

藜麦富硒萌发工艺优化及抗氧化活性研究

Optimization of selenium-enriched germination process of quinoa and its antioxidant activity

张 玲^{1,2}郑万财^{1,2,3}兰永丽⁴张文刚^{1,2,3}ZHANG Ling^{1,2} ZHENG Wancai^{1,2,3} LAN Yongli⁴ ZHANG Wengang^{1,2,3}

(1. 青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省青藏高原农产品加工重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海省种质资源研究与利用实验室, 青海 西宁 810016;

4. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 咸阳 712100)

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2. Key Laboratory of Qinghai Province Tibetan Plateau Agric-Product Processing, Xining, Qinghai 810016, China; 3. Laboratory for Research and Utilization of Qinghai Tibet Plateau Germplasm Resources, Xining, Qinghai 810016, China; 4. College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Xianyang, Shaanxi 712100, China)

摘要: [目的] 提高藜麦种子有机硒含量, 开发优质富硒藜麦食品原料。 [方法] 以青白藜1号为原料, 亚硒酸钠为硒源, 通过单因素试验结合正交试验对藜麦富硒萌发工艺条件进行优化, 进一步对富硒藜麦可溶性蛋白、多酚含量及抗氧化能力进行分析。 [结果] 藜麦富硒萌发最佳工艺条件为亚硒酸钠溶液质量浓度 20 mg/L、浸泡温度 25 ℃、浸泡时间 6 h、浸泡液 pH 7.0、萌发时间 48 h、萌发温度 20 ℃。该条件下, 富硒萌发藜麦有机硒含量为 349.52 μg/kg。富硒萌发藜麦游离酚(236.35 mg/100 g)、结合酚(198.31 mg/100 g)含量最高, 普通去离子水萌发藜麦可溶性蛋白(22.18%)含量最高。富硒萌发藜麦可溶性蛋白、游离酚和结合酚的抗氧化活性均最强, 其次为普通去离子水萌发藜麦, 未处理藜麦相对最低。 [结论] 富硒萌发能够显著提升藜麦有机硒、可溶性蛋白和多酚含量, 并增强其抗氧化能力。

关键词: 藜麦; 有机硒; 萌发; 工艺优化; 抗氧化活性

Abstract: [Objective] This study aimed to improve the organic selenium content of quinoa seeds and develop high-quality Se-rich quinoa food raw materials. [Methods] Using Qingbaili No. 1 quinoa as raw material and sodium selenite as a selenium source, the selenium-enriched germination process conditions of quinoa

were optimized through one-way experiments combined with orthogonal experiments. The soluble protein, polyphenol content, and antioxidant capacity of selenium-enriched quinoa were further analyzed. [Results] The optimal process conditions for selenium-enriched germination of quinoa were sodium selenite solution concentration of 20 mg/L, soaking temperature of 25 ℃, soaking time of 6 h, soaking solution pH of 7.0, germination time of 48 h, and germination temperature of 20 ℃. Under these conditions, the organic selenium content of selenium-enriched germinated quinoa was 349.52 μg/kg. Selenium-enriched sprouted quinoa had the highest content of free phenols (236.35 mg/100 g) and bound phenols (198.31 mg/100 g), and control deionized water germinated quinoa had the highest content of soluble protein (22.18%). Notably, the antioxidant activities of soluble protein, free phenols, and bound phenols in selenium-rich germinated quinoa were the strongest, followed by those in control deionized water germinated quinoa, and untreated quinoa was relatively the lowest. [Conclusion] Se-enriched germination can significantly increase the contents of organic selenium, soluble protein and polyphenols, and enhance the antioxidant capacity of Quinoa.

Keywords: quinoa; organic selenium; germination; process optimization; antioxidant activity

基金项目: 青海“昆仑英才·高端创新创业人才”计划特色人才项目(编号:2022-027)

作者简介: 张玲, 女, 青海大学在读硕士研究生。

通信作者: 张文刚(1993—), 男, 青海大学助理研究员, 硕士。

E-mail: 20179900978@qhu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-09 **改回日期:** 2024-05-19

硒(Se)是一种人体必需微量元素, 具有抗氧化、抗癌、抗衰老、调节免疫等多种生理功效^[1-2]。据报道, 中国有 72% 的低硒地区, 成年人每日硒的摄入量仅为 44.6 μg, 远低于中国营养学会(60~250 μg/d)和国际硒

学会的每日推荐摄入量(60~400 $\mu\text{g}/\text{d}$)^[3]。硒补充形式主要包括膳食有机硒和药物硒补充剂摄入,其中来源于食物的有机硒相比药物硒和无机硒具有低毒性、利用率高、易于接受等优势,是补充人体硒元素的理想途径^[4]。亚硒酸钠能够被植物直接吸收利用,是植物富硒广泛使用的硒源^[4]。植物性食物中的硒多以硒蛋白形式存在,而通过生长环境或者生理过程调控来生产富硒食品原料及硒结合蛋白已成为当前研究的热点^[1]。

