

发芽对藜麦营养价值及功能性成分含量的影响

郑文琪, 洪慧晨, 王迪, 梅俊霞, 李晨, 林丽军*, 陆利霞*, 熊晓辉
(南京工业大学食品与轻工学院, 江苏南京 211816)

摘要: 发芽是一种能够提高谷物营养价值与功能成分的绿色加工方法。该研究以白藜麦为原料进行发芽, 在发芽 0~32 h 进行采样, 对其中的营养成分、淀粉消化性质、功能性成分及抗营养因子含量进行检测。与未发芽藜麦相比, 发芽后藜麦淀粉含量显著降低 ($P<0.05$), 至 32 h 含量由 61.89% 减少至 47.84%。蛋白质和氨基酸态氮在发芽初期有所下降, 但在 16 h 后又呈增加趋势; 游离必需氨基酸总含量显著增加至 22.53 mg/100 g prot ($P<0.05$), 且赖氨酸含量较高。发芽过程快速消化淀粉、慢性消化淀粉和抗性淀粉无显著差异 ($P>0.05$), 但血糖负荷 (Glycemic Load, GL) 显著降低 ($P<0.05$), 属于中 GL 食物。功能成分 γ -氨基丁酸、总多酚含量均在发芽 32 h 时分别增加了 48.10%、41.81%, 抗营养因子植酸含量显著降低了 49.50%。综上, 选择发芽 24~32 h 利于藜麦营养物质的积累。发芽不仅改善了藜麦营养价值还可增加功能成分, 为藜麦作为一种健康食品的开发和利用提供参考。

关键词: 藜麦; 发芽; 营养成分; 必需氨基酸; 血糖负荷; 功能性成分

文章编号: 1673-9078(2026)1-255-263

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.1.1428

The Impact of Germination on the Nutritional Value and Contents of Functional Components of Quinoa

ZHENG Wenqi, HONG Huichen, WANG Di, MEI Junxia, LI Chen, LIN Lijun*, LU Lixia*, XIONG Xiaohui
(College of Food and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Germination is a green processing method that can enhance the nutritional value and functional components of grains. This study used white quinoa as the raw material for germination. Samples were taken after 0~32 h of germination, and their nutritional composition, starch digestibility, functional components, and anti-nutritional factors were determined. Compared with the ungerminated quinoa, the starch content of the germinated quinoa was significantly reduced ($P<0.05$, from 61.89% to 47.84% after 32 h). The contents of protein and free amino nitrogen initially decreased but then increased after 16 h of germination. The total content of free essential amino acids significantly increased (up to 22.53 mg/100 g pro; $P<0.05$), with the lysine content being the highest among all the free EAAs. During the germination process, there were insignificant differences in rapidly digestible starch (RDS), slowly digestible starch (SDS), and resistant starch (RS) ($P>0.05$), but the glycemic load (GL) was significantly reduced ($P<0.05$), indicating it as a medium GL food. The contents of functional components, γ -aminobutyric acid (GABA) and total polyphenols, increased by 48.10% and 41.81%, respectively after 32 h of germination, whilst the content of the anti-nutritional factor phytic acid was significantly reduced by 49.50%. In summary, germinating quinoa for 24~32 hours is conducive to the accumulation

引文格式:

郑文琪,洪慧晨,王迪,等.发芽对藜麦营养价值及功能性成分含量的影响[J].现代食品科技,2026,42(1):255-263.

ZHENG Wenqi, HONG Huichen, WANG Di, et al. The impact of germination on the nutritional value and contents of functional components of quinoa [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(1): 255-263.

收稿日期: 2024-09-24 ; 修回日期: 2024-12-11 ; 接受日期: 2024-12-23

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 [CX(21)3110]

作者简介: 郑文琪 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品, E-mail: zhengwenqi84@163.com

通讯作者: 林丽军 (1979-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 功能性食品, E-mail: lljnjut@126.com ; 共同通讯作者: 陆利霞 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 功能性食品, E-mail: llxhn66@126.com

of nutrients in quinoa. Germination not only improves the nutritional value of quinoa but also increases its functional components, providing a reference for the development and utilization of quinoa as a healthy food.

Key words: quinoa; germination; nutrient composition; essential amino acids; glycemic load; functional components

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.), 又称南美藜、印第安麦、奎藜等, 为无麸质谷物。近几年, 藜麦因其农业潜力和营养特性吸引全球学者的关注, 联合国粮食及农业组织 (FAO) 已确认其为全球最适合人类食用的十大健康和营养食品之一^[1]。藜麦是公认的具有相对完整营养价值和治疗功效的食物, 是优质蛋白来源, 具有低升糖、低淀粉、低脂等特点。与小麦、玉米等传统谷物相比具有更均衡的氨基酸比例、富含赖氨酸以及蛋白质、不含面筋等优点^[2]。长期食用优质无麸质藜麦有助于预防和治疗各种慢性疾病, 如肥胖、糖尿病、降血脂等^[1,3]。

谷物发芽是一个复杂的动态过程^[4]。发芽处理后谷物中的营养成分、生物活性物质以及皂苷、植酸等抗营养因子含量发生变化, 营养价值有一定提升且对高血糖、高血脂、心血管疾病等具有预防和改善的作用^[5]。Darwish 等^[6]发现发芽 72 h 后藜麦中蛋白质含量由 15.31% 显著下降到 13.50%, 而膳食纤维含量由 10.77% 显著增加到 12.54%。陈若瑀等^[7]选取了种子、刚出芽、芽长 1、2.5 以及 5.0 cm 的藜麦, 研究发现当藜麦芽长 2.5 cm 时, 蛋白质及总膳食纤维含量均达到最大值; 脂肪含量在芽长 5.0 cm 时达到最低值 6.79 g/100 g; 总酚含量在芽长 1.5 cm 时有短时上升。Lan 等^[8]发现发芽显著提高了藜麦中纤维、氨基酸、GABA 以及多酚的含量, 且在发芽 36~72 h 时营养品质和抗氧化能力最佳。Cao 等^[9]研究发现 JQ-W2 藜麦发芽 12 h 和 24 h 时, 藜麦芽长分别为 9.610 mm 和 18.480 mm, 除 VB₁ 含量无显著变化外, 其他营养成分如可溶性糖、游离氨基酸、GABA、VB₂、VB₆ 以及 Vc 的含量在发芽 24 h 含量更高。Pilco 等^[10]研究结果证明发芽 72 h 后藜麦中酚类含量由 2 319.1 μg/g 增加到 4 656.9 μg/g。Bhinder 等^[11]研究证明发芽 96 h 后白色和黑色藜麦中皂苷的含量分别降低了 42.94% 和 58.26%。Pedro 等^[12]研究发现三种藜麦在发芽期间的植酸酶活性均显著增加, 植酸含量也大幅度减少。

