

不同质量分数亚硒酸钠对碎米荠生物量和营养成分的影响

胡回^{1*}, 刘星²

¹长江大学园艺园林学院, 湖北 荆州

²湖南省邵阳县河伯乡人民政府, 湖南 邵阳

收稿日期: 2023年11月7日; 录用日期: 2023年11月16日; 发布日期: 2024年2月5日

摘要

以荆州市野生碎米荠为试材, 采用叶面喷施硒肥和基质栽培的方式, 研究了喷施质量分数为0 (CK)、15、30、45 mg·L⁻¹亚硒酸钠(Na₂SeO₃)对碎米荠生长和营养成分的影响, 并进行相关性和回归分析, 以期碎米荠人工补硒栽培技术提供实践依据。结果表明, 在不同亚硒酸钠质量分数处理下, 鲜重、干重、可溶性糖、维生素C、膳食纤维和氨基酸含量均呈现先上升后下降趋势, 均在30 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃处理下达到最大值; 可溶性蛋白质含量与硒含量均呈升高趋势, 在45 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃处理下达到最大值。相关性分析表明维生素C对鲜重、可溶性糖和氨基酸正向相关, 可溶性蛋白质与硒含量正向相关; 回归分析表明Na₂SeO₃质量分数超过30 mg·L⁻¹左右, 碎米荠硒积累速率下降, 可溶性蛋白积累速率稳定。综上所述, 喷施硒肥能促进碎米荠的生长, 30 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃处理下碎米荠的生长量和营养成分最优, 该结果可为碎米荠人工补硒栽培提供理论数据参考。

关键词

碎米荠, 硒浓度, 硒含量, 营养成分

Effects of Sodium Selenite at Different Concentrations on Biomass and Nutrient Composition of *Cardamine occulta*

Hui Hu^{1*}, Xing Liu²

¹Academy of Horticulture and Landscape, Yangtze University, Jingzhou Hubei

²People's Government of Hebo Township, Shaoyang Hunan

Received: Nov. 7th, 2023; accepted: Nov. 16th, 2023; published: Feb. 5th, 2024

*第一作者。

Abstract

The effects of selenium fertilizer spraying on the growth and nutrient composition of wild *Cardamine occulta* in Jingzhou City with mass fraction 0 (CK), 15, 30, 45 mg·L⁻¹ sodium selenite (Na₂SeO₃) were studied. The correlation and regression analysis were conducted. In order to provide a practical basis for the cultivation technology of artificial selenium supplements of *Cardamine occulta*. The results showed that the contents of fresh weight, dry weight, soluble sugar, vitamin C, dietary fiber and amino acid all increased first and then decreased under different sodium selenite mass fraction treatments, and reached the maximum value under 30 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ treatment. Soluble protein content and selenium content both showed an increasing trend and reached the maximum value at 45 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ treatment. The correlation analysis showed that vitamin C was positively correlated with fresh weight, soluble sugar and amino acid, and soluble protein was positively correlated with selenium content. Regression analysis showed that when the mass fraction of Na₂SeO₃ exceeded 30 mg·L⁻¹, the accumulation rate of selenium decreased and the accumulation rate of soluble protein stabilized. In conclusion, selenium fertilizer spraying can promote the growth of *Cardamine occulta*, and the growth amount and nutrient composition of *Cardamine occulta* under the treatment of 30 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ are the best, which can provide theoretical data reference for the cultivation of artificial selenium supplementation of *Cardamine occulta*.

Keywords

Cardamine occulta, Selenium Concentration, Se Content, Nutrient Composition

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硒(Se)是人体所需的必须微量元素之一,也是多种抗氧化酶的组成成分,通过清除生物体内自由基起到抗氧化作用[1]。硒能防癌、抗癌、增强机体免疫力[2],与锌、维生素 E 和 D 联合调节新冠肺炎患者免疫系统,减轻发炎程度[3];此外硒还具有抗重金属[4]、保护肝脏[5]、提高生殖能力[6]等多种功能。硒的存在形式可分为无机硒和有机硒两大类,无机硒必须与有机物质结合才能被人体吸收,而有机硒能直接被机体肠壁吸收,因而吸收效率相对较高[7]。

最新的研究表明植物可以将自然界的无机硒转化为硒多糖、硒蛋白、硒代氨基酸等有机硒,土壤中硒含量越高,植物越容易积累硒[8] [9]。植物的富硒能力受到植物组织、物种、生理条件、发育阶段等因素的影响,大多数植物茎和叶中的硒含量普遍较高[10]。富硒植物又可分为药用和食用两大类,涉及药用植物有百合、罗汉果、铁皮石斛等 32 种[11];食用富硒植物有水稻、小麦、玉米以及野生植物紫萁、碎米荠等[8] [12]。同样,存在一些硒超富集植物,遏蓝菜的叶硒含量超过了国际公认的临界标准,食用致使人类硒中毒[13]。根据世界卫生组织公布资料表明,缺硒是世界范围内的一种普遍现状,补硒已经成为了必要之事。碎米荠(*Cardamine occulta*)是十字花科(Brassicaceae Burnett)碎米荠属(*Cardamine* Linn) 1~2 年生草本植物,是迄今为止发现的世界第 3 大聚硒植物,全草可作野菜食用,亦可药用[14]。我国大约有 40 多种碎米荠,主产温带地区,多分布于湖北省西南部典型的硒化地区恩施市[15]。在自然条件下,碎米荠种子属短命种子,主要靠营养繁殖[16],碎米荠种子在冷冻等适宜条件下可长时间保存,并提高发