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)属于藜科藜属一年生草本植物,原产于安第斯地区,其富含优质蛋白质、氨基酸、膳食纤维、脂肪酸、矿物质、维生素等^[5]。此外,藜麦也含有丰富的多酚、黄酮、多糖、皂苷等功能成分,在抗氧化、抗炎、降血糖、降血压、免疫调节等方面有良好的功效^[6-7]。藜麦作为全营养假谷物,不含麸质,食用价值高,对补充和均衡膳食十分有益,近年来在健康食品领域受到广泛关注。藜麦矿物质资源丰富,但总硒含量在 85 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 左右,低于小麦(894 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、玉米(155 $\mu\text{g}/\text{kg}$)等^[8]。目前,藜麦硒强化研究尚处于起步阶段,硒富集形式主要为土壤富集。Kitaguchi 等^[9]以每平方米施加 500 mg 硒肥(亚硒酸钠)培育富硒藜麦时发现藜麦总硒含量可达 102.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。崔建荣等^[10]探究硒肥对藜麦生长发育及产量的影响时发现,常规施肥时,藜麦种子总硒含量为 523 $\mu\text{g}/\text{kg}$;施加 17.5 kg/667 m^2 的硒肥时藜麦种子的总硒含量为 4 595 $\mu\text{g}/\text{kg}$,是常规施肥的近 9 倍。Amerian 等^[11]以亚硒酸钠为硒源,研究硒对于旱胁迫下藜麦萌发的影响发现,当亚硒酸钠质量浓度为 20 mg/L 时,藜麦种子发芽率、活力和形态特征最好。然而,传统土壤富硒存在的不足是周期较长、转化效率偏低且对土壤条件的要求较高,不利于藜麦种子硒元素的快速富集及富硒藜麦食品原料的规模化生产。

萌发是谷物生命过程中营养成分分解和合成代谢的活跃时期,此时适度进行处理能改善谷物种子加工性能和感官品质,提高蛋白质消化利用率,增加膳食纤维和抗性淀粉,提升矿物质和维生素的生物利用度^[4,12],同时也能增加次生代谢产物水平(多酚、黄酮、 γ -氨基丁酸)。此外,萌发过程中谷物种子可以将外源无机硒吸收并代谢转化,以提升自身有机硒本底水平,这是谷物种子快速富集有机硒并改善抗氧化能力的一种有效方式,在小麦、荞麦、燕麦、糙米、大豆、玉米、高粱、大麦等多种食品原料富硒上已有报道^[13-14]。然而,目前利用优质藜麦种子为原料直接萌发富集有机硒的研究鲜有报道,且有关富硒藜麦抗氧化特性尚不清楚。研究拟以藜麦为原料,亚硒酸钠为硒源,通过单因素和正交试验探讨浸泡和萌发条件对藜麦富集有机硒的影响,在最优条件下分析萌发富硒藜麦可溶性蛋白和多酚含量及其抗氧化活性,以期对藜麦富硒及相关功能食品的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

藜麦(青白藜 1 号):青海省农林科学院作物所,于-18 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱储存备用;

甲醇、无水乙醇、硝酸、盐酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

亚硒酸钠、考马斯亮蓝(G250)、牛血清蛋白、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、三吡啶基三嗪(TPTZ)、3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸二铵盐(ABTS):美国 Sigma 公司。

1.1.2 主要仪器设备

分析天平:AL204 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

电脑恒温层析柜: CXG-1 型,上海沪西分析仪器厂有限公司;

台式真空冷冻干燥机: BK-FD10S 型,济南欧莱博电子商务有限公司;

紫外线可见分光光度计: N4S 型,上海仪电分析仪器有限公司;

微波消解仪: MARS-6 型,美国 CEM 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 藜麦富硒萌发流程

藜麦种子→筛选清洗→消毒(5%次氯酸钠溶液浸泡 10 min)→冲洗 4 次→亚硒酸钠溶液浸泡(25 $^{\circ}\text{C}$ 浸泡 6 h)→萌发(将藜麦种子均匀铺在垫有两层滤纸的培养皿中,放于 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中进行暗发芽)→补水(萌发期间每隔 8 h 均匀喷洒 5%去离子水)→冷冻干燥→粉碎(过 60 目筛)→-18 $^{\circ}\text{C}$ 保存

1.2.2 有机硒测定

(1) 总硒:按 GB 5009.93—2017《食品安全国家标准食品中硒的测定》中的第一法氢化物原子荧光光谱法执行。

(2) 无机硒:按 DB 3301/T 117—2007《稻米中有机硒和无机硒含量的测定 原子荧光光谱法》执行。

(3) 有机硒含量:以总硒含量与无机硒含量的差值表示。

1.2.3 单因素试验 以有机硒含量为指标,分别探讨亚硒酸钠质量浓度(0, 5, 10, 15, 20, 30 mg/L)、浸泡液 pH(4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)、浸泡时间(2, 4, 6, 8, 10 h)、浸泡温度(15, 20, 25, 30 $^{\circ}\text{C}$)、萌发时间(0, 12, 24, 36, 48, 60 h)、萌发温度(10, 15, 20, 25, 30 $^{\circ}\text{C}$)对藜麦萌发富硒的影响,试验中各因素的固定条件为亚硒酸钠质量浓度 10 mg/L 、浸泡温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、浸泡液 pH 7、浸泡时间 6 h、萌发温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、萌发时间 48 h。对照组为未萌发藜麦及相同条件下以去离子水处理萌发的藜麦。

1.2.4 正交试验设计 在单因素试验基础上,选择萌发

温度、萌发时间、亚硒酸钠质量浓度 3 个因素,各因素取 3 个较优水平,设计 $L_9(3^3)$ 正交试验以优化获取藜麦富硒萌发最优工艺条件。

1.2.5 可溶性蛋白含量测定

(1) 可溶性蛋白提取:藜麦粉按料液比 1:5 (g/mL) 加入正己烷脱脂 4 h, 4 000 r/min 离心 10 min, 回收正己烷, 藜麦粉于通风橱中自然挥干 24 h, 备用。脱脂后藜麦粉按料液比 1:12 (g/mL) 加入水, 调节 pH 至 11.0, 45 °C 提取 3 h, 4 000 r/min 离心 15 min 取上清液, 沉淀物重复浸提 2 次, 合并上清液即可溶性蛋白^[15]。