目前, 国内有关藜麦发芽加工产品的研究主要集中在发芽时间及不同芽长, 而针对药典中芽长的功能成分及营养物质有待研究。因此本文以白藜麦为试验材料, 研究发芽处理对其营养成分 (淀粉、蛋白质、氨基酸态氮)、游离必需氨基酸 (Essential Amino Acid, EAA)、总 EAA、淀粉消化性质、功能性成分 (膳食

纤维、γ-氨基丁酸、总多酚) 及抗营养因子 (植酸) 含量变化的影响, 并采用必需氨基酸评分、化学评分、必需氨基酸指数和生物价对发芽藜麦 EAA 进行营养评价, 为改善藜麦营养价值以及促进藜麦加工及开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

白藜麦, 产自青海省西宁市, 市售; 没食子酸标准品 (纯度 99%)、植酸钠标准品 (纯度 90%), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 胰 α-淀粉酶 (酶活: 100 000 U/g)、淀粉葡萄糖苷酶 (酶活: 100 000 U/mL), 上海源叶生物生物科技有限公司; 氢氧化钠、3,5-二硝基水杨酸、次氯酸钠、浓盐酸、浓硫酸、无水乙醇 (均为分析纯), 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

SHP-100 型生化恒温培养箱, 上海三发科学仪器有限公司; GZX-9140MBE 型电热恒温鼓风干燥箱, 上海博迅实业有限公司医疗设备厂; HH-2 型数显恒温水浴锅, 常州国华电器有限公司; SHZ-B 型水浴恒温振荡器, 上海博迅实业有限公司医疗设备厂; K9840 自动凯氏定氮仪, 上海沛欧分析仪器有限公司; SX2-4-10 型箱式电阻炉, 上海益众电炉有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 发芽处理

挑选颗粒饱满、大小均匀的藜麦, 加入体积分数为 0.1% 次氯酸钠溶液浸泡处理 10 min 后, 用蒸馏水洗涤 2~3 次, 洗涤后室温下 (20~25 °C) 用蒸馏水浸泡 2 h; 浸泡结束后将藜麦转移至铺有纱布的育苗盘中进行萌芽。发芽温度 26 °C, 湿度保持在 80% 以上, 发芽过程中每 8 h 取样并喷洒蒸馏水, 发芽 32 h 结束。藜麦及发芽藜麦样品在 40 °C 烘箱中干燥至恒重, 研磨粉碎过 60 目筛后, 存于 4 °C 备用。

1.3.2 测定指标及方法

1.3.2.1 芽长的测定

随机选取发芽藜麦, 拍照后用 Fiji 软件测定芽长。

1.3.2.2 基本营养成分测定

水分参考 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》，采用直接干燥法进行的测定。淀粉参考 GB 5009.9-2023《食品中淀粉的测定》，采用酸水解法进行测定。蛋白质参考 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》，采用凯氏定氮法进行测定。氨基酸态氮参考 GB 5009.235-2016《食品中氨基酸态氮的测定》，采用酸度计法进行测定。膳食纤维参考 GB 5009.88-2023《食品中膳食纤维的测定》。

1.3.2.3 游离葡萄糖 (Free Glucose, FG) 和总淀粉 (Total Starch, TS) 质量分数测定

参考江蕾^[13]的方法测定 FG 和 TS 的质量分数并稍作修改。称取 1.0 g 样品，并加入 20 mL 磷酸盐缓冲溶液，混匀，沸水浴 20 min。待冷却后，5 000 g/min 离心 10 min，吸取上清液。用 3,5-二硝基水杨酸法在 540 nm 处测定吸光度，按公式 (1) 计算样品中 FG 质量分数。

称取 1.0 g 样品，加入 15 mL 蒸馏水和 10 mL HCl (6 mol/L) 溶液于锥形瓶内，沸水浴 30 min。待冷却后，用 6 mol/L NaOH 中和至微红色，用蒸馏水定容至 100 mL，过滤。取滤液 10 mL 用蒸馏水定容至 100 mL，混匀。用 3,5-二硝基水杨酸法在 540 nm 处测定吸光度，按公式 (2) 计算样品中 TS 质量分数。

$$FG = \frac{M_1}{M} \times 100\% \quad (1)$$

$$TS = \frac{M_1 - FG}{M} \times 0.9 \times 100\% \quad (2)$$

式中：

FG——游离葡萄糖质量分数，%；

M_1 ——上清液中葡萄糖质量，mg；

M ——样品淀粉质量，mg；

TS——总淀粉质量分数，%；

0.9——葡萄糖转换淀粉的转换系数。

1.3.2.4 体外消化特性测定

参考 Englyst 等^[14]方法稍作修改。根据样品中淀粉的含量，称取一定量的样品，使其淀粉含量约为 200 mg，加入 15 mL 乙酸钠缓冲液 (0.1 mol/L, pH 值 5.2)，密封后置于 37 °C 水浴振荡器预热 5 min，加入 10 mL α -淀粉酶 (290 U/mL) 和 0.5 mL 淀粉葡萄糖苷酶 (4 000 U/mL) 溶液，分别于 0、10、20、30、60、90、120、150 和 180 min 取 1 mL 水解液，并立即加入 4 mL 无水乙醇灭酶，6 000 g 离心 10 min。利用 3,5-二硝基水杨酸法进行还原糖的测定，并按照公式 (3)~(8) 计算水解指数 (Hydrolysis Index, HI)、预估