芽齐整度; 对高温环境具有一定的耐受性[17]。目前碎米荠多为野生, 人工驯化补硒栽培技术尚不成熟, 如何实现碎米荠富硒规模化和商品化, 扩大碎米荠栽培规模, 有待进一步研究。荆州市地处江汉平原腹地, 拥有大面积富硒土壤, 气候适宜, 给碎米荠富硒产业提供理想生态环境, 具有广阔的发展空间。因此, 通过探究碎米荠最佳富硒栽培方法, 以期为人工补硒栽培技术体系提供理论与实践依据, 为荆州市富硒产业的发展提供理论基础。

2. 材料与方法

2.1. 试验地概况

试验在湖北省荆州市长江大学西校区校外基地进行(112°08'45.024"E、30°20'56.904"N), 地属江汉平原腹地, 东临武汉, 西接宜昌, 南靠岳阳, 北近襄阳。荆州市热带季风气候区, 四季变化分明、光照充足, 太阳年总辐射约 104~110 kcal/cm²。年平均温度 15.9~16.6℃, 年降雨量在 1100~1300 mm 左右, 年无霜期 250~267 d, 平均年日照时数为 1800~2000 h。

2.2. 试验材料

收集长江大学西校区附近可食用野生碎米荠, 将其移栽至校外实习基地, 栽培至果荚成熟后, 收集种子冷藏, 待来年 3 月播种于黄沙和椰糠等体积混合的基质中, 培养幼苗至 3~5 cm 高时进行试验。试验所用试剂为亚硒酸钠(Na₂SeO₃), 分别用电子天平称量 0.015 g、0.030 g 和 0.045 g Na₂SeO₃ 粉末, 再用蒸馏水定容至 1 L, 配置成 15 mg·L⁻¹、30 mg·L⁻¹、45 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ 溶液。

2.3. 试验设计

试验在校外实习基地大棚内进行。碎米荠幼苗完成育苗后, 准备长 19 cm, 宽 24 cm, 高 25.5 cm 的塑料花盆, 装上黄沙和椰糠等体积混合的栽培基质, 并用木棍戳出大小适中的洞, 随机选取长势一致的幼苗移栽于基质中, 注意不能伤到幼苗根系。移栽完后, 浇入充足的水保证幼苗根系和基质充分接触, 后期每日浇水并遮阴处理。待移栽继续育苗一个月后, 设置 1 个 CK 组和 3 个试验组, CK 组叶面喷施蒸馏水, 试验组叶面分别喷施 15 mg·L⁻¹、30 mg·L⁻¹、45 mg·L⁻¹ 浓度的 Na₂SeO₃ 溶液, 共 4 个处理, 每个处理设置 3 个重复实验, 每个重复移栽 10 株碎米荠, 每天 17:00~18:00 处理 1 次, 每次每盆喷施 300 mL 对应溶液, 共处理 10 次, 期间定期浇水、捉虫。处理完成后继续培养 7 天收苗, 测定各项指标。

2.4. 项目测定

将碎米荠从花盆中整株挖出, 保证其完整性, 以蒸馏水清洗, 自然晾干待用。使用电子天平测量碎米荠的鲜重与干重[18]: 每处理取 3 株碎米荠用电子天平称量样品鲜重, 然后随后干燥箱 110℃杀青 10 min, 再 80℃烘干至恒重后测定干重, 精确到 0.001 g, 取平均值; 蒽酮法测量碎米荠的可溶性糖含量[19]: 各处理取 1.0 g 碎米荠鲜样, 研磨至均浆后测定可溶性糖含量; 考马斯亮蓝法测量碎米荠的可溶性蛋白质含量[19]: 各处理取碎米荠鲜样 2.0 g, 研磨离心后加入考马斯亮蓝测定可溶性糖的含量; 2,6-二氯酚靛酚滴定法测量碎米荠的维生素 C 含量[19]: 每处理取 1.0 g 碎米荠鲜样, 加入 2%草酸研磨至均浆, 定容过滤后测定维生素 C 含量; 酶解法测量碎米荠的膳食纤维含量[20]: 各处理将 1.0 g 新鲜碎米荠研磨至均浆, 加入酶解液后经过沉淀、过滤、洗涤和干燥称重等测量膳食纤维含量; 茚三酮显色法测量碎米荠的氨基酸含量[21]: 每处理取 3.0 g 新鲜碎米荠研磨, 经过试液提取后加入茚三酮、磷酸盐缓冲液等测定氨基酸含量; 荧光分光光度法测量碎米荠的硒含量[22]: 将每处理烘干至恒重的碎米荠样品研磨至粉末状, 称取 0.2 g (精确至 0.001 g)于微波消解仪中消化, 冷却后用石墨消解仪加热至近干, 再加入盐酸和铁氰化钾等定容, 用液相色谱-原子荧光光谱仪检测每个处理的总硒含量。