(2) 蛋白含量测定:采用考马斯亮蓝法(G250 染色法)^[16]。考马斯亮蓝 G-250 试剂配制:50 mg CBB G-250 溶于 40 mL 95% 乙醇, 加入 120 mL 85% 的磷酸, 蒸馏水定容至 1 L, 抽滤去除残渣装至棕色瓶中备用。吸取 1 mL 藜麦蛋白提取液于试管中, 加入 CBB G-250 试剂 4 mL, 涡旋混匀, 室温反应 5 min, 以蒸馏水作参比溶液, 在波长 595 nm 下测定吸光度。以牛血清蛋白为标准品, 根据标准曲线($y=5.74x+0.0193$, $R^2=0.9983$) 计算出样品中蛋白含量。

1.2.6 酚类物质含量测定

(1) 游离酚和结合酚提取:参照郭俊玲等^[17]的方法。

(2) 多酚含量测定:采用 Folin-Ciocalteu 法^[18]。

1.2.7 抗氧化活性测定

(1) DPPH 自由基清除能力测定:参照 Bakar 等^[19]的方法。

(2) ABTS 自由基清除能力测定:参照 Guo 等^[20]的方法。

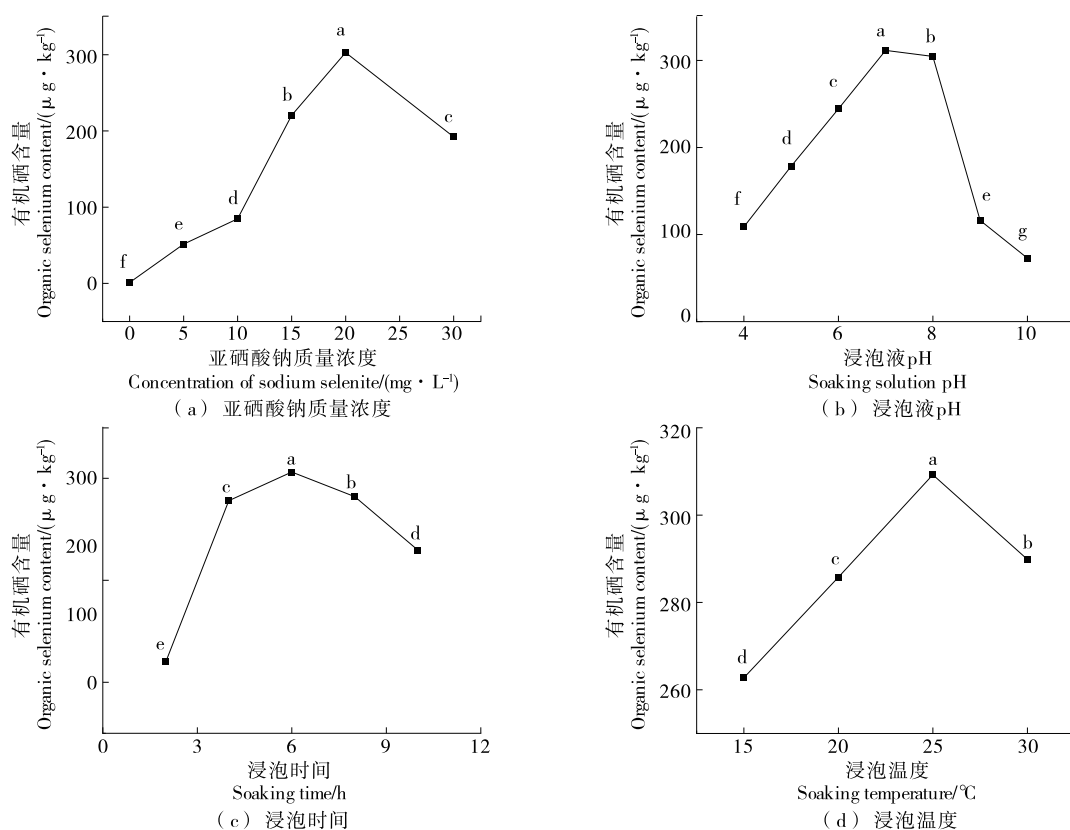
(3) FRAP 铁还原能力测定:参照杨瑞等^[21]的方法。

1.2.8 数据处理 试验重复 3 次, 结果以平均值±标准差表示, 采用 Origin 8.5 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析及绘图, 显著性差异分析采用 LSD 多重比较法。字母不同表示在 $P<0.05$ 范围内存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 浸泡条件对藜麦有机硒含量的影响

2.1.1 亚硒酸钠质量浓度 由图 1(a)可知, 未经亚硒酸钠溶液浸泡的藜麦原粮有机硒含量为 1.19 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。藜麦有机硒含量随着浸泡液中亚硒酸钠质量浓度增大而先增



字母不同表示有显著性差异($P<0.05$)

图 1 亚硒酸钠质量浓度、浸泡液 pH、浸泡时间和浸泡温度对藜麦有机硒含量的影响

Figure 1 Effect of sodium selenite concentration soaking solution pH temperature, and soaking time on organic Se content of quinoa