血糖生成指数 (Estimate Glycemic Index, eGI)、血糖负荷 (Glycemic Load, GL)、快速消化淀粉 (Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢性消化淀粉 (Slowly Digestible Starch, SDS) 以及抗性淀粉 (Resistant Starch, RS)。

$$HI = \frac{AUC_{sample}}{AUC_{standard}} \times 100 \quad (3)$$

$$eGI = 39.71 + 0.549HI \quad (4)$$

$$GL = \frac{eGI \times M}{100} \quad (5)$$

式中：

HI——水解指数；

eGI——预估血糖指数；

AUC_{sample} ——样品消化 180 min 内葡萄糖曲线下面积；

$AUC_{standard}$ ——标准品消化 180 min 内葡萄糖曲线下面积；

GL——血糖负荷；

M ——摄入食物实际可利用碳水化合物质量，g。

$$RDS = \frac{G_{20} - FG}{TS} \times 0.9 \times 100\% \quad (6)$$

$$SDS = \frac{G_{120} - G_{20}}{TS} \times 0.9 \times 100\% \quad (7)$$

$$RS = 1 - RDS - SDS \quad (8)$$

式中：

RDS——快速消化淀粉，%；

SDS——慢性消化淀粉，%；

RS——抗性淀粉，%；

FG——酶解前游离葡萄糖质量，mg；

TS——样品中总淀粉质量，mg；

G_{20} ——酶解 20 min 后产生游离葡萄糖质量，mg；

G_{120} ——酶解 120 min 后产生游离葡萄糖质量，mg。

1.3.2.5 游离 EAA 和 γ -氨基丁酸 (γ -Aminobutyric Acid, GABA) 的测定

参考 GB/T 30987-2020《植物中游离氨基酸的测定》，采用液相色谱-串联质谱法进行测定。

1.3.2.6 总 EAA 的测定及营养评价

参考 GB 5009.124-2016《食品中氨基酸的测定》中试样水解的方法，采用液相色谱-质谱法进行测定。

按公式 (9)~(12) 计算必需氨基酸评分 (Amino Acid Score, AAS)、必需氨基酸化学评分 (Chemical Score, CS)、必需氨基酸指数 (Essential Amino Acid Index, EAAI) 和生物价 (Biological Value, BV)。

$$AAS = \frac{A_{sample,i}}{A_{pattern,i}} \quad (9)$$

$$CS = \frac{A_{sample,i}}{A_{reference,i}} \quad (10)$$

$$EAAI = \sqrt[7]{\frac{A_{sample,1}}{A_{reference,1}} \times \frac{A_{sample,2}}{A_{reference,2}} \times \cdots \times \frac{A_{sample,7}}{A_{reference,7}}} \quad (11)$$

$$BV = 1.09 \times EAAI - 11.7 \quad (12)$$

式中:

AAS——不同必需氨基酸评分;

CS——不同必需氨基酸化学评分;

EAAI——必需氨基酸指数;

BV——生物价;

$A_{sample,i(i=1,2,\dots,7)}$ ——待测样品蛋白中某种(其中Phe+Tyr合并计算)必需氨基酸的含量, mg/g prot;

$A_{pattern,i(i=1,2,\dots,7)}$ ——2013年FAO评分模式中相应必需氨基酸的含量, mg/g prot;

$A_{reference,i(i=1,2,\dots,7)}$ ——参考蛋白(鸡蛋或牛奶)中相应必需氨基酸的含量, mg/g prot.

1.3.2.7 总多酚的提取及含量测定

参考郭亚鹏^[15]的方法并稍作修改。准确称取样品1.0 g, 于50 mL离心管中, 按照1:20(g/mL)加入体积分数为65%乙醇溶液, 于50℃, 250 W超声45 min, 冷却后3 500 g/min离心15 min, 去上清液备用。以没食子酸质量浓度为横坐标、吸光度值为纵坐标, 建立了标准曲线。测定样品中的总多酚含量。

1.3.2.8 植酸的提取及含量测定

参考甘镜君^[16]的方法并稍作修改。准确称取处理后藜麦粉25 mg于10 mL离心管中, 加入质量分数为3%的TCA溶液2.5 mL和质量分数为0.02%的 $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ 溶液5 mL, 加盖后摇匀。在沸水浴加热30 min后, 流水冷却, 4 000 g离心10 min。取2 mL上清液于新试管中, 加入3 mL双吡啶溶液, 震荡摇匀, 在519 nm波长下测定吸光值。以植酸钠质量浓度为横坐标、吸光度值为纵坐标, 建立了标准曲线。测定样品中的植酸含量。

1.4 数据处理

所有试验进行3次平行测定, 试验结果表示为平均值±标准差。利用Excel 2019对数据进行整合归纳, SPSS 26.0对数据进行方差分析, 采用ANOVA法进行显著性分析($P < 0.05$); 使用GraphPad Prism 9.0软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 藜麦发芽过程中水分及芽长的变化

种子萌发标志着植物生长周期的开始, 这一过程涉及多个连续的阶段。藜麦种子的萌发主要分为五个阶段: 干种子(阶段一)、吸胀种子(阶段二)、胚

根萌发(阶段三)、下胚轴伸长(阶段四)和子叶扩展(阶段五)^[17]。如图1所示, 原藜麦种子的含水量为11.22%, 经过2 h的浸泡吸水其含水量显著增加($P < 0.05$), 与原藜麦种子相比增加了4.23倍, 这符合藜麦种子萌发的第二阶段(吸胀种子), 为后续的萌发准备基本的水分。随后藜麦种子的胚根伸出种皮进入第三阶段(胚根萌发), 发芽至32 h时达到第四阶段(下胚轴伸长)。

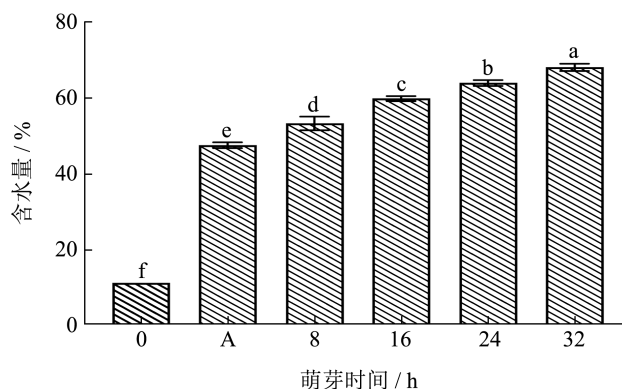


图1 藜麦发芽过程中种子含水量的变化

Fig.1 Changes in seed water content of quinoa seeds during the germination process

注: 0 h表示原料(未浸泡处理), A表示浸泡2 h。不同小写字母间表示显著差异($P < 0.05$)。下同。

由图2可知, 随着发芽时间延长, 藜麦的芽长显著增加($P < 0.05$)。发芽至24~32 h时, 芽长超过11 mm。根据《中华人民共和国药典》(2020版)中关于粟、大麦和稻等发芽谷物的描述, 芽长在3 mm < 芽长 < 12 mm以下的发芽谷物被认为具有消食和中、健脾开胃的功效。本研究选择将藜麦发芽至24~32 h, 结合营养价值及功能性物质含量选择适宜的发芽时间。

