆在硒浓度为 12.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的土壤中用温室培育, 结果显示, 豇豆组织中的硒含量有显著性的提高, 证实了硒肥施用对于谷物硒的吸收及转化的有效性。施用的硒酸盐被土壤截留较少, 有利于豇豆中硒的积累^[19]。LUO 等^[20]对开花期的花生芽分别以叶面喷施和根部灌溉的方式施用硒肥(50、75 和 100 $\text{g}/\text{公顷}$), 对比研究了两种方式对花生芽

集硒特性的影响。研究结果显示, 增加肥料中的硒水平提高了花生仁中有机硒和无机硒含量。且与根部灌溉相比, 叶面喷施更有利于花生中无机硒向有机硒的生物转化。此外, 董俊辉^[21]以不同浓度 Na_2SeO_3 溶液采用浸种和喷施相结合的方式处理萝卜芽苗菜, 其结果显示, 萝卜芽苗菜各部位硒含量均随着外源硒浓度增加而有所升高, 且较低浓度硒(<10 mg/L)能够促进萝卜芽生长, 而高浓度的硒(>20 mg/L)则显示出一定的生长抑制作用。其研究结果表明, 0.1 mg/L Na_2SeO_3 浸种处理或 0.5 mg/L Na_2SeO_3 喷施处理适合生产富硒萝卜芽苗菜。

综合来看, 叶面喷施可以快速地提供植物所需的营养元素, 但容易受到气候、湿度等环境因素的影响。根部灌溉能够更有效地补充土壤中的养分, 适用于需要长期供应营养元素的植物, 但由于养分需要时间才能被吸收, 集硒效果可能不如叶面喷施。根据植物的生长状态和需求, 利用叶面喷施和根部灌溉相结合的方式比单一方法更加有效。另外, 硒的形式和可用性也取决于其他因素, 如: 施用方法、施用时间、混合物的 pH 和浓度对芽苗菜集硒特性的影响。

1.2 培育条件对芽苗菜集硒特性的影响

集硒条件与芽苗菜的质量和品质密切相关, 培养液硒浓度、浸泡时长、浸泡水温、培养时间等均会对种子的发芽率、下胚轴长、根长等生物指标产生影响。因此, 有必要不断优化培育条件, 为芽苗菜的集硒过程创造更好的生长发芽环境。

吴小勇等^[22]评估了集硒条件对绿豆集硒效果的影响, 其研究确定了绿豆浸泡所需的最佳工艺条件为: 以 3 倍于绿豆干重的 Na_2SeO_3 溶液(30 $\mu\text{g/mL}$)浸泡时间 5 h, 在此条件下总硒含量可达到 14.86 $\mu\text{g/g}$, 其中有机硒含量为 14.77 $\mu\text{g/g}$ 。黄志立等^[23]的研究表明, 过高的硒浓度会抑制豆芽的生长,

且硒浓度高于 35 ng/mL 时, 往往会导致豆芽的腐烂, 而硒浓度低于 20 ng/mL 时则对豆芽的生长无显著影响。此外, 该研究还探讨了硒浓度对豆芽中超氧化物歧化酶活性的影响, 其结果表明, 过高的硒浓度会抑制超氧化物歧化酶的活性。张华等^[24]的研究也得到了相似的结论, 即低浓度的硒可以提高绿豆芽的产量和产出比, 促进其下胚轴长并提高其维生素 C 含量, 且以 10 $\mu\text{mol/L}$ 的 Na_2SeO_3 溶液浸泡时间 12 h 有利于绿豆芽中硒的富集。孟君等^[25]试验表明, 在最佳的培养条件(16 $\mu\text{g/mL}$ 的稀溶液培养 4 d)下, 绿豆芽的硒含量可达到 42.23 $\mu\text{g/g}$, 显示出较好的生长特性和集硒能力, 可用于富硒产品的开发之中。另一方面, 李蕾等^[26]对比研究了 6 种豆科植物芽苗的富硒能力, 筛选出了最优的富硒品种为绿豆及最佳的富硒条件为硒浓度 80 mg/kg 条件下培养 5 d, 其萌发率达到最高(86%)。余碧霞^[27]在 6 mg/L 的 Na_2SeO_3 溶液中培养香椿芽, 最终得到富硒香椿芽的发芽率为 76%, 总硒含量和有机硒含量分别为 0.096 $\mu\text{g/g}$ 和 0.064 $\mu\text{g/g}$ 。另外也有学者分别研究得出鹰嘴豆芽、豌豆芽、豇豆芽在最佳的集硒条件下, 鹰嘴豆芽的富硒效率、豌豆芽的总硒含量、豇豆芽的酶活性显著提高^[28-30]。