2.5. 数据分析

运用 Excel 2020 进行数据整理, 利用 IBM SPSS 27.0 对数据进行统计学分析, Origin 2022 进行数据绘图。

3. 结果与分析

3.1. 不同质量分数亚硒酸钠对碎米荠生物量的影响

从图 1(a)可以看出, 30 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ 处理生长状况和长势明显较好, 须根最多; 45 mg·L⁻¹ 处理的碎米荠生长状况最差, 须根最少, 根系最短, 明显矮于其他 3 组且枯黄最严重。由图 1(b)和图 1(c)可知, 15、30、45 mg·L⁻¹ 的 Na₂SeO₃ 处理下单株碎米荠鲜重分别为 2.112 g、2.935 g、2.280 g, 与 CK 相比分别增加 16.5%、61.9%和 25.8%, 呈现先上升后下降的趋势, 30 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ 处理下碎米荠鲜重达到最大值; 而干重分别为 0.307 g、0.428 g、0.306 g, 较 CK 分别提高了 18.1%、64.6%和 17.7%, 与鲜重呈现相似的趋势。说明叶面喷施 Na₂SeO₃ 能提高碎米荠鲜重和干重, 其中 30 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ 处理较其他处理而言, 能较大幅度提高碎米荠的鲜重和干重。

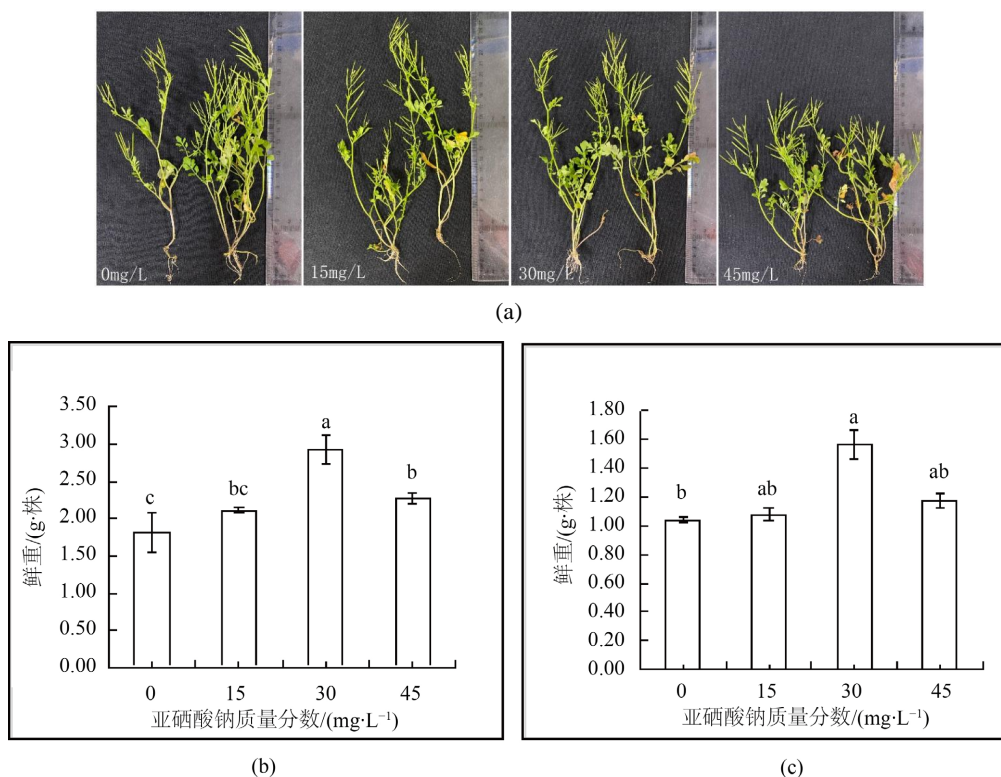


Figure 1. Effects of sodium selenite with different mass fractions on the biomass of *Cardamine occulta*. (a) The growth state of *Cardamine occulta* by spraying with different mass fractions of sodium selenite; (b) Change of fresh weight of cress with different mass fraction of sodium selenite; (c) Dry weight changes of cress with different mass fractions of sodium selenite sprayed

图 1. 不同质量分数亚硒酸钠对碎米荠生物量的影响。(a) 喷施不同质量分数亚硒酸钠碎米荠的生长状态; (b) 喷施不同质量分数亚硒酸钠碎米荠鲜重变化; (c) 喷施不同质量分数亚硒酸钠碎米荠干重变化