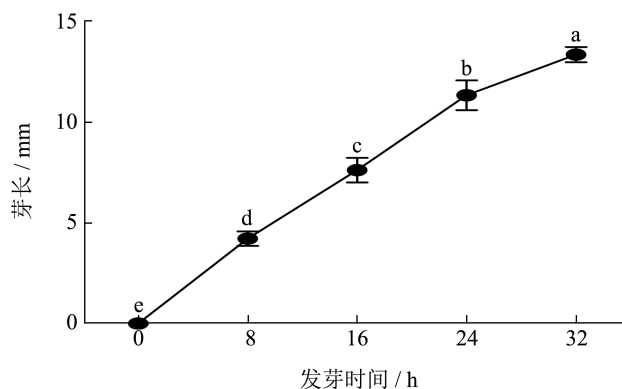


图2 藜麦发芽过程中芽长的变化

Fig.2 Changes in sprout length of quinoa seeds during the germination process

2.2 发芽对藜麦基本营养成分的影响

藜麦发芽过程中基本营养成分含量的变化如图3所示。由图3a可见,与未发芽藜麦相比,随着发芽时间的延长,发芽藜麦中的淀粉含量逐渐减少,当发芽至32 h时藜麦淀粉由原来的61.89%显著减少至47.84% ($P<0.05$)。这是由于发芽过程中淀粉逐渐被激活的淀粉酶水解成小分子糖类,同时呼吸作用也会消耗部分淀粉。

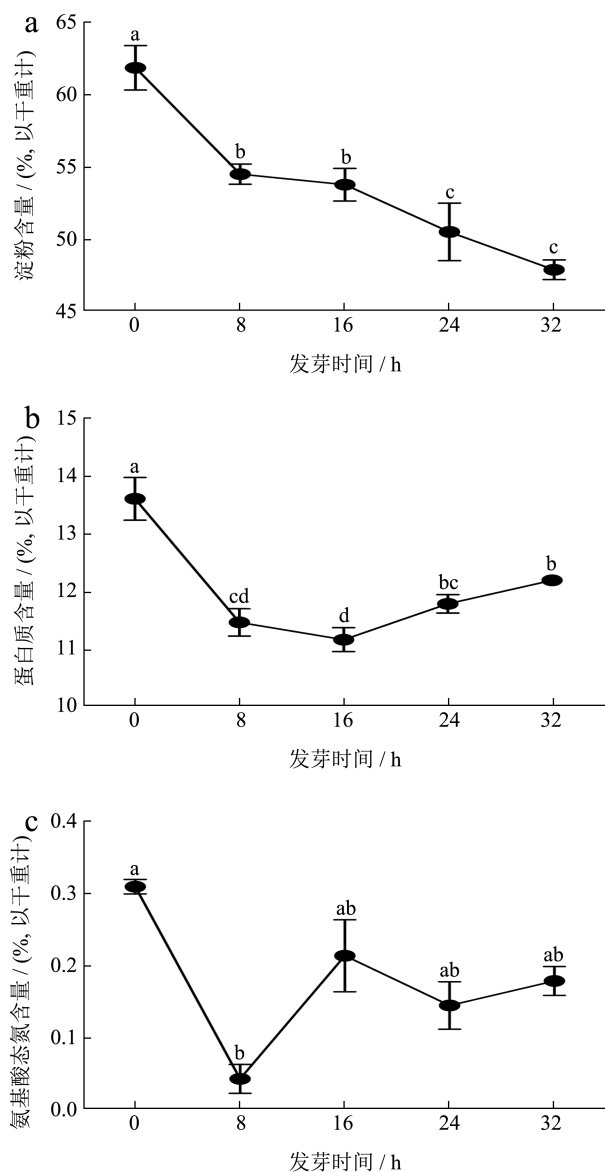


图3 藜麦发芽过程中基本营养成分含量的变化

Fig.3 Changes in the content of essential nutrients of quinoa seeds during the germination process

由图3b、3c可见,藜麦发芽期间总氮基本维持一种动态平衡,随着发芽时间的延长,发芽前16 h藜麦蛋白质含量呈现降低趋势,由13.61%降低至16 h的11.17%,而在16 h之后,则呈缓慢上升趋势。同

时,藜麦发芽至8 h时,其氨基酸态氮的含量显著降低 ($P<0.05$),由0.31%减少到0.04%,减少了87%。该变化可能是由于藜麦在发芽初期,贮藏在藜麦种子中的蛋白质被迅速分解以支持新芽的生长,导致AAN含量的下降。同时,新蛋白质的合成尚未完全补偿这一损失,以及在发芽初期可溶性蛋白的溶解,因此使得蛋白质的含量也有所下降。该变化反映了藜麦种子在发芽过程中蛋白质代谢的复杂性,受到蛋白质降解、氨基酸合成和新蛋白合成的影响^[18]。本研究结果与郭思倩等^[19]报道藜麦发芽过程中蛋白质含量始终呈上升趋势的结果有差异,可能是由于藜麦品种、发芽条件、芽长等不同所导致的。随着藜麦芽的生长,需要合成新的氨基酸来满足生长需要,使得氨基酸态氮的含量增加。因此,在后续的研究中,可考虑适当延长发芽时间,以进一步优化藜麦的营养,使其成为更理想的健康食品选择。

2.3 发芽对藜麦淀粉消化性质的影响

由表1可知,发芽对藜麦淀粉中RDS、SDS和RS含量的影响不显著 ($P>0.05$),但RDS呈先增加后减少的趋势,SDS和RS呈现先减少后增加的趋势。在未发芽藜麦淀粉中RS占比为75.07%,RDS占比仅为10.87%。说明藜麦具有较强的抗消化性能,食用后葡萄糖释放率较缓,血糖变动幅度较小。Fabiola等^[20]研究发现,未发芽藜麦中RDS和SDS含量较高,RS含量较低。将植物种子进行浸泡、蒸煮和脱水处理后,可显著提高RS含量,并降低SDS含量^[21]。这表明藜麦品种、加工工艺等对淀粉组分产生影响。

发芽处理后藜麦的eGI值高于未发芽藜麦 ($P<0.05$),但其GL值均显著下降 ($P<0.05$),由16.74降至13.08,归于中GL食物。餐后血糖水平的波动不仅受食物中碳水化合物种类的影响,还与摄入的碳水化合物总量相关,因此GL更能准确的反映食物对餐后血糖水平的影响^[22]。结果表明通过藜麦发芽对于开发降血糖及平稳血糖产品提供新方法。