大后减小,当亚硒酸钠质量浓度为 20 mg/L 时有机硒含量最高为 303.48 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。孙美侠等^[22]在优化啤酒大麦富硒工艺时也有类似发现。适度提高亚硒酸钠质量浓度,有助于促进藜麦种子对无机硒的吸收和酶促转化,从而提高有机硒水平^[23]。当亚硒酸钠质量浓度过高时,有机硒含量下降,一方面可能是因为亚硒酸钠质量浓度过高对藜麦种子有一定毒副作用,会抑制藜麦种子生命活动的正常进行^[4,22],使得有机硒的富集效率逐渐降低;另一方面藜麦种子过量吸收无机硒后,受限于较短的转化时间,藜麦种子无法将过量的无机硒转化为生物活性更好的有机硒,导致有机硒含量下降^[22]。综合来看,20 mg/L 为亚硒酸钠较优质量浓度水平。

2.1.2 浸泡液 pH 由图 1(b)可知,浸泡液 pH 为 4~7 时,藜麦中有机硒含量随 pH 升高而升高;浸泡液 pH 为 7 时,富硒藜麦的有机硒含量最高,为 342.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$;当浸泡液 pH>8 后,有机硒的含量随 pH 升高而降低。过低的 pH 会抑制藜麦种子的活性,限制其发芽活动,而过高的 pH 容易破坏藜麦种子结构,同样会使酶活性降低,影响硒元素的结合与转化^[24]。因此,选择浸泡液 pH 7 作为较优条件。

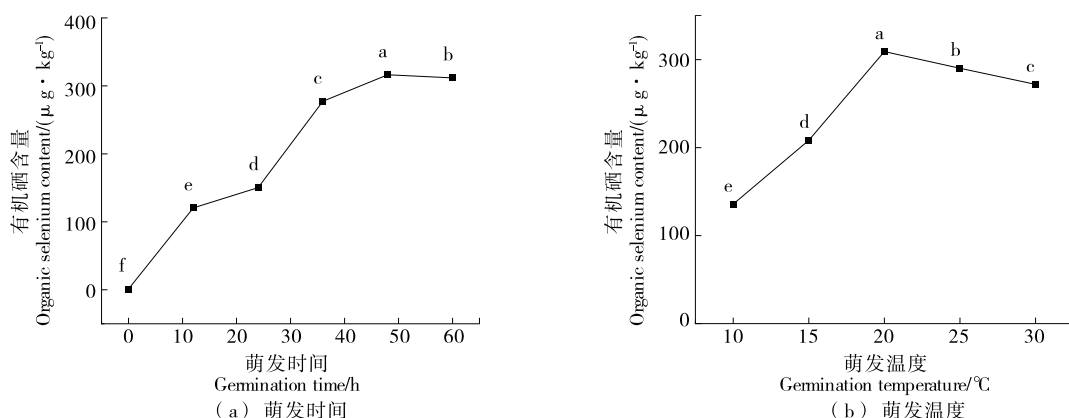
2.1.3 浸泡时间 由图 1(c)可知,浸泡时间为 0~6 h 时,延长浸泡时间有利于藜麦中有机硒的富集;浸泡时间为 6 h 时,有机硒含量最高,为 336.68 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。随浸泡时间的延长,藜麦从休眠状态转变为活体,籽粒内部复杂的酶系被激活,其生理代谢活动逐渐活跃,对无机硒的吸收和转化能力逐步提升,使得有机硒含量相应增加^[22]。但浸泡时间超过 6 h 后,有机硒含量出现下降,原因可能是氧气被隔绝,藜麦种子无法进行呼吸作用,且藜麦种子吸收了过量的水分和无机硒盐,种子萌发活力和生理代谢活动受到抑制,致使有机硒含量降低,这与魏龙等^[25]的报道一致。因此,藜麦种子浸泡时间 6 h 为宜。

2.1.4 浸泡温度 由图 1(d)可知,浸泡温度为 15~25 $^{\circ}\text{C}$ 时,提高浸泡温度有利于藜麦有机硒的富集;浸泡温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时,藜麦有机硒含量最高,为 309.40 $\mu\text{g}/\text{kg}$;当浸泡温度高于 25 $^{\circ}\text{C}$ 时,有机硒含量出现降低。这与魏龙等^[25]关于大豆发芽富硒工艺优化研究结果类似。浸泡温度过高不利于富硒的原因可能是过高的浸泡温度会使藜麦的呼吸作用持续放热,导致热量积累,损害藜麦种子的活力,进而降低其代谢速率,同时参与藜麦硒吸收及转化的相关酶的代谢活力受到抑制,使有机硒富集量减少^[26]。因此,25 $^{\circ}\text{C}$ 为较适宜的浸泡温度。

2.2 萌发条件对藜麦有机硒含量的影响

2.2.1 萌发时间 由图 2(a)可知,萌发时间为 0~48 h 时,藜麦有机硒含量随萌发时间延长而升高;萌发时间为 48 h 时,藜麦有机硒含量最高,为 317.30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。随着萌发过程的进行,藜麦内源酶活性较高,胞内外物质交换活跃,种子从环境中吸收无机硒,并在谷胱甘肽及氨基酸合成酶的催化下生产硒代氨基酸进而参与蛋白质的合成,实现无机硒到有机硒的转化^[1,27]。但藜麦萌发时间超过 48 h 后,有机硒含量略有下降,可能是萌发时间过长,藜麦种子中无机硒消耗到较低水平,有机硒转化受限,有机硒含量趋于饱和,与宋妍等^[27]的发现一致。因此,48 h 为较优萌发时间。