3.2. 不同质量分数亚硒酸钠处理对碎米荠营养成分的影响

由图 2 可知, 碎米荠经 15、30、45 mg·L⁻¹ 的 Na₂SeO₃ 处理后, 可溶性糖含量分别较 CK 提高了 36.04%、

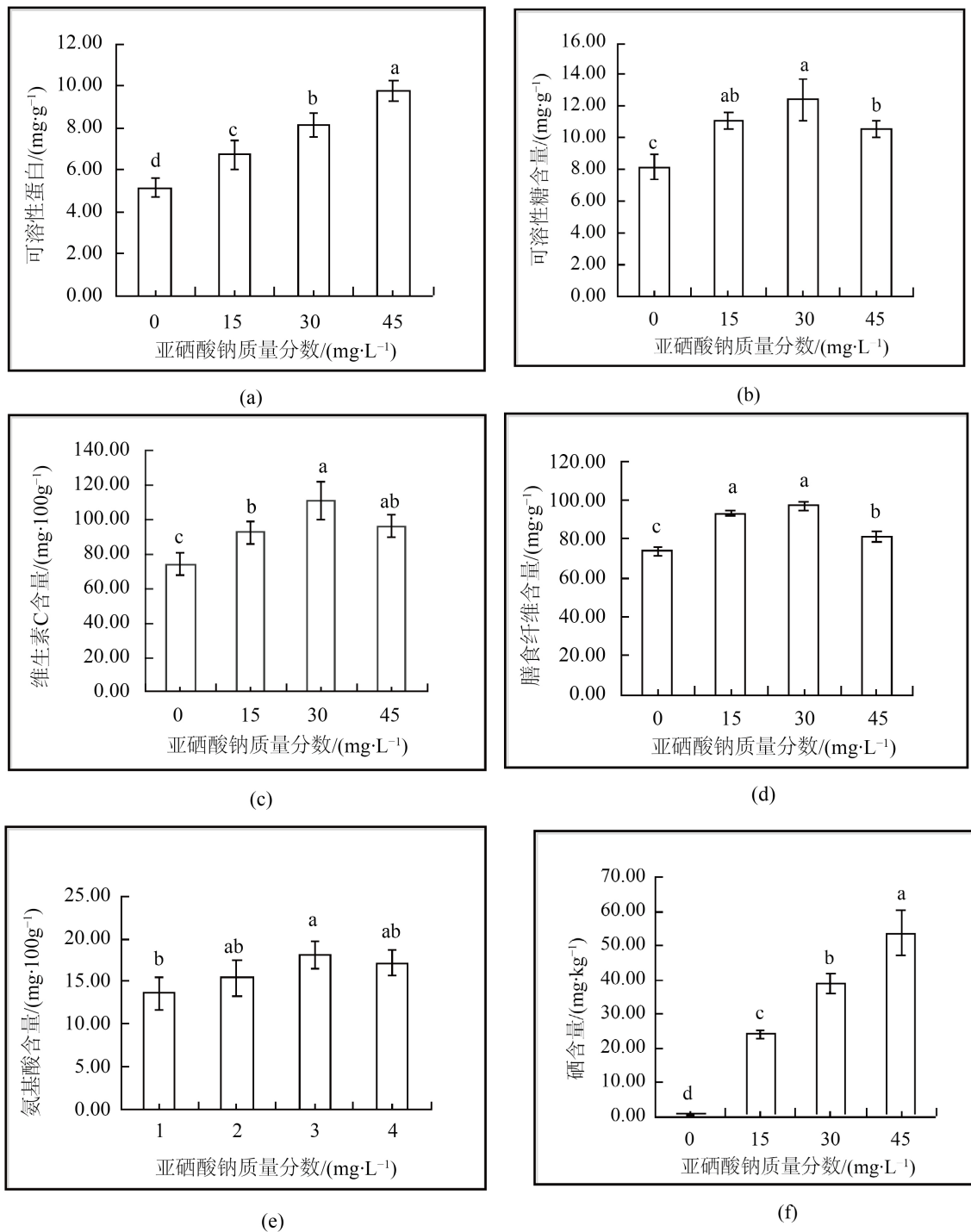


Figure 2. Effects of sodium selenite treatment with different mass fractions on contents of soluble protein (a), soluble sugar (b), vitamin C (c), dietary fiber (d), amino acid (e) and selenium (f) in *Cardamine occulta*

图 2. 不同质量分数亚硒酸钠处理对碎米荠可溶性蛋白(a)、可溶性糖(b)、维生素 C (c)、膳食纤维(d)、氨基酸(e)和硒含量(f)的影响

52.39%、28.77%，可溶性糖含量最高为 12.43 mg·g⁻¹，最低为 8.16 mg·g⁻¹；维生素 C 含量分别较 CK 处理提高了 25.00%、49.99%、30.00%，维生素 C 含量最高为 111.11 mg·100g⁻¹，最低为 74.07 mg·100 g⁻¹；膳

食纤维含量分别较 CK 上升了 26.40%、31.36%、10.39%，膳食纤维含量最高为 97.12 mg·g⁻¹，最低为 73.94 mg·g⁻¹；氨基酸含量分别较 CK 提高了 13.11%、33.53%、26.34%，氨基酸含量最高为 18.17 mg·100g⁻¹，最低为 13.60 mg·100g⁻¹，证明碎米荠在不同质量分数的 Na₂SeO₃ 处理下，可溶性糖、维生素 C、膳食纤维和氨基酸含量虽 Na₂SeO₃ 质量分数升高呈先增加后减少趋势，其中在 30 mg·L⁻¹ 处理下达到峰值且差异最显著；此外，可溶性蛋白质含量分别较 CK 增加了 30.23%、58.14%、89.47%，可溶性蛋白质含量最高为 9.78 mg·g⁻¹，最低为 5.16 mg·g⁻¹；总硒含量分别是 CK 39、63、87 倍，总硒含量最高为 53.69 mg·kg⁻¹，最低为 0.169 mg·kg⁻¹，证明可溶性蛋白质和硒含量随 Na₂SeO₃ 质量分数升高呈增长趋势，45 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ 处理下的值最大且差异最显著。综上所述，施用 Na₂SeO₃ 能显著提高碎米荠可溶性糖、可溶性蛋白质、维生素 C、膳食纤维、氨基酸和硒含量，增加碎米荠营养成分，其中 30 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ 处理后增加的碎米荠营养成分较多，效果最好。