硒在化学上类似于硫(S), 可通过根质膜中存在的硫转运蛋白被植物吸收, 通过硫同化途径代谢。在合适的集硒条件下, 芽苗菜能够有效地摄入和利用硒, 从而提高体内硒的含量和活性, 并且提高它们的免疫力和抗氧化能力。此外, 集硒条件还包括合适的硒来源和方法。例如, 纳米硒、有机硒等方式可以提高芽苗菜对硒的吸收和利用效率, 从而提高集硒效果。相反, 缺乏硒的土壤、水源和饲料会影响集硒效果, 甚至可能导致硒缺乏症。综上所述, 集硒条件是影响集硒效果的关键因素之一。表 1 总结了各类芽苗菜的最佳集硒条件及集硒效果。

表 1 芽苗菜的最佳集硒条件及集硒效果
Table 1 Best selenium collection condition and selenium collection effect of sprouts

品种	最佳集硒条件	集硒效果	参考文献
绿豆芽	以 3 倍于绿豆干重的 Na_2SeO_3 溶液(30 $\mu\text{g/mL}$)于 35℃浸泡 5 h	硒含量可达到 14.86 $\mu\text{g/g}$, 其中有机硒含量为 14.77 $\mu\text{g/g}$	[22]
	使用 Na_2SeO_3 溶液(10 $\mu\text{mol/L}$)浸泡 12 h	提高产量和产出比, 并增加根长、下胚轴长、总长和维生素 C 含量	[24]
	硒浓度(16 $\mu\text{g/mL}$)条件下培养 4 d	硒含量 42.23 $\mu\text{g/g}$	[25]
	外源硒浓度(80 mg/kg)条件下培养 5 d	在此条件下萌发率达到最高(86%)	[26]
香椿芽	Na_2SeO_3 溶液(6 mg/L)于 28℃浸泡 8 h	发芽率达到 76%、总硒和有机硒含量分别为 0.096 $\mu\text{g/g}$ 和 0.064 $\mu\text{g/g}$	[27]
黄豆芽	硒浓度(6 $\mu\text{g/mL}$)条件下培养 5 d	硒含量达 8.82 $\mu\text{g/g}$	[25]
鹰嘴豆芽	Na_2SeO_3 溶液(50 mg/L)于 28℃避光培养 5 d	鹰嘴豆芽的生长最好, 且富硒效率也最高(5.47%)	[28]
豌豆芽	40 $\mu\text{mol/L}$ 纳米硒、24℃光照 16 h、20℃黑暗 8 h、相对湿度为 40%	生物量、维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量显著增加	[29]
豇豆芽	硒浓度(6 mg/L)于 25℃浸种 6 h	显著提高豇豆芽发芽率、发芽势和产量	[30]

2 富硒芽苗菜的生理活性

大量的研究表明,芽苗菜具有一定的抗氧化、抗肿瘤、抗炎等生理活性,富硒之后芽苗菜的生理活性会得到显著提高。

2.1 抗氧化活性

硒的抗氧化作用是细胞通过谷胱甘肽过氧化物酶而发挥的^[31]。而硒与芽苗菜的有机结合可显著增强富硒芽苗菜的抗氧化能力。LAZO-VELEZ 等^[32]采用 Na_2SeO_3 浸泡得到的富硒豆芽中异黄酮含量以及抗氧化能力显著提高,富硒豆芽显示出较高的细胞抗氧化能力可主要归因于其较高的异黄酮含量^[33]。GUARDADO-FÉLIX 等^[13]的研究结果显示,用 Na_2SeO_3 (2 mg/100 g 种子)处理的鹰嘴豆芽,其总异黄酮、苯丙氨酸酶活性和抗氧化能力分别提高了 83%、56% 和 33%,而 GUARDADO-FÉLIX 等^[14]的研究也得到了相似的结果:富硒之后的鹰嘴豆芽脂肪氧化酶活性降低,因此具有更高的抗氧化活性。此外,SAYRA 等^[34]发现,外源硒的存在可使萌发的鹰嘴豆芽的抗氧化能力显著提高,其主要原因可能是硒对芽体中蛋白的水解过程具有调节作用,一定程度上减少了发芽时贮藏蛋白的降解,进而提高其抗氧化能力。而 HU 等^[35]的研究显示,富硒大豆中硒蛋白的抗氧化活性相比对照组提高了 4 倍,原因可能是大豆中硒含量的增加从而使其抗氧化活性提高。此外,硒蛋白增强的羟基自由基清除活性可部分归因于其金属螯合能力^[36]。硒对细胞的影响主要与氧化还原循环有关,在抗氧化试验中,硒以超营养剂量进入细胞,并执行多种机制来抵消氧化应激^[37]。由以上研究可知,经过硒处理的芽苗菜,其抗氧化活性得到显著提高。