2.2.2 萌发温度 由图 2(b)可知,萌发温度为 10~20 $^{\circ}\text{C}$ 时,提高藜麦萌发温度有利于有机硒的富集;萌发温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,藜麦有机硒最高含量,为 320.88 $\mu\text{g}/\text{kg}$;当藜麦萌发温度高于 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,有机硒含量逐渐降低。董状等^[23]优化糙米富硒萌发工艺时也有类似发现。萌发温度较低时,藜麦种子酶活力较低,对无机硒的转化利用作用较弱,形成的有机硒含量较低;萌发温度过高时,藜麦种子蛋白酶活性受到抑制,从而损害富硒效果,使有机硒含量降低^[26]。因此,20 $^{\circ}\text{C}$ 为较优萌发温度。



字母不同表示有显著性差异($P<0.05$)

图 2 萌发时间、萌发温度对藜麦有机硒含量的影响

Figure 2 Effect of germination time and temperature on organic Se content of quinoa

2.3 正交试验

由于亚硒酸钠质量浓度和萌发条件是影响藜麦吸收和转化硒元素的关键^[13-14],因此在单因素试验的基础上进一步选择亚硒酸钠质量浓度、萌发时间和萌发温度3个因素,固定浸泡液 pH(7)、浸泡时间(6 h)和浸泡温度(25 ℃)进行正交试验。正交试验因素水平表如表 1 所示,试验结果如表 2 所示。由表 2 可知,各因素对藜麦有机硒含量的影响主次顺序为亚硒酸钠质量浓度>萌发时间>萌发温度,最佳参数组合为 A₁B₂C₂(表 2 试验号 2),

表 1 藜麦富硒萌发正交试验因素设计水平表

Table 1 Table of factor design levels for quinoa selenium-enriched sprouting orthogonal test

水平	A 萌发温度/℃	B 萌发时间/h	C 亚硒酸钠质量浓度/(mg·L ⁻¹)
1	20	36	15
2	25	48	20
3	30	60	30

表 2 藜麦富硒萌发工艺优化正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal test for optimization of Se-enriched sprouting process of quinoa

试验号	A	B	C	有机硒含量/(μg·kg ⁻¹)
1	1	1	1	240.11±6.421
2	1	2	2	349.52±5.350
3	1	3	3	245.84±7.678
4	2	1	2	287.82±5.922
5	2	2	3	255.65±6.242
6	2	3	1	266.89±2.642
7	3	1	3	215.67±7.240
8	3	2	1	290.09±3.652
9	3	3	2	296.52±8.431
k ₁	278.488	247.866	265.698	
k ₂	270.120	298.421	311.285	
k ₃	267.427	269.748	239.053	
R	11.061	50.555	72.232	

即萌发温度 20 ℃、萌发时间 48 h、亚硒酸钠质量浓度 20 mg/L。在此条件下,藜麦有机硒含量为(349.52±5.35) μg/kg,高于正交表中其他组合,表明该条件可以作为藜麦富硒萌发的优化条件。

2.4 可溶性蛋白与酚类物质含量

由表 3 可知,相较于未处理组,普通萌发和富硒萌发后藜麦蛋白含量均显著上升,萌发后蛋白含量升高 29.62%,富硒萌发后升高 18.21%。萌发后藜麦蛋白质含量显著提高,这与韩雅盟等^[28]和郭思倩等^[29]的研究结果一致。一方面可能是藜麦萌发过程需要消耗碳水化合物以提高新陈代谢,导致其总干基质量降低,从而使得蛋白质含量相对增加^[28];另一方面可能是新生长的芽中合成了新的蛋白质^[29]。相对而言,萌发富硒藜麦蛋白含量低于普通萌发组,其原因可能是富硒萌发过程中藜麦贮藏的蛋白质大量降解,为种子萌发供能^[1]。孙美侠等^[22]研究富硒啤酒大麦芽时也发现,富硒麦芽中反映蛋白质分解程度的 α-氨基氮高于普通麦芽,表明硒可能提高了蛋白酶的活力,加速了麦芽蛋白质的降解。

由表 3 还可以看出,藜麦多酚主要以游离态为主。相较于未处理组,普通萌发和富硒萌发藜麦总酚量均显著上升,其中普通萌发组总酚含量提高达到 21.01%,这与郭俊玲等^[17]、郭思倩等^[29]、李楠等^[30]的报道类似。普通萌发后藜麦总酚含量升高,一方面可能是萌发会使相关酶活力增加,破坏酚类物质与蛋白质、多糖之间的共价键,释放酚类物质^[30];另一方面可能是藜麦种子萌发过程中呼吸作用增强,激活了苯丙烷代谢途径,增加了酚类物质的合成量^[30],使总酚含量呈上升趋势。富硒萌发后藜麦总酚含量较未处理显著提高了 41.46%,而较普通萌发组提高了 16.90%,其原因一方面是萌发处理促进了藜麦自身多酚积累;另一方面,硒促进了藜麦诸多代谢途径的重要底物葡萄糖等一些糖类物质的积累,进而促进了酚类物质的合成。同时,硒可能通过提高苯丙氨酸解酶的活性,从而激活苯丙烷代谢途径合成酚类化合物^[31]。

2.5 抗氧化活性

2.5.1 富硒萌发对藜麦蛋白抗氧化活性的影响 由图 3 可知,藜麦蛋白 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除能力和铁还原能力均随蛋白质量浓度的上升而增强。富硒萌发

表 3 未处理、普通萌发、富硒萌发藜麦的蛋白和多酚含量[†]

Table 3 Protein and polyphenol content of untreated, sprouted and Se-enriched sprouted quinoa

样品	蛋白/%	游离酚/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)	结合酚/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)	总酚/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)
未处理	15.61±0.621 ^c	141.62±2.513 ^c	165.65±2.416 ^c	307.27±3.562 ^c
普通萌发	22.18±0.125 ^a	200.32±0.932 ^b	171.51±1.710 ^b	371.83±0.834 ^b
富硒萌发	18.14±0.363 ^b	236.35±5.513 ^a	198.31±4.511 ^a	434.66±2.734 ^a