2.4 发芽藜麦必需氨基酸含量的变化及营养价值评价

EAA对生物体代谢活动具有重要调节作用。由表2可知,未发芽藜麦中总游离EAA含量为14.27 mg/100 g DW,其中Lys、Met和Ile含量高,分别为3.87、2.18和2.07 mg/100 g DW。发芽8 h时总游离EAA最低,为5.55 mg/100 g DW,但Lys始终是含量较高的游离EAA,并在发芽32 h达到最大值,为4.39 mg/100 g DW。发芽至32 h时,除Met外的其他

游离 EAA 含量显著增加 ($P<0.05$), 是未发芽时的 1.13~3.46 倍。Lan 等^[8]研究发现, 经过发芽 24 h 后藜麦中游离 EAA 含量均有所增加, 而本研究发芽至 24 h 时 Met 和 Ile 含量呈显著减少 ($P<0.05$)。Cao 等^[9]研究发现, 不同品种的藜麦在发芽期间, 其游离氨基酸含量的变化不同。

由表 3 可知, 未发芽和发芽藜麦蛋白中除 Lys 和 Leu 外, 其余 EAA 及总 EAA 含量均与鸡蛋相当, 且均高于牛奶。因此, 发芽藜麦可代替奶制品为人体提供 EAA。在藜麦发芽期间, EAA 中 Met、Phe、Leu 和 Thr 的含量增加, 且 Leu 始终是 EAA 中含量最高的。Le 等^[23]的研究发现藜麦芽中 Leu 含量最高, 且 Leu 具有维持血糖平衡的作用, 这可能与藜麦的降血糖作用有关。而 Guardianelli 等^[24]研究发现, 白色藜麦在发芽过程中, Lys、Ile、Phe 和 Thr 的含量降低, Val、Leu、Met 的含量几乎无变化, 但 His 的含量在发芽过程中增加, 且总 EAA 含量在整个发芽过程中有所下降。

在比较藜麦发芽期间总 EAA 的 AAS 和 CS 变化时, 分别以 FAO 推荐的成人模式及鸡蛋蛋白作为参考标准。由表 4 可知, 藜麦发芽期间 Met 和 Lys 的评分均最低, 分别被认为是第一和第二限制性氨基酸。发芽 32 h 时, 7 种 EAA 的 AAS 均高于未发芽藜麦, 除限制性氨基酸 Met 和 Lys 外, 其余 EAA 的 AAS 均接近或高于 FAO 的推荐值, 同时 CS 均接近或超过鸡蛋蛋白。因此, 藜麦在经过发芽处理后, 使得其可以作为一种更优质的蛋白来源。

EAAI 和 BV 通常用来衡量样品蛋白中必需氨基酸组成与参考蛋白中相应必需氨基酸组成的接近程度, 值越接近于 100, 说明蛋白质中的必需氨基酸组成越均衡, 蛋白质利用率越高。结合表 4、表 5 可知, 与牛奶、鸡蛋相比时, 未发芽藜麦蛋白的 EAAI 和 BV 值均低于发芽藜麦, 且发芽 16 h 藜麦蛋白的 EAAI 和 BV 值均最高, 分别为 76.89、82.37 和 72.11、78.08, 更接近于 100, 进一步说明经过发芽处理后藜麦蛋白的营养价值得到提升。

表 1 发芽对藜麦淀粉组分、预估血糖生成指数和血糖负荷的影响
Table 1 Effects of germination on starch composition, estimated glycemic index and glycemic load of quinoa

发芽时间/h	RDS/%	SDS/%	RS/%	eGI	GL
0	10.87 ± 0.77 ^a	14.06 ± 2.59 ^a	75.07 ± 1.85 ^a	54.09 ± 0.30 ^c	16.74 ± 0.09 ^a
8	11.79 ± 1.14 ^a	13.33 ± 0.67 ^a	74.88 ± 0.97 ^a	56.21 ± 0.74 ^a	15.31 ± 0.14 ^b
16	12.45 ± 0.43 ^a	14.77 ± 0.79 ^a	72.78 ± 0.37 ^a	55.72 ± 0.57 ^{ab}	14.98 ± 0.11 ^c
24	13.07 ± 0.31 ^a	14.56 ± 1.39 ^a	72.37 ± 1.35 ^a	55.88 ± 0.36 ^{ab}	14.04 ± 0.13 ^d
32	11.72 ± 1.66 ^a	15.70 ± 1.41 ^a	72.58 ± 0.68 ^a	55.00 ± 0.45 ^{bc}	13.08 ± 0.15 ^c

注: 不同字母表示同列数值之间显著差异 ($P<0.05$)。

表 2 藜麦发芽期间游离EAA含量变化(mg/100 g DW)
Table 2 Changes in free EAA content of quinoa seeds during the germination process (mg/100 g DW)

种类	0 h	8 h	16 h	24 h	32 h
Met	2.18 ± 0.23 ^a	0.37 ± 0.00 ^d	1.87 ± 0.02 ^b	1.09 ± 0.02 ^c	1.26 ± 0.04 ^c
Val	1.07 ± 0.25 ^{cd}	0.71 ± 0.02 ^d	1.38 ± 0.07 ^{bc}	1.71 ± 0.13 ^b	3.70 ± 0.36 ^a
Lys	3.87 ± 0.11 ^a	1.44 ± 0.16 ^b	4.14 ± 0.22 ^a	3.57 ± 1.13 ^a	4.39 ± 0.12 ^a
Ile	2.07 ± 0.21 ^b	0.73 ± 0.00 ^d	2.23 ± 0.08 ^b	1.82 ± 0.09 ^c	3.65 ± 0.15 ^a
Phe	1.88 ± 0.25 ^b	0.52 ± 0.03 ^c	1.63 ± 0.04 ^b	1.83 ± 0.05 ^b	2.64 ± 0.12 ^a
Leu	1.21 ± 0.19 ^c	0.71 ± 0.04 ^d	1.60 ± 0.09 ^b	1.61 ± 0.09 ^b	3.80 ± 0.12 ^a
Thr	1.99 ± 0.33 ^b	1.07 ± 0.05 ^c	2.41 ± 0.13 ^b	1.94 ± 0.03 ^b	3.09 ± 0.31 ^a
总游离 EAA	14.27 ± 1.67 ^b	5.55 ± 0.21 ^c	15.26 ± 0.40 ^b	13.57 ± 1.37 ^b	22.53 ± 1.37 ^a