2.2 抗肿瘤活性

大量的流行病学研究表明,硒缺乏是癌症的重要诱发因素之一。硒含量较高的人群,其患癌风险要比缺硒人群低 2~6 倍^[38-39]。硒可降低致癌物质的致癌性,并能增强人体红细胞免疫黏附肿瘤细胞的能力,选择性抑制癌细胞^[40-41]。AVILA 等^[42]实验结果显示,富硒西兰花芽可以很好地积累化学预防化合物(甲基硒代半胱氨酸和硫代葡萄糖苷),而硫代葡萄糖苷对肿瘤明显的抑制作用早已见于诸多报道。DANIELA 等^[43]的实验表明,含有超营养水平硒的鹰嘴豆芽可减少免疫抑制小鼠异种移植结肠癌细胞的肿瘤生长。较高的硒摄入量(2.29 $\mu\text{g/g}$)可增加谷胱甘肽过氧化物酶和硫氧还蛋白还原酶活性、胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇水平,显著降低肿瘤的生长。贾礼^[44]的实验结果表明,饲喂富硒萝卜芽苗菜可明显减少小鼠肝细胞的凋亡数目,由此显示出富硒萝卜芽苗菜对小鼠肝脏的抗氧化酶活性的改善结果。PAŠKO 等^[45]研究了

硒强化后的羽衣甘蓝芽对胃肠道癌细胞、前列腺癌细胞和甲状腺癌细胞的作用,结果表明了硒强化后的羽衣甘蓝芽对癌细胞有一定的抑制作用。主要原因可能是有机硒强化过的芽苗菜会影响硫代葡萄糖苷等一些物质的合成,进而使其抗肿瘤活性增强。

2.3 抗炎活性

硒对于维持正常的免疫功能至关重要,有助于改善机体的炎症状态^[46]。而现有的研究也表明,富硒芽苗菜也具有一定的抗炎活性。巨噬细胞是机体重要的免疫细胞,其分泌的炎症细胞因子,如肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6) 等可调节机体免疫应答,但是过度的免疫应答往往会引发炎症(诱发癌症的重要因素之一),从而有可能加快癌症的进展并降低治疗的效果^[47]。PAWEŁ 等^[16]的研究首次描述了富硒羽衣甘蓝芽对炎症因子(TNF- α 、IL-6)具有抑制作用。贾礼^[44]检测了小鼠肝脏中的 IL-6 等炎症反应相关基因的表达量,证实了进食富硒萝卜芽苗菜可以抑制小鼠炎症相关基因的表达,进而减轻了炎症反应。

目前,对于富硒芽苗菜生理活性的研究大部分都集中在抗氧化活性方面,不少研究者也验证了外源硒干预对富硒芽苗菜抗氧化活性的强化作用,除此之外,也有一部分学者研究了富硒芽苗菜的抗肿瘤活性和抗炎活性,但相关生理活性的研究还不是很多,仍然需要研究者不断的努力,另外需要进一步给出其更深层次的机制。现将近年来涉及富硒芽苗菜生理活性的相关研究总结于表 2。