† 同列字母不同表示有显著性差异(P<0.05)。

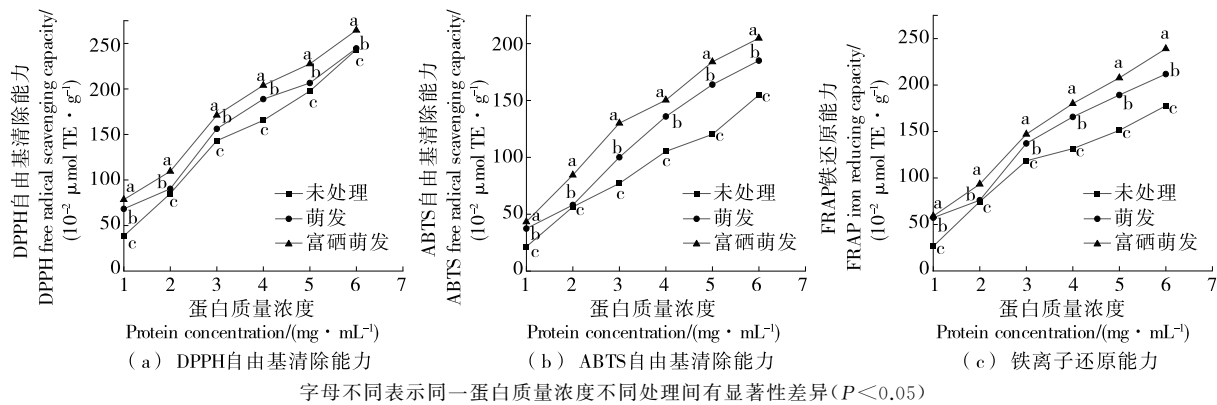


图 3 未处理、萌发和富硒萌发藜麦蛋白 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除能力和铁离子还原能力
Figure 3 DPPH radical scavenging capacity, ABTS radical scavenging capacity, and ferric ion reduction capacity of untreated, sprouted, and Se-enriched sprouted quinoa proteins

藜麦蛋白抗氧化能力最强,萌发藜麦次之,未处理藜麦相对最低。研究^[27]表明,含硒有机物是合成抗氧化酶的关键物质,可有效预防氧化应激。在适宜浓度下,硒能增强抗氧化酶活性,提高蛋白质抗氧化能力^[22,32]。Guardado-Félix 等^[33]研究鹰嘴豆芽时发现,硒能够通过调节鹰嘴豆芽中蛋白的水解作用,进而提高其抗氧化能力。此外,由于富硒萌发藜麦蛋白中硒可能以硒代半胱氨酸的形式存在,而硒代半胱氨酸是动物抗氧化酶系统中谷胱甘肽过氧化物酶等的活性位点^[30],因此富硒萌发藜麦蛋白具有更

好的抗氧化效果。
2.5.2 富硒萌发对藜麦多酚抗氧化活性的影响 由表 4 可知,相较于未处理,普通萌发和富硒萌发处理后藜麦多酚DPPH 自由基、ABTS 自由基清除能力和 FRAP 铁还原能力均增强。富硒萌发藜麦多酚抗氧化能力最强,其次是萌发藜麦,未处理藜麦相对最低。富硒萌发藜麦多酚抗氧化能力的显著提升,一方面归因于富硒萌发藜麦中较高的多酚含量;另一方面,除硒蛋白形式外,部分硒可能与多酚结合形成了硒多酚,促使藜麦多酚抗氧化活性增强^[31]。

处理	μmol TE/100 g					
	DPPH 自由基清除能力		FRAP 铁还原能力		ABTS 自由基清除能力	
	游离酚	结合酚	游离酚	结合酚	游离酚	结合酚
未处理	7 176.34±14.621 ^c	4 207.70±5.829 ^c	1 085.29±6.129 ^c	284.05±7.251 ^c	1 049.44±4.794 ^c	109.32±4.516 ^c
萌发	8 353.65±11.984 ^b	4 723.51±8.626 ^b	1 424.81±9.639 ^b	301.47±2.621 ^b	1 311.47±4.938 ^b	139.48±7.515 ^b
富硒	9 128.63±9.728 ^a	5 018.68±17.024 ^a	1 752.55±4.073 ^a	334.59±4.792 ^a	1 573.11±3.492 ^a	155.84±3.721 ^a

† 同列字母不同表示有显著性差异(P<0.05)。

3 结论

采用单因素和正交试验优化得到藜麦富硒萌发最佳工艺条件为:亚硒酸钠质量浓度 20 mg/L、浸泡液 pH 7.0、浸泡温度 25 ℃、浸泡时间 6 h、萌发时间 48 h、萌发温度 20 ℃。在此条件下,富硒萌发藜麦有机硒含量达到 349.52 μg/kg。相较于未处理藜麦,萌发藜麦可溶性蛋白和总酚含量分别提高了 29.62%和 21.01%,而富硒萌发藜麦可溶性蛋白和总酚含量分别提高了 18.21%和 41.46%。富硒萌发藜麦可溶性蛋白、游离酚和结合酚均表现出最强的抗氧化能力。以亚硒酸钠为硒源进行富硒萌发,是提高藜麦种子有机硒、可溶性蛋白、酚类物质含