3.3. 碎米荠生物量与营养物质间的相关性分析

对不同质量分数 Na₂SeO₃ 处理下碎米荠生物量和营养物质进行相关性分析。由表 1 可知，鲜重与干重、维生素 C 均呈显著正相关，相关系数分别为 0.984 和 0.957，即鲜重越高，碎米荠的干重和维生素 C 含量越高；可溶性糖与维生素 C 呈显著正相关，相关系数为 0.968，即可溶性糖含量越高，维生素 C 含量越高；可溶性蛋白与硒含量呈极显著正相关，相关系数为 0.992，即可溶性蛋白和硒含量变化趋势一致；维生素 C 与氨基酸呈显著正相关，相关系数为 0.961，即维生素 C 含量高，氨基酸的含量也高；其他成分无显著相关性。综上所述，碎米荠鲜重、可溶性糖和氨基酸含量变化与维生素 C 含量变化一致；硒含量随可溶性蛋白质含量升高而增加。

Table 1. Correlation analysis of biomass and nutrients of *Cardamine occulta* treated with different concentrations of sodium selenite

表 1. 不同浓度亚硒酸钠处理下碎米荠生物量和营养物质间相关性分析

| | 鲜重 | 干重 | 可溶性糖 | 可溶性蛋白质 | 维生素 C | 膳食纤维 | 氨基酸 | 硒含量 |
|--------|--------|-------|--------|---------|--------|-------|-------|-----|
| 鲜重 | 1 | | | | | | | |
| 干重 | 0.984* | 1 | | | | | | |
| 可溶性糖 | 0.888 | 0.878 | 1 | | | | | |
| 可溶性蛋白质 | 0.590 | 0.441 | 0.596 | 1 | | | | |
| 维生素 C | 0.957* | 0.921 | 0.968* | 0.711 | 1 | | | |
| 膳食纤维 | 0.766 | 0.810 | 0.944 | 0.314 | 0.841 | 1 | | |
| 氨基酸 | 0.920 | 0.840 | 0.872 | 0.857 | 0.961* | 0.666 | 1 | |
| 硒含量 | 0.638 | 0.501 | 0.683 | 0.992** | 0.773 | 0.424 | 0.889 | 1 |

注：*表示在 5% 水平上显著相关(P < 0.05)，**表示在 1% 水平上显著相关(P < 0.01)。

3.4. 不同质量分数亚硒酸钠与碎米荠硒含量的回归分析

将对不同质量分数的 Na₂SeO₃ 作为自变量，与碎米荠生物量和营养物质进行相关性分析，结果表明不同 Na₂SeO₃ 质量分数与可溶性蛋白质和硒含量均呈现极显著正相关(p < 0.01)，相关系数分别为 1.000 和 0.992，说明外源硒的增加促进了碎米荠可溶性蛋白质和硒含量的积累，且相关性极显著可进行回归分析。用 SPSS 27.0 进行曲线估算发现不同 Na₂SeO₃ 质量分数与可溶性蛋白质之间接近一次单项式，与硒含

量之间的关系接近三次单项式(如图 3 所示)。结果表明随着 Na_2SeO_3 质量分数升高, 碎米荠硒含量呈曲线上升趋势, 当 Na_2SeO_3 质量分数在 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右时曲线较平稳, 而 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2SeO_3 前的曲线斜率大于之后, 说明 Na_2SeO_3 $0\sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的碎米荠总硒积累平均速率大于 $30\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2SeO_3 ; 此外, 碎米荠可溶性蛋白质含量呈直线上升趋势, 说明碎米荠积累可溶性蛋白质的速率平稳。综合分析, 虽碎米荠体内总硒和可溶性蛋白质还未达到饱和, 但 Na_2SeO_3 质量分数在 $0\sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间硒含量的积累效果要比 $30\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的积累效果好。

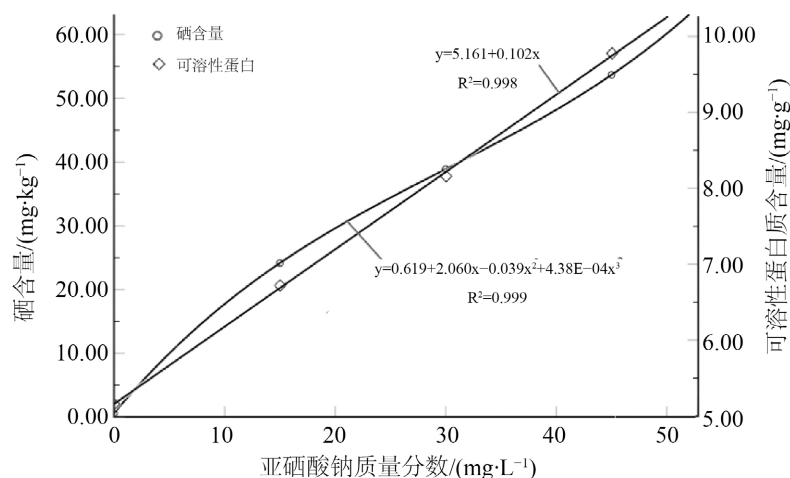


Figure 3. Regression analysis of sodium selenite and selenium content and soluble protein with different mass fractions