3 富硒芽苗菜的产品开发状况

我国大部分地区属于缺硒地区,富硒食品因而更受人们的欢迎,市面上的富硒产品也日渐丰富,如:富硒豆芽饮料、富硒大豆麦芽发酵的面包等。富硒芽苗菜等产品的开发也为硒产业提供了更加广阔的发展前景。黄泽元等^[48]制备风味独特的富硒豆芽饮料,硒含量达 156 $\mu\text{g/kg}$ 。STABNIKOVA 等^[49]采用富硒大豆麦芽生产面包,发现富硒大豆麦芽发酵面包可以增强酵母和乳酸菌的活性,且品质更优。另有实验证明,在肉仔鸡日粮中添加富硒豆芽(0.3 mg/kg)对肉仔鸡有显著促生长的作用,且改善肉仔鸡的饲料转化率^[50]。任明德等^[51]也采用相似的方式在日粮中添加不同水平富硒豆芽粉用于生产富硒鸡蛋,添加量以 7.5~30.0 g/kg 为宜,可明显提高鸡蛋产蛋性能。然而,尽管目前已有较多学者关注富硒芽苗菜产品的研发,但大多还处于实验室阶段,相关科研成果的落地、转化和推广仍然需要领域内研究者持续不断的努力投入。

表 2 富硒芽苗菜的生理活性及研究方法
Table 2 Physiological activities and research methods of selenium-rich sprouts

品种	生理活性	研究方法	研究结果	参考文献
富硒大豆芽	抗氧化	超氧自由基、羟基自由基清除效果的测定; 细胞抗氧化活性研究	富硒豆芽中异黄酮含量以及抗氧化能力显著提高	[32,35]
富硒鹰嘴豆芽	抗氧化	异黄酮芒柄花黄素的生物合成; 细胞抗氧化活性研究	用 Na ₂ SeO ₃ (2 mg/100 g 种子)处理的鹰嘴豆芽, 其抗氧化能力提高了 33%	[13–14,34]
富硒萝卜芽苗菜	抗肿瘤	小鼠肝脏中的转化生长因子等细胞凋亡相关基因表达量	饲喂富硒萝卜芽苗菜可减少小鼠肝细胞的凋亡数目	[44]
富硒鹰嘴豆芽	抗肿瘤	小鼠体内实验	富硒鹰嘴豆芽可减少免疫抑制小鼠异种移植结肠癌细胞的肿瘤生长	[43]
富硒羽衣甘蓝芽	抗肿瘤	酶联免疫吸附测定试剂盒检测细胞因子	富硒羽衣甘蓝芽对胃肠道癌细胞、前列腺癌细胞和甲状腺癌细胞有抑制作用	[45]
富硒西兰花芽	抗癌	硫代葡萄糖苷含量的测定	富硒西兰花芽中硫代葡萄糖苷含量比普通西兰花芽高 6 倍, 因而具有更强的抗癌活性	[42]
富硒萝卜芽苗菜	抗炎	小鼠肝脏中 IL-6 等炎症反应相关基因的表达量	富硒萝卜芽苗菜可以抑制炎症相关基因的表达	[44]
富硒羽衣甘蓝芽	抗炎	体外炎症模型(TNF- α 、IL-6)	富硒羽衣甘蓝芽对炎症因子具有抑制作用	[45]

4 展 望

富硒芽苗菜虽然已被证实有众多的生理活性, 但高效定向的富硒途径仍然比较匮乏, 未来更深入的研究应集中在以下 5 个方面: 一是精细定量地探究硒形态、剂量以及施用的时机和方式对芽苗菜硒代谢的影响, 结合植物生理学, 挖掘出适应不同植物物种、生长阶段和栽培条件的集硒方法; 其次, 高剂量的硒对植物体同样有一定的毒害作用, 不仅会抑制芽苗菜的生长发育, 其体内过高的无机硒含量也可能产生健康隐患。因此, 如何在低剂量的施硒条件下提高芽苗菜的有机硒转化效率并对其生物活性进行系统的评价也是未来该领域内重要的研究内容; 第三, 发芽富硒食品的安全性也很重要, 有必要进行更深入地研究硒元素诱导植物产生这些生物化合物的机制; 第四, 研究影响其生物可及性和生物利用度的机制; 第五, 开发具有更好市场前景的产品。

随着人们健康意识的提高, 科学安全的补硒方法日渐深入人心, 基于植物发芽的富硒途径作为一种简洁高效的富硒方法备受研究者青睐。富硒芽苗菜具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎等多种生理活性, 对该领域持续系统的研究不仅有助于促进富硒食品产业的发展, 对于改善人体健康同样具有重要意义。

参考文献

[1] ASBAGHI O, SABOORI S, HEKMATDOOST A, *et al.* Effects of selenium supplementation on serum C reactive protein level: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled clinical trials [J]. *Obes Med*, 2020, 17: 100182.

[2] 姜晓玉, 杨柳, 王英辉, 等. 微藻富硒生物转化研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(17): 5739–5746.