量并增强其抗氧化特性的有效方式。富硒萌发藜麦作为一种优质的膳食营养强化剂,在富硒食品开发中具有潜在的应用前景。

参考文献

[1] 陈淑芳, 苏晓丹, 李瑞, 等. 荞麦富硒萌发过程中生理变化比较研究[J]. 食品工业, 2019, 40(1): 47-51.
CHEN S F, SU X D, LI R, et al. Comparative study of the physiological changes of buckwheat during the selenium-enriched and germination process[J]. The Food Industry, 2019, 40(1): 47-51.
[2] HAN M Q, LIU K L. Selenium and selenoproteins: their function and development of selenium-rich foods[J]. International Journal of

- Food Science & Technology, 2022, 57(11): 7 026-7 037.
- [3] ZHANG L Q, GUO Y B, LIANG K H, et al. Determination of selenium in common and selenium-rich rice from different areas in china and assessment of their dietary intake[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(12): 4 596.
- [4] 李婷婷, 段耿婷, 张澜, 等. 不同亚硒酸钠浓度对党参生长、生理特性和品质的影响[J]. 广西植物, 2023, 43(4): 755-764.
- LI T T, DUAN G T, ZHANG L, et al. Effect of different selenium concentrations on growth, physiological characteristics and quality of codonopsis pilosula[J]. Guihaia, 2023, 43(4): 755-764.
- [5] CAO Y A, ZOU L, LI W, et al. Dietary quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) polysaccharides ameliorate high-fat diet-induced hyperlipidemia and modulate gut microbiota [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 55-65.
- [6] NG C Y, WANG M F. The functional ingredients of quinoa (*Chenopodium quinoa*) and physiological effects of consuming quinoa: a review[J]. Food Frontiers, 2021, 2(3): 329-356.
- [7] REN G X, TENG C, FAN X, et al. Nutrient composition, functional activity and industrial applications of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) [J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135290.
- [8] HERNANDEZ-LEDESMA B. Quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) as source of bioactive compounds: a review[J]. Bioactive Compounds in Health and Disease, 2019, 2(3): 27-47.
- [9] KITAGUCHI T, OGRA Y, IWASHITA Y, et al. Speciation of selenium in selenium-enriched seeds, buckwheat (*Fagopyrum esculentum* moench) and quinoa (*Chenopodium quinoa* willdenow) [J]. European Food Research and Technology, 2008, 227: 1 455-1 460.
- [10] 崔建荣, 李成虎, 尹学红. 硒肥对藜麦生长发育及产量的影响研究: 基于海原县段塬村藜麦纳米硒肥试验分析[J]. 农业开发与装备, 2022(12): 175-177.
- CUI J R, LI C H, YIN X H, et al. Research on the effect of selenium fertilizer on the growth, development and yield of quinoa-based on the experimental analysis of quinoa nano-selenium fertilizer in duan plateau village, haiyuan county [J]. Agricultural Development & Equipments, 2022(12): 175-177.
- [11] AMERIAN M, KHORAMIVAF A, RABANI B A. Effect of selenium and humic acid on germination and some morphological characteristics of quinoa under drought and salinity stress [J]. Journal of Vegetables Sciences, 2023, 6(2): 1-16.
- [12] LAN Y L, ZHANG W G, LIU F G, et al. Recent advances in physiochemical changes, nutritional value, bioactivities, and food applications of germinated quinoa: a comprehensive review [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136390.
- [13] IKRAM A, SAEED F, AFZAAL M, et al. Nutritional and end-use perspectives of sprouted grains: a comprehensive review[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(8): 4 617-4 628.
- [14] LIU S Y, WANG W, LU H Y, et al. New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 187-197.
- [15] 张文刚, 杜春婷, 杨希娟, 等. 不同加工方式对藜麦蛋白质结构与功能特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 88-95.
- ZHANG W G, DU C T, YANG X J, et al. Effects of different processing methods on the structural and functional properties of quinoa proteins[J]. Food Science, 2022, 43(7): 88-95.
- [16] 聂昌宏, 郑欣, 阿依居来克·卡得尔, 等. 考马斯亮蓝法检测不同乳中乳清蛋白含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(5): 1 138-1 142.
- NIE C G, ZHEN X, AYIJULAIKE D, et al. Determination of whey protein content in different kinds of milk by coomassie brilliant blue method[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(5): 1 138-1 142.
- [17] 郭俊玲, 张杰, 张文刚, 等. 超声波协同萌发处理富集黑青稞多酚的工艺优化及其酚酸组成分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 207-215.
- GUO J L, ZHANG J, ZHANG W G, et al. Process optimization of ultrasonic co-germination for enriching black highland barley polyphenols and analysis of phenolic acid composition[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 207-215.
- [18] 杨希娟, 党斌, 樊明涛. 溶剂提取对青稞中不同形态多酚组成及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(24): 239-248.
- YANG X J, DANG B, FAN M T. Effect of different extraction solvents on phenolic profiles and antioxidant activities of hulless barley[J]. Food Science, 2018, 39(24): 239-248.
- [19] BAKAR M F A, MOHAMED M, RAHMAT A, et al. Phytochemicals and antioxidant activity of different parts of bambangan (*Mangifera pajang*) and tarap (*Artocarpus odoratissimus*) [J]. Food Chemistry, 2009, 113(2): 479-483.
- [20] GUO X D, MA Y J, PARRY J, et al. Phenolics content and antioxidant activity of tartary buckwheat from different locations [J]. Molecules, 2011, 16(12): 9 850-9 867.
- [21] 杨瑞, 党斌, 张杰, 等. 青海青稞、燕麦、藜麦营养品质及抗氧化活性比较研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5): 63-69.
- YANG R, DANG B, ZHANG J, et al. A comparative study on nutritional quality and antioxidant activity of barley, oats, and quinoa in Qinghai [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5): 63-69.
- [22] 孙美侠, 严宏康, 程超, 等. 富硒麦芽的制备工艺优化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 221-229.
- SUN M X, YAN H K, CHENG C, et al. Optimization of preparation processes for selenium-rich malt [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 221-229.
- [23] 董状, 吕庆云, 沈汪洋, 等. 富硒发芽糙米及其挤压米制作工艺优化[J]. 食品科技, 2021, 46(6): 174-180.
- DONG Z, LYU Q Y, SHEN W Y, et al. Optimization of processing technology of selenium enriched germinated brown rice and extruded rice [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(6): 174-180.