图 3. 不同质量分数亚硒酸钠与硒含量及可溶性蛋白质的回归分析

4. 讨论

鲜干重是农艺性状和植物生长状态、营养积累的重要指标, 能直观反映植物产量[23]。在本研究中, 碎米荠处理组较对照组鲜重增幅为 16.5%~61.9%, 干重增幅为 17.7%~64.9%, 说明喷施硒肥能增加碎米荠产量, 这与冯时钦等[24]、毛政国[25]研究结果一致。我们发现随着亚硒酸钠质量分数升高, 碎米荠鲜重和干重均呈先上升后下降趋势, $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2SeO_3 处理的碎米荠鲜干重值最高, 这与罗金玲等[26]、曾维超[27]研究结果一致。可能是因为低浓度亚硒酸钠能增强植物碳同化, 引起叶绿素含量、类胡萝卜素含量、 CO_2 同化率、气孔导度和细胞间隙 CO_2 浓度增加, 从而提高有机物积累[28]; 而高浓度亚硒酸钠致使其光合机构受损, 进而降低净光合速率, 因此植物生长受到抑制[29]。

可溶性糖、可溶性蛋白质、维生素 C、膳食纤维、氨基酸和硒是碎米荠富含的人体所需营养物, 可作为评价碎米荠营养品质指标[30] [31]。在本研究中, Na_2SeO_3 处理后碎米荠这 6 种营养成分含量皆大于 CK, 可见喷施硒肥能有效提高碎米荠营养成分, 这与吴美儒等[32]、闫少凯等[33]、Rui He 等[28]研究一致。硒对植物有多方面的影响, 朱帅蒙[34]指出在葡萄果叶上喷施外源硒后增强了果实中 AI 酶活性和叶片光合速率, 使得糖代谢加快, 促进可溶性糖的积累。Zhichao Wu 等[35]发现硒能显著提高大白菜抗坏血酸过氧化物酶(APX), 提高谷胱甘肽 - AsA 循环效率, 促进抗坏血酸(维生素 C)含量增加。硒与硫为同族元素, 化学性质相似, 能利用植物体内硫代谢途径代谢, 进而影响含硫、氮化合物的合成[36]。本试验叶面追施不同浓度 Na_2SeO_3 后碎米荠的可溶性糖、维生素 C、膳食纤维和氨基酸含量先增加后减少, 这可能是因为亚硒酸钠为无机硒源, 效果性和安全性皆低于有机硒, 而过量添加会抑制植物生长降低品质[37], 这与 Xiaoli Liao 等[38]、蔡莉萍等[33]、刘萌等[39]研究结果一致。相反, 可溶性蛋白和硒含量呈

增加趋势,这可能是因为硒主要以硒蛋白的形式存在于碎米荠中[40],可溶性蛋白增加也可能表明了碎米荠处于胁迫环境,这与肖真真等[41]研究结果一致。李瑜等[42]发现硒主要以硒代胱氨酸(SeCys2)和硒代蛋氨酸(SeMet)2种有机硒形态存在于4种碎米荠中,叶梅等[43]从莖叶碎米荠中分析出了SeCys2、MeSeCys、SeMet、Se(IV)和Se(VI)这5种硒化合物。用 Na_2SeO_3 处理后碎米荠硒含量是未处理的39~87倍,这是因为栽培基质中硒含量少,碎米荠只能通过 Na_2SeO_3 提高体内硒含量,也说明碎米荠具有超富硒能力[44]。综合比较说明,叶面喷施 Na_2SeO_3 对碎米荠营养品质有积极影响,能显著提高碎米荠营养成分含量, $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 较其他处理效果最好。

相关分析能判断变量之间有无关系、有何种关系及关系程度,而回归分析通过建立自变量和因变量的回归方程对结果进行预测。对碎米荠各指标相关性分析结果表明,碎米荠鲜重、可溶性糖和氨基酸的含量受维生素C的影响,硒含量主要取决于可溶性蛋白质。这也进一步解释了可溶性糖、氨基酸和维生素C含量变化一致,硒含量与可溶性蛋白质有相同的生长趋势。回归分析结果表明硒含量积累速率先高后低,可溶性蛋白质积累速率稳定,可能是因为高浓度硒对碎米荠造成胁迫,使其生理代谢失衡,一方面降低碎米荠对硒的吸收;另一方面大多可溶性蛋白质是具有活性的各种酶类,含量越高,表明生理活性越强[45],因此碎米荠通过增加可溶性蛋白的合成来调节渗透和提高抗氧化酶含量[46],减缓碎米荠遭受的危害,这与李克强等[47]、彭诚[48]研究结果一致。由此说明 Na_2SeO_3 质量分数超过 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右会抑制碎米荠生长,不利于人工栽培。碎米荠是药食两用的聚硒植物,是缺硒人群补硒的优秀硒源。根据《中国居民膳食营养素参考摄入量 第3部分:微量元素》WS/T 578.3规定,推荐我国居民最低膳食硒摄入量 15 ug/d ,最高安全摄入量 400 ug/d 。而经过人工富硒栽培后,碎米荠虽硒含量高,但做成药材、食品添加剂等副产品严格控制用量,即能起到补硒作用又不会造成硒毒害,有很高的开发利用价值。