JIANG XY, YANG L, WANG YH, *et al.* Research progress of selenium-rich biotransformation in microalgae [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(17): 5739–5746.

[3] XIONG Y, HUANG Y, LI L, *et al.* A review of plant selenium-enriched proteins/peptides: Extraction, detection, bioavailability, and effects of processing [J]. *Molecules*, 2023, 28(3): 1223.

[4] GARCÍA-MORALES S, LEÓN-MORALES JM, GARCÍA-GAYTÁN V, *et al.* Plant-based foods biofortified with selenium and their potential benefits for human health [Z]. 2023.

[5] LIU H, WANG X, ZHANG B, *et al.* Concentration and distribution of selenium in soils of mainland china, and implications for human health [J]. *J Geochem Explor*, 2021, 220: 106654.

[6] LV Q, LIANG X, NONG K, *et al.* Advances in research on the toxicological effects of selenium [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2021, 106: 715–726.

[7] WEN D. Selenium in horticultural crops [J]. *Sci Hortic-Amsterdam*, 2021, 289: 110441.

[8] DENG B, TIAN S, LI S, *et al.* A simple, rapid and efficient method for essential element supplementation based on seed germination [J]. *Food Chem*, 2020, 325: 126827.

[9] WAN J, ZHANG M, ADHIKARI B. Advances in selenium-enriched foods: From the farm to the fork [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 76: 1–5.

[10] 华正莹. 发芽富硒糙小米抗氧化活性研究及其速食粉的研制[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.

HUA ZY. Study on antioxidant activity and instant powder development of germinated selenium-enriched rough millet [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.

[11] LAZO-VELEZ MA, AVILES-GONZALEZ J, SERNA-SALDIVAR SO, *et al.* Optimization of wheat sprouting for production of selenium enriched kernels using response surface methodology and desirability function [J]. *Lwt-Food Sci Technol*, 2016, 65: 1080–1086.