注: 不同字母表示同行数值之间差异显著 ($P<0.05$), 表 3 同。

表 3 藜麦发芽期间总EAA含量的变化 (mg/g DW)

Table 3 Changes of total EAA content in quinoa during germination (mg/g DW)							
种类	0 h	8 h	16 h	24 h	32 h	牛奶	鸡蛋
Met	2.25 ± 0.13 ^a	2.17 ± 0.49 ^a	2.36 ± 0.53 ^a	1.99 ± 0.36 ^a	2.04 ± 0.47 ^a	0.69	2.50
Val	6.74 ± 0.63 ^a	5.66 ± 0.78 ^{ab}	5.92 ± 0.69 ^{ab}	6.29 ± 0.37 ^{ab}	5.39 ± 0.13 ^b	1.53	6.70
Lys	4.83 ± 0.38 ^a	3.36 ± 1.45 ^a	4.41 ± 0.61 ^a	4.36 ± 0.35 ^a	3.98 ± 1.53 ^a	2.23	7.90
Ile	7.50 ± 0.73 ^a	6.79 ± 0.58 ^a	7.38 ± 1.01 ^a	7.49 ± 0.42 ^a	6.71 ± 0.23 ^a	1.31	0
Phe	6.62 ± 0.24 ^a	5.97 ± 0.52 ^a	5.77 ± 0.91 ^a	6.71 ± 0.19 ^a	5.69 ± 0.57 ^a	1.35	5.90
Leu	7.57 ± 0.78 ^a	6.87 ± 0.53 ^a	7.92 ± 1.22 ^a	7.83 ± 0.46 ^a	6.82 ± 0.45 ^a	2.77	10.10
Thr	3.98 ± 0.81 ^a	4.17 ± 0.31 ^a	4.21 ± 0.69 ^a	4.59 ± 0.25 ^a	4.33 ± 0.13 ^a	1.20	4.80
总 EAA	39.49 ± 3.35 ^a	34.99 ± 3.50 ^a	37.97 ± 5.12 ^a	39.26 ± 2.14 ^a	34.96 ± 0.70 ^a	11.08	37.90

表 4 藜麦发芽期间总EAA的AAS及CS变化对比

Table 4 Comparison of protein AAS and CS in quinoa during germination													
种类	0 h		8 h		16 h		24 h		32 h		FAO 推荐值/ (mg/g prot)	鸡蛋蛋白/ (mg/g prot)	牛奶蛋白/ (mg/g prot)
	AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS			
Met	0.46 [*]	0.28 [*]	0.56 [*]	0.35 [*]	0.68 [*]	0.38 [*]	0.57 [*]	0.29 [*]	0.58 [*]	0.30 [*]	35	57	33
Val	0.96	0.73	1.03	0.78	1.18	0.81	1.26	0.79	1.08	0.68	50	66	64
Lys	0.63 ^{**}	0.49 ^{**}	0.68 ^{**}	0.53 ^{**}	0.80 ^{**}	0.57 ^{**}	0.79 ^{**}	0.52 ^{**}	0.72 ^{**}	0.57 ^{**}	55	70	78
Ile	1.34	0.99	1.70	1.14	1.84	1.24	1.87	1.16	1.68	1.04	40	54	47
Phe+Tyr	1.46	0.94	1.80	1.05	1.83	1.07	2.02	1.09	1.75	0.94	60	93	102
Leu	0.77	0.63	0.98	0.73	1.13	0.84	1.12	0.76	0.97	0.66	70	86	95
Thr	1.01	0.60	1.04	0.81	1.05	0.81	1.15	0.81	1.08	0.77	40	47	44

注: * 为第一限制氨基酸; ** 为第二限制氨基酸。

表 5 藜麦发芽期间必需氨基酸指数 (EAAI) 和生物价 (BV) 对比

Table 5 Comparison of EAAI and BV of quinoa during germination process				
发芽时间/h	EAAI		BV	
	鸡蛋	牛奶	鸡蛋	牛奶
0	66.54	62.12	60.82	56.01
8	77.09	71.96	72.33	66.74
16	82.37	76.89	78.08	72.11
24	76.17	71.11	71.33	65.81
32	70.93	66.21	65.62	60.47

2.5 发芽藜麦膳食纤维含量的变化

藜麦中含有较为丰富的膳食纤维，但由于其品质、生长环境的不同，所含有的膳食纤维有较大的差异^[25]。如图 4 所示，藜麦在发芽过程中可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 和总膳食纤维 (Total Dietary Fiber, TDF) 的含量均呈现先减少后增加的趋势，且整体 SDF 含量低于不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF)。发芽至 16 h 藜麦中 SDF 含量从

12.87% 减少到 1.95%，减少了 84.83%。可能是由于藜麦中 SDF 主要由非纤维素多糖组成，而在发芽过程中非纤维素多糖受酶水解提供萌发所需要的营养物质，致使在发芽过程中 SDF 含量出现下降。SDF 略有上升，可能是同聚半乳糖醛酸的合成促使果胶附着于细胞壁^[26]。Sharma 等^[27]的研究表明红色和白色藜麦在发芽 48 h 期间其 TDF 呈现不同趋势，红藜中 TDF 含量逐渐增加，而白藜中 TDF 含量先增后减。

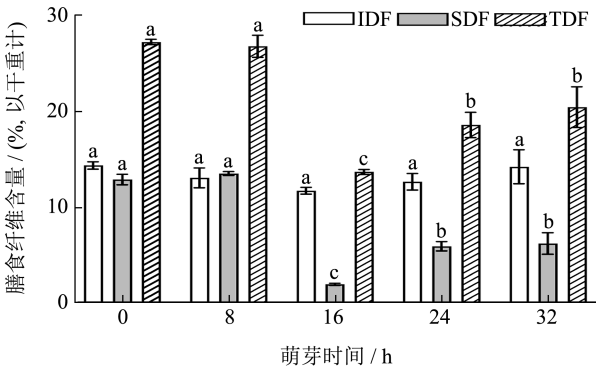


图 4 藜麦发芽过程中膳食纤维含量变化

Fig.4 Changes in dietary fiber content of quinoa seeds during the germination process