5. 结论

综上所述,叶面喷施适量质量分数的 Na_2SeO_3 ,能在一定程度上增加碎米荠产量,提高碎米荠营养成分。从碎米荠生长图、生物量、部分营养物质和抗逆性指标可溶性蛋白质与亚硒酸钠的回归分析可知,虽碎米荠硒富集能力未达到最大化,但 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 已对碎米荠产量和营养物质积累造成胁迫,无法让人工栽培效果达到最大化。因此考虑到碎米荠的硒含量与其它营养物质的平衡以及碎米荠的生长,在人工培养碎米荠时, Na_2SeO_3 质量分数保持在 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 将更有利于提升碎米荠的生物量和营养价值。

参考文献

- [1] Rotruck, J.T., Pope, A.L., Ganther, H.E., et al. (1973) Selenium: Biochemical Role as a Component of Glutathione Peroxidase. *Science*, **179**, 588-590. <https://doi.org/10.1126/science.179.4073.588>
- [2] 崔乔, 尚德静, 邹霞. 硒化合物的抗癌作用[J]. 中国生化药物杂志, 2004, 25(4): 247-249.
- [3] 高敏宜, 徐笑, 高已雯, 等. 微量元素硒在对抗 COVID-19 中的作用研究进展[J]. 生物技术进展, 2023, 13(1): 72-76.
- [4] Zhu, Y.Y., Dong, Y.W., Zhu, N. and Jin, H.M. (2022) Foliar Application of Biosynthetic Nano-Selenium Alleviates the Toxicity of Cd, Pb, and Hg in *Brassica chinensis* by Inhibiting Heavy Metal Adsorption and Improving Antioxidant System in Plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **240**, Article ID: 113681. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113681>
- [5] 杜军霞, 李冰, 董晓霞, 等. 硒元素的肝脏保护作用[J]. 邢台学院学报, 2023, 38(1): 175-181.
- [6] Sabzian-Melei, R., Zare-Shahneh, A., Zhandi, M., et al. (2022) Effects of Dietary Supplementation of Different Sources and Levels of Selenium on the Semen Quality and Reproductive Performance in Aged Broiler Breeder Roosters. *Poultry Science*, **101**, Article ID: 101908. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101908>
- [7] 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.
- [8] 杨德平. 几种开发的富硒野生植物研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2015, 37(3): 25-28.