- [12] GENG J, LI J, ZHU F, *et al.* Plant sprout foods: Biological activities, health benefits, and bioavailability [J]. *J Food Biochem*, 2022, 46(3): e13777.
- [13] GUARDADO-FÉLIX D, SERNA-SALDIVAR SO, CUEVAS-RODRÍGUEZ EO, *et al.* Effect of sodium selenite on isoflavonoid contents and antioxidant capacity of chickpea (*Cicer arietinum* L.) sprouts [J]. *Food Chem*, 2017, 226: 69–74.
- [14] GUARDADO-FÉLIX D, SERNA-SALDIVAR SO, GUTIÉRREZ-URIBE JA, *et al.* Selenium in germinated chickpea (*Cicer arietinum* L.) increases the stability of its oil fraction [J]. *Plants*, 2019, 8(5): 113.
- [15] 郭博涵. 自培富硒绿豆芽中有机硒的提取及其生物有效性评价[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021.
- GUO BH. Extraction of organic selenium from self-cultivating selenium-enriched mung bean sprouts and evaluation of its biological effectiveness [D]. Shenyang: Liaoning University, 2021.
- [16] PAWEŁ Z, PAWEŁ P, ENRIQUE DÁ, *et al.* Synthesis of novel organic selenium compounds and speciation of their metabolites in biofortified kale sprouts [J]. *Microchem J*, 2022, 172: 106962.
- [17] ZAGRODZKI P, PAŠKO P, GALANTY A, *et al.* Does selenium fortification of kale and kohlrabi sprouts change significantly their biochemical and cytotoxic properties? [J]. *J Trace Elem Med Bio*, 2020, 59: 126466.
- [18] SILVA VM, NARDELI AJ, MENDES NAC, *et al.* Application of sodium selenate to cowpea (*Vigna unguiculata* L.) increases shoot and grain se partitioning with strong genotypic interactions [J]. *J Trace Elem Med Bio*, 2021, 67: 126781.
- [19] SILVA VM, BOLETA EHM, MARTINS JT, *et al.* Agronomic biofortification of cowpea with selenium: Effects of selenate and selenite applications on selenium and phytate concentrations in seeds [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(13): 5969–5983.
- [20] LUO LY, ZHANG JP, ZHANG KY, *et al.* Peanut selenium distribution, concentration, speciation, and effects on proteins after exogenous selenium biofortification [J]. *Food Chem*, 2021, 354: 129515.
- [21] 董俊辉. 施硒对萝卜植株与芽苗菜营养品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- DONG JH. Effects of selenium application on nutritional quality of radish plants and sprouts [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [22] 吴小勇, 王志, 王秀霞, 等. 绿豆富硒工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2008, (2): 197–198, 299.
- WU XY, WANG Z, WANG XX, *et al.* Study on technology of mung bean selenium enrichment [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2008, (2): 197–198, 299.
- [23] 黄志立, 麦炳培. 硒元素在绿豆芽中的富集研究[J]. *食品科学*, 2004, (6): 200–203.
- HUANG ZL, MAI BP. Study on enriching selenium in mung bean [J]. *Food Sci*, 2004, (6): 200–203.
- [24] 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.
- ZHANG HH, LI HY, QIN SW, *et al.* Effects of soaking with selenium on the sprout traits and nutritional quality of mung bean sprout [J]. *Food Res Dev*, 2015, 36(8): 1–4.
- [25] 孟君, 董梦娜, 张峻松, 等. 富硒豆芽培育条件研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(22): 57–61.
- MENG J, DONG MN, ZHANG JS, *et al.* Study on cultivation of selenium-rich bean sprouts [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(22): 57–61.
- [26] 李蕾, 董静洲, 程水源. 6种豆科植物芽苗的富硒能力比较筛选与富硒条件研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(5): 102–108.
- LI L, DONG JZ, CHENG SY. Comparative screening of selenium-enriched ability and study on selenium-enriched conditions of six species of leguminous plants sprouts [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 47(5): 102–108.
- [27] 余碧霞. 硒对香椿芽苗菜品质的影响及香椿芽苗菜富硒工艺的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- YU BX. Study on the effect of selenium on the quality of toona sinensis and its process [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017.
- [28] 张玲, 阿吉艾可拜尔·艾萨, 夏作理. 鹰嘴豆芽富硒培养研究[J]. *营养学报*, 2007, (6): 619–620.
- ZHANG L, ARJIAIKEBAIER AIS, XIA ZL. Study on selenium accumulation of chickpea sprout [J]. *Acta Nutr Sin*, 2007, (6): 619–620.
- [29] 肖贤, 李丽, 罗延延, 等. 纳米硒对豌豆芽苗生理指标与品质的影响[J]. *贵州农业科学*, 2021, 49(5): 17–22.
- XIAO X, LI L, LUO YY, *et al.* Effects of nano-selenium on physiological indicators and quality of pea sprouts [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2021, 49(5): 17–22.
- [30] 张凡, 崔晓萌, 杜新民. 硒对豇豆芽苗产量品质及保护酶活性的影响[J]. *农业与技术*, 2013, 33(10): 2–3.
- ZHANG F, CUI XM, DU XM. Effects of selenium on yield and quality of cowpea sprouts and protective enzyme activities [J]. *Agric Technol*, 2013, 33(10): 2–3.
- [31] 焦璐, 巨家升, 周连玉, 等. 乳酸菌富硒特性及生物活性的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(14): 178–184.
- JIAO L, JU JS, ZHOU LY, *et al.* Research progress of characteristics and bioactivities of selenium-enriched lactic acid bacteria [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(14): 178–184.
- [32] LAZO-VELEZ MA, 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 Sci Technol*, 2018, 93: 64–70.
- [33] GUZMAN-ORTIZ FA, SAN MARTIN-MARTINEZ E, VALVERDE ME, *et al.* Profile analysis and correlation across phenolic compounds, isoflavones and antioxidant capacity during germination of soybeans (*Glycine max* L.) [J]. *Cyta-J Food*, 2017, 15(4): 516–524.
- [34] SAYRA N, DANIELA GF, JANET A. Changes in digestibility of proteins from chickpeas (*Cicer arietinum* L.) germinated in presence of selenium and antioxidant capacity of hydrolysates [J]. *Food Chem*, 2019, 285: 290–295.
- [35] HU J, ZHAO Q, CHENG X, *et al.* Antioxidant activities of Se-SPI produced from soybean as accumulation and biotransformation reactor of natural selenium [J]. *Food Chem*, 2014, 146: 531–537.
- [36] LI CP, HE Z, WANG X, *et al.* Selenization of ovalbumin by dry-heating in