2.6 发芽藜麦GABA含量变化

GABA 是一种非蛋白氨基酸, 具有降血压、预防慢性疾病以及促进乙醇代谢等作用^[9]。如图 5 所示, 发芽促进了藜麦中 GABA 含量显著增加 ($P<0.05$)。发芽 32 h 时, 由未发芽藜麦中 GABA 含量 3.82 mg/100 g DW 增加到 7.36 mg/100 g DW, 增加近 2 倍。Cao 等^[9]研究发现, 不同品种藜麦在发芽期间 GABA 含量显著增加, 并在发芽 36 h 达到最大值。同时在荞麦^[28]、糙米^[29]等的发芽过程中也报道 GABA 显著增加。可能是因为谷物发芽使谷氨酸脱羧酶活力提高, 催化 L-Glu 脱羧生成 GABA, 或由于发芽期间蛋白质被蛋白酶水解生成 L-Glu, 即增加了 GABA 的合成底物, 使 GABA 含量增加^[8]。

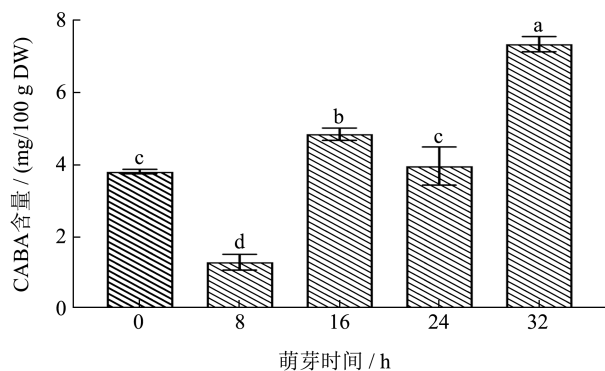


图 5 藜麦发芽过程中 GABA 含量变化

Fig.5 Changes in GABA content of quinoa of quinoa seeds during the germination process

2.7 发芽藜麦总多酚含量的变化

酚类物质是谷物中重要的生物活性成分, 也是影响抗氧化性能的主要物质。如图 6 所示, 发芽处理 16 h 内藜麦中总多酚含量无明显变化, 发芽 24 h 时显著增加 ($P<0.05$), 发芽至 32 h, 总多酚含量由未发芽时的 3.16 mg/g DW 增加到 5.43 mg/g DW, 增加了 41.81%。韩雅盟^[30]研究发现在红藜和黑藜这类深色藜麦中含有更多总多酚, 且认为藜麦发芽过程中总多酚含量的增加是由苯丙氨酸转氨酶和细胞壁过氧化氢酶等酶活性增加导致的。三种不同颜色藜麦的总多酚含量均随着发芽时间的延长而增加, 并且在这三种藜麦中总多酚含量为黑色藜麦>红色藜麦>白色藜麦^[30,31]。结果表明, 发芽处理使总多酚含量增加。

2.8 发芽藜麦植酸含量的变化

植酸是谷类、豆类中磷的主要存在形式, 能够与蛋白质、淀粉和矿物质结合, 改变这些物质的溶解度、消化和吸收等功能, 因此被视为一种抗营养因子^[32]。如图 7 所示, 随着发芽时间的延长, 从 2.02% 减少

到 1.02%, 减少了 49.50%, 植酸质量分数显著减少 ($P<0.05$)。Singh 等^[33]研究发现高粱在经过发芽处理后, 其植酸含量减少了 51.13%, 提高了矿物质的生物利用率。由于植酸是水溶性化合物, 在浸泡时易扩散到浸泡介质中; 且当种子开始发芽后, 植酸酶活性的增加, 从而导致植酸含量在发芽过程中减少^[34]。

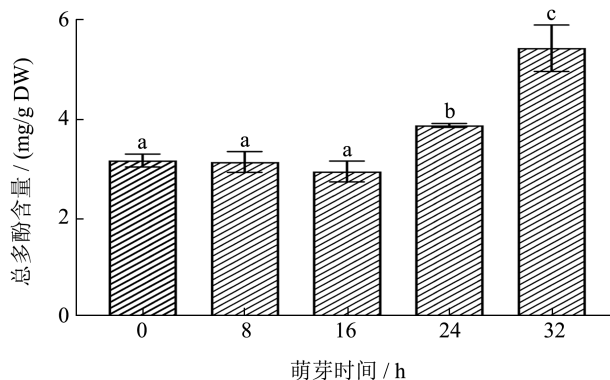


图 6 藜麦发芽过程中总多酚含量变化

Fig.6 The variation in the total polyphenol content during the germination process of quinoa

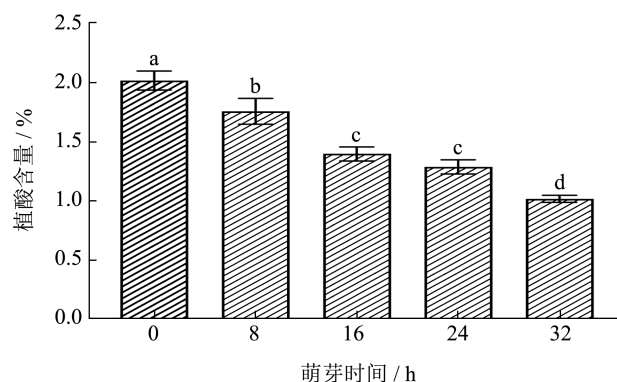


图 7 藜麦发芽过程中植酸含量的变化

Fig.7 The phytic acid content variation during the germination process of quinoa

3 结论

本研究分析了发芽处理后藜麦中营养价值和功能成分的影响。结果表明, 发芽后藜麦中淀粉、蛋白质和 AAN 含量降低, 但在发芽 16 h 后, 蛋白质和 AAN 又呈增加趋势。发芽至 32 h 的藜麦含有最低的淀粉含量以及 GL, 分别为 47.84% 和 13.08, 属于中 GL 食物。发芽后藜麦游离 EAA 含量高于未发芽藜麦, 且在发芽 32 h 达到最大值为 22.53 mg/100 g prot; 除限制性氨基酸 Met 和 Lys 外, 其余 EAA 的 AAS 均接近或高于 FAO 的推荐值, 同时 CS 均接近或超过鸡蛋蛋白。同时, EAAI 和 BV 评价显示, 发芽处理后藜麦蛋白的营养价值得到提升。伴随发芽过程, SDF 含量呈现先减少后增加的趋势, 且在发芽 16 h 含量最低, 仅为 1.95%;

GABA 和多酚含量增加并在发芽 32 h 达到最大值, 分别为 7.36 mg/100 g DW 和 5.43 mg/g DW; 植酸含量逐渐减小, 在发芽 32 h 含量最低。

