

发芽和水热处理对苦荞活性成分及功能特性的影响

Effects of sprouting and hydrothermal treatment on active components and functional properties of tartary buckwheat

罗佳倩¹ 周丽玲¹ 李高阳^{2,3,4} 袁洪燕^{2,3,4} 谢秋涛^{2,3,4}

LUO Jia-qian¹ ZHOU Li-ling¹ LI Gao-yang^{2,3,4} YUAN Hong-yan^{2,3,4} XIE Qiu-tao^{2,3,4}

(1. 湖南大学研究生院隆平分院, 湖南长沙 410125; 2. 果蔬贮藏加工与质量安全湖南省重点实验室, 湖南长沙 410125; 3. 湖南省果蔬加工与质量安全国际科技创新合作基地, 湖南长沙 410125; 4. 湖南省农业科学院农产品加工研究所, 湖南长沙 410125)

(1. Longping Branch Graduate School, Hunan University, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory for Fruits and Vegetables Storage and Quality Safety, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Hunan Province International Joint Lab on Fruits & Vegetables Processing, Quality and Safety, Changsha, Hunan 410125, China; 4. Hunan Agricultural Products Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

摘要:目的:提高苦荞功效组分含量及其体外抗氧化能力与 α -淀粉酶抑制活性。方法:以苦荞为研究对象,考察发芽、发芽结合水热处理对苦荞中功效组分(总黄酮、总酚、芦丁、槲皮素)、抗性淀粉含量、抗氧化活性、 α -淀粉酶抑制率的影响,并通过主成分分析对样品品质进行综合评价。结果:发芽组中总黄酮、芦丁含量均在发芽6 d时达到最大值,分别为26.54, 13.88 mg/g,为未发芽组的1.22, 2.95倍;多酚含量在发芽2 d时达到最大值,为23.44 mg/g,较未发芽组增加了29.1%; α -淀粉酶抑制率在发芽4 d时达到最大值,为37.29%;槲皮素含量在发芽4 d时达到最大值,为7.65 mg/g;抗性