- the presence of selenite: Effect on protein structure and antioxidant activity [J]. Food Chem, 2014, 148: 209–217.
- [37] ZHANG L, LI Q, YANG X, *et al.* Effects of sodium selenite and germination on the sprouting of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and its content of selenium, formononetin and biochanin a in the sprouts [J]. Biol Trace Elem Res, 2012, 146(3): 376–380.
- [38] 陈霄汉, 张驰. 硒化合物抗肿瘤研究进展[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2016, 34(2): 189–194.
- CHEN XH, ZHANG C. Research advance of anticancer action on selenium compounds [J]. J Hubei Univ Nation (Nat Sci Ed), 2016, 34(2): 189–194.
- [39] 邱玉爽, 邵雷, 陈代杰, 等. 硒抗肿瘤作用的研究进展[J]. 世界临床药物, 2017, 38(5): 344–347.
- QIU YS, SHAO L, CHEN DJ, *et al.* Research progress on anti-tumor effect of selenium [J]. World Clin Drugs, 2017, 38(5): 344–347.
- [40] MIAO Q, XU J, LIN A, *et al.* Recent advances for the synthesis of selenium-containing small molecules as potent antitumor agents [J]. Curr Med Chem, 2018, 25(17): 2009–2033.
- [41] CARLISLE AE, LEE N, MATTHEW-ONABANJO AN, *et al.* Selenium detoxification is required for cancer-cell survival [J]. Nat Metab, 2020, 2(7): 603–641.
- [42] AVILA FW, FAQUIN V, YANG Y, *et al.* Assessment of the anticancer compounds se-methylselenocysteine and glucosinolates in se-biofortified broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) sprouts and florets [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(26): 6216–6223.
- [43] DANIELA GF, MARILENA AR, MARÍA R, *et al.* Chickpea (*Cicer arietinum* L.) sprouts containing supranutritional levels of selenium decrease tumor growth of colon cancer cells xenografted in immune-suppressed mice [J]. J Funct Foods, 2019, 53: 76–84.
- [44] 贾礼. 富硒萝卜芽苗菜的营养品质及其缓解小鼠肝损伤作用机理的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- JIA L. Nutritional quality of selenium enriched radish sprouts and its mechanism of alleviating liver injury in mice [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.
- [45] PAŠKO P, GALANTY A, ZAGRODZKI P, *et al.* Varied effect of fortification of kale sprouts with novel organic selenium compounds on the synthesis of sulphur and phenolic compounds in relation to cytotoxic, antioxidant and anti-inflammatory activity [J]. Microchem J, 2022, 179: 107509.
- [46] KUDVA AK, SHAY AE, PRABHU KS. Selenium and inflammatory bowel disease [J]. Am J Phy, 2015, 309(2): G71–G77.
- [47] GERMANO G, ALLAVENA P, MANTOVANI A. Cytokines as a key component of cancer-related inflammation [J]. Cytokine, 2008, 43(3): 374–379.
- [48] 黄泽元, 王海滨, 任海东, 等. 富硒绿豆芽饮料研制[J]. 食品工业, 1999, (2): 25–26.
- HUANG ZY, WANG HB, REN HD, *et al.* Development of selenium-enriched mung bean sprout beverage [J]. Food Ind, 1999, (2): 25–26.
- [49] STABNIKOVA O, ANTONIUK M, STABNIKOV V, *et al.* Ukrainian dietary bread with selenium-enriched soya malt [J]. Plant Food Hum Nutr, 2019, 74(2): 157–163.
- [50] 周之寅. 富硒豆芽对肉仔鸡生产和免疫性能的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(8): 2335–2336, 2344.
- ZHOU ZY. Effects of high-selenium soybean sprouts on the growth performance and immune function of broiler chicken [J]. J Anhui Agric Sci, 2014, 42(8): 2335–2336, 2344.
- [51] 任明德, 李和平, 崔景浩, 等. 日粮添加富硒豆芽粉对鸡蛋品质与硒沉积的影响[J]. 黑龙江动物繁殖, 2021, 29(3): 16–22.
- REN MD, LI HP, CUI JH, *et al.* Effects of dietary supplementation of selenium-enriched bean sprouts powder on egg quality and selenium deposition [J]. Heilongjiang J Anim Reprod, 2021, 29(3): 16–22.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



王露露, 硕士研究生, 主要研究方向为硒营养与功能评价。
E-mail: 271665929@qq.com



商龙臣, 博士, 讲师, 主要研究方向为食物物性与营养。
E-mail: 2021021@hbmzu.edu.cn