参考文献

- [1] LAN Y, ZHANG W, LIU F, et al. Recent advances in physiochemical changes, nutritional value, bioactivities, and food applications of germinated quinoa: A comprehensive review [J]. Food Chem, 2023, 426: 136390.
- [2] JANSSEN F, PAULY A, ROMBOUTS I, et al. Proteins of Amaranth (*Amaranthus* spp.), Buckwheat (*Fagopyrum* spp.), and Quinoa (*Chenopodium* spp.): A Food Science and Technology Perspective [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2017, 16(1): 39-58.
- [3] NANDAN A, KOIRALA P, DUTT T A, et al. Nutritional and functional perspectives of pseudocereals [J]. Food Chem, 2024, 448: 139072.
- [4] 单迪.超声处理对发芽粟米及其酸奶制品生理活性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
- [5] AI L L, YI P Y, JUNG F H, et al. Effect of germination on composition profiling and antioxidant activity of the polysaccharide-protein conjugate in black soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] [J]. International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2018, 113: 601-606.
- [6] DARWISH A M G, AL-JUMAYI H A O, ELHENDY H A. Effect of germination on the nutritional profile of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds and its anti-anemic potential in Sprague-Dawley male albino rats [J]. Cereal Chem, 2020, 98(2): 315-327.
- [7] 陈若瑀,舒林,龙璐,等.不同萌芽阶段藜麦成分的比较及蛋白饮料开发[J].粮食加工,2021,46(1):54-59.
- [8] LAN Y, WANG X, WANG L, et al. Change of physiochemical characteristics, nutritional quality, and volatile compounds of *Chenopodium quinoa* Willd. during germination [J]. Food Chem, 2024, 445: 138693.
- [9] CAO B, BAO C, ZHU Z, et al. Comparative evaluation of chemical composition and nutritional characteristics in various quinoa sprout varieties: the superiority of 24-hour germination [J]. Foods, 2024, 13(16): 2513.
- [10] PILCO-QUESADA S, TIAN Y, YANG B, et al. Effects of germination and kilning on the phenolic compounds and nutritional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*) [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 94: 102996.
- [11] BHINDER S, KUMARI S, SINGH B, et al. Impact of germination on phenolic composition, antioxidant properties, antinutritional factors, mineral content and Maillard reaction products of malted quinoa flour [J]. Food Chem, 2021, 346: 128915.
- [12] PEDRO M A, Dario J P V, JUAN A R, et al. Effect of germination on the nutritional. properties, phytic acid content, and phytase activity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Foods, 2023, 12(2): 389.
- [13] 江蕾.糖尿病人中低GI值谷物代餐粉工艺优化及品质研究[D]. 武汉:武汉轻工大学,2023.
- [14] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(2): 33-50.
- [15] 郭亚鹏.三种藜麦多酚抗氧化活性及稳定性研究[D].郑州:河南工业大学,2021.
- [16] 甘镜君.普通小麦主要营养品质与籽粒形态特征研究[D].雅安:四川农业大学,2022.
- [17] HAO Y Q, HONG Y C, GUO H M, et al. Transcriptomic and metabolomic landscape of quinoa during seed germination [J]. BMC Plant Biol, 2022, 22(1): 237.
- [18] 赵明,张红香,颜宏,等.种子贮藏物质与萌发的关系[J].土壤与作物,2018,7(2):189-200.
- [19] 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,2022,38(8):156-162.
- [20] FABIOLA C, SALAZAR R, RUTH M E, et al. Evaluation of starch digestibility of Andean crops oriented to healthy diet recommendation [J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 1146-1155.
- [21] NAIKER T S, BAIJNATH H, AMONSOU E O, et al. The effect of soaking, steaming, and dehydration on the microstructure, physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of flour produced from *Lablab purpureus* (L.) Sweet (hyacinth bean) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(5): 14430.
- [22] SOLDAVINI J. Krause's Food & The Nutrition Care Process [J]. Journal of Nutrition Education and Behavior, 2019, 51(10): 1225.
- [23] LE L, GONG X, AN Q, et al. Quinoa sprouts as potential vegetable source: Nutrient composition and functional contents of different quinoa sprout varieties [J]. Food Chem, 2021, 357: 129752.
- [24] GUARDIANELLI L M, SALINAS M V, BRITES C, et al. Germination of white and red quinoa seeds: improvement of nutritional and functional quality of flours [J]. Foods, 2022, 11(20): 3272.
- [25] 韦世鹏.藜麦膳食纤维提取、表征及其吸附性能的研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [26] 杨积鹏.萌芽对藜麦化学成分及藜麦喷雾干燥粉特性的研究[D].天津:天津商业大学,2022.
- [27] SHARMA G K, SEMWAL A D, KHAN M A, et al. Effect of germination on nutritional, antinutritional and rheological characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa*) [J]. Defence Life Science Journal, 2018, 4(1): 55-60.
- [28] GUIYUN C, YUSHAN W, MINGYUE Z, et al. Cold atmospheric plasma treatment improves the gamma-aminobutyric acid content of buckwheat seeds providing a new anti-hypertensive functional ingredient [J]. Food Chem, 2022, 388: 133064.
- [29] TSOU S F, HSU H Y, CHEN S D. Effects of different pretreatments on the GABA content of germinated brown rice [J]. Applied Sciences, 2024, 14(13): 5771.
- [30] 韩雅盟.不同加工方式对藜麦酚类物质及其抗氧化活性的影响[D].太原:山西大学,2019.
- [31] BETSY S. R P, DAVID C Q, CARLOS A L S, et al. Effect of germination on the physicochemical properties, functional groups, content of bioactive compounds, and antioxidant capacity of different varieties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grown in the high andean zone of peru [J]. Foods, 2024, 13(3): 417.
- [32] EHSAN F, RAZIEH S M, ALALEH Z, et al. Review of the beneficial and anti-nutritional qualities of phytic acid, and procedures for removing it from food products [J]. Food Res Int, 2021, 143: 110284.
- [33] SINGH S, HABIB M, MONDAL D, et al. Effects of germination on the physicochemical, thermal, *in vitro* protein digestibility, Antinutrients, and antioxidant properties of sorghum flour [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(9): 6513-6521.
- [34] KHARE B, SANGWAN V, RANI V. Influence of sprouting on proximate composition, dietary fiber, nutrient availability, antinutrient, and antioxidant activity of flaxseed varieties [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): 15344.