- 174-180.
- [24] 吴玉娟, 陈壹刘, 张靖松, 等. 超高压辅助酶解豌豆蛋白工艺优化研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(11): 90-94.
- WU Y J, CHEN Y L, ZAHNG J S, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of pea protein assisted by ultra-high pressure [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(11): 90-94.
- [25] 魏龙, 郭楠楠, 段秋虹. 大豆发芽富硒工艺条件研究[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(10): 21-23.
- WEI L, GUO N N, DAUN Q H. Study on the technological conditions of soybean germination and selenium enrichment[J]. Cereals & Oils, 2018, 31(10): 21-23.
- [26] 王红, 叶英, 韦唯, 等. 不同萌发条件及加工方法对藜麦品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(9): 72-79.
- WANG H, YE Y, WEI W, et al. Effects of different germination conditions and processing methods on the quality of quinoa [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(9): 72-79.
- [27] 宋妍, 李粟晋, 陶阳, 等. 青稞籽粒富硒发芽条件优化及其抗氧化能力分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 188-195, 202.
- SONG Y, LI S J, TAO Y, et al. Optimization of selenium enriched germination conditions and its antioxidant abilities in highland barley seeds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(14): 188-195, 202.
- [28] 韩雅盟, 池建伟, 马永轩, 等. 藜麦发芽过程中蛋白质与皂苷及淀粉消化特性的变化规律[J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 17-23.
- HAN Y M, CHI J W, MA Y X, et al. Changes in protein, saponin content and starch profiles of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) seeds during germination [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(6): 17-23.
- [29] 郭思倩, 杨肇兴, 姚洋, 等. 萌发对藜麦蛋白质结构与功能特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(8): 156-162.
- GUO S Q, YANG Z X, YAO Y, et al. Influence of germination on qualitative properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) protein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(8): 156-162.
- [30] 李楠, 孟航婷, 孙元琳, 等. 黑豆不同发芽期多酚、黄酮及抗氧化活性分析[J]. 食品工业, 2023, 44(8): 139-143.
- LI N, MENG H T, SUN Y L, et al. Analysis of polyphenols, flavonoids and antioxidant activity of black bean at different germination stages [J]. The Food Industry, 2023, 44(8): 139-143.
- [31] 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: 10.
- HUA Z Y. Study on antioxidant and instant powder development of germinated selenium-enriched rough millet [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021: 10.
- [32] SANTESMASSES D, GLADYSHEV V N. Pathogenic variants in selenoproteins and selenocysteine biosynthesis machinery [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(21): 11593.
- [33] GUARDADO-FÉLIX D, SERNA-SALDIVAR S O, GUTIÉRREZ-URIBE J A, et al. Selenium in germinated chickpea (*Cicer arietinum* L.) increases the stability of its oil fraction [J]. Plants, 2019, 8(5): 113.
-
- (上接第 125 页)
- [25] XIAO J W, LU J F, LI X Y. Davies bouldin index based hierarchical initialization K-means [J]. Intelligent Data Analysis, 2017, 21(6): 1 327-1 338.
- [26] 谭章禄, 陈孝慈. 改进的分类器分类性能评价指标研究[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(9): 3-8.
- TAN Z L, CHEN X C. Study on improved classifier's performance evaluation indicators [J]. Statistic & Information Forum, 2020, 35(9): 3-8.
- [27] CHANG H, YIN J F, TIAN H, et al. Evaluation of the optical layout and sample size on online detection of apple watercore and SSC using Vis/NIR spectroscopy [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 123: 105528.
- [28] LI J B, ZHANG Y F, ZHANG Q, et al. Establishment of a multi-position general model for evaluation of watercore and soluble solid content in 'Fuji' apples using on-line full-transmittance visible and near infrared spectroscopy [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 117: 105150.
- [29] ZHANG Y F, WANG Z, TIAN X, et al. Online analysis of watercore apples by considering different speeds and orientations based on Vis/NIR full-transmittance spectroscopy [J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 122: 104090.
-
- (上接第 162 页)
- [25] ZARRAS P, VOGL O. Polycationic salts as bile acid sequestering agents [J]. Progress in Polymer Science, 1999, 24(4): 485-516.
- [26] ZENG C, CHEN X, JIANG W, et al. Isolation, purification and antioxidant activity of the polysaccharides from Chinese truffle tuber *sinense* [J]. Iranian Journal of Pharmaceutical Research, 2020, 19(1): 436-447.
- [27] 杭书扬, 杨留枝, 史苗苗, 等. 山药皮残渣多糖结构表征及抗氧化活性测定 [J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 153-158, 206.
- HANG S Y, YANG L Z, SHI M M, et al. Characterization and antioxidant activity determination of polysaccharide from yam peel residue [J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 153-158, 206.
- [28] HERNANDEZ-MARIN E, MARTÍNEZ A. Carbohydrates and their free radical scavenging capability: a theoretical study [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2012, 116(32): 9 668-9 675.