- [9] Chen, N., Zhao, C.H. and Zhang, T.H. (2021) Selenium Transformation and Selenium-Rich Foods. *Food Bioscience*, **40**, Article ID: 100875. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100875>
- [10] Pickering, I.J., Wright, C., Bubner, B., et al. (2003) Chemical Form and Distribution of Selenium and Sulfur in the Selenium Hyperaccumulator *Astragalus bisulcatus*. *Plant Physiology*, **131**, 1460-1467. <https://doi.org/10.1104/pp.014787>
- [11] 姚怡玮, 何美军, 杨萌, 等. 药食两用植物富硒研究进展[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(15): 5-8.
- [12] 张杨杨, 焦自高, 艾希珍, 等. 硒对植物的生理作用及富硒瓜菜研究进展[J]. 中国瓜菜, 2014, 27(1): 5-9.
- [13] 邵树勋, 郑宝山, 罗充, 等. 湖北恩施首次发现硒超富集植物[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(z1): 567-570.
- [14] 向极钎, 李亚杰, 杨永康, 等. 碎米荠的研究现状[J]. 湖北民族学院学报: 自然科学版, 2011, 29(4): 440-443.
- [15] Cui, L., Zhao, J., Chen, J., et al. (2018) Translocation and Transformation of Selenium in Hyperaccumulator Plant *Cardamine ensiensis* from Enshi, Hubei, China. *Plant and Soil*, **425**, 577-588. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3587-8>
- [16] 刘婷, 郑甲成, 张百忍. 碎米荠属研究现状及前景展望[J]. 陕西农业科学, 2012, 58(4): 127-129.
- [17] 陈发军, 鲜小华, 胡燕秋, 等. 不同储藏条件和高温处理对碎米荠种子萌发特性的影响[J]. 杂草学报, 2017, 35(2): 23-28.
- [18] 王爱波, 侯江涛, 潘一展, 等. 不同水分梯度与前茬作物对普通白菜产量的影响[J]. 北方园艺, 2015(11): 37-40.
- [19] 张景云, 关峰, 石博, 等. 热风干燥及真空冷冻干燥对苦瓜功能成分及营养品质的影响[J]. 北方园艺, 2023(9): 89-96.
- [20] 康琪, 朱若华. 膳食纤维的测定原理和方法[J]. 现代仪器, 2007, 13(6): 1-5.
- [21] 刘威, 刘旭, 蔡卫佳, 等. 六个薄壳山核桃单株果实脂肪酸组成和营养成分比较分析[J]. 北方园艺, 2022(23): 46-53.
- [22] 纪庆宪, 刘源, 相有章. 荧光分光光度法测定海藻产品中的硒含量[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(2): 25-34.
- [23] 李玉珠, 吴芳, 张贞明, 等. 西北荒漠灌区覆膜对紫花苜蓿农艺性状和营养价值的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 748-756.
- [24] 冯时钦, 韦鸿雁, 刘南, 等. 叶面喷施硒肥对茶叶产量及硒、镉含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(24): 157-159.
- [25] 毛政国. 富硒肥对早稻的降镉富硒及增产增收效果[J]. 湖南农业科学, 2022(1): 46-48.
- [26] 罗金玲, 杨珧, 陈鸿辉, 等. 壶瓶碎米荠对硒酸钠胁迫响应研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(11): 47-50.
- [27] 曾维超. 超富集植物壶瓶碎米荠耐受特性分析[D]: [硕士学位论文]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2020.
- [28] de Araujo, M.A., et al. (2023) Selenium Enhances ROS Scavenging Systems and Sugar Metabolism Increasing Growth of Sugarcane Plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, **201**, Article ID: 107798. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107798>
- [29] 李慧敏, 毕佳慧, 张倩玉, 等. 不同浓度硒对丝瓜生长·叶绿素含量及光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(22): 34-37.
- [30] 丁莉, 彭诚. 莖叶碎米荠营养成分的分析与评价[J]. 湖北民族学院学报: 自然科学版, 2005, 23(3): 293-295.
- [31] 董玮玮, 鲁智丛, 曲一, 等. 大叶碎米荠营养成分的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2007, 19(B11): 442-444.
- [32] 吴美儒, 牟迪, 温灵敏, 等. 弯曲碎米荠耐硒能力的研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 132-134.
- [33] 蔡莉萍, 高尚, 单长卷. 亚硒酸钠对草莓抗坏血酸含量及其相关代谢酶的影响[J]. 东北农业科学, 2023, 48(2): 114-116.
- [34] 朱帅蒙. 不同葡萄品种果实品质对外源硒肥的响应[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [35] Wu, Z.C., Liu, S., Zhao, J., et al. (2017) Comparative Responses to Silicon and Selenium in Relation to Antioxidant Enzyme System and the Glutathione-Ascorbate Cycle in Flowering Chinese Cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under Cadmium Stress. *Environmental and Experimental Botany*, **133**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.09.005>
- [36] 饶申, 程华, 刘浩东, 等. 硒对十字花科作物营养品质的影响综述[J]. 食品科技, 2022(3): 30-35.
- [37] 张绍鹏, 董静洲, 刘元杏, 等. 不同硒肥和施硒方式对桃品质及硒含量的影响[J]. 北方园艺, 2021(18): 54-59.
- [38] Liao, X.L., Rao, S., Yu, T., et al. (2021) Selenium Yeast Promoted the Se Accumulation, Nutrient Quality and Antioxidant System of Cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). *Plant Signaling & Behavior*, **16**, Article ID: 1907042. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1907042>

-
- [39] 刘萌, 何洪巨, 黄晓欣, 等. 外源物质亚硒酸钠处理对西兰花营养品质和硫苷含量的影响[J]. 北方园艺, 2021(21): 1-7.
- [40] 黄颖, 吴婷, 曹伟伟, 等. 基于主成分和聚类分析的油菜薹营养与感官品质评价[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 253-258.
- [41] 肖真真, 李化银, 焦自高, 等. 叶面喷施外源硒肥对西瓜产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(5): 38-41.
- [42] 李瑜, 马俊, 高海娜, 等. 硒在藜叶碎米荠中的赋存形态及分布规律[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(7): 26-28.
- [43] 叶梅, 虞锐鹏, 丛欣, 等. 富硒藜叶碎米荠中硒化合物的形态分析与鉴定[J]. 分析测试学报, 2022, 41(1): 100-107.
- [44] 李冬琴, 杨萌, 文笑雨, 等. 碎米荠属植物营养成分和功能因子的研究进展[J]. 湖南文理学院学报: 自然科学版, 2021, 33(3): 28-35.
- [45] 闫少凯, 周守标, 陶旭, 等. 施硒对壶瓶碎米荠产量、品质及其硒含量的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1442-1448.
- [46] 李颖, 杨小环, 鲁一薇, 等. 外源硒对镉胁迫下紫苏幼苗生长发育毒害的缓解效应[J]. 山西农业科学, 2021, 49(4): 408-413.
- [47] 李国强, 陈发波, 林立金, 等. 不同浓度硒处理对豆瓣菜生长及硒富集的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018(4): 488-493.
- [48] 彭诚. 土壤施硒对白菜和藜叶碎米荠生理指标的影响[J]. 湖北民族学院学报: 自然科学版, 2007(1): 88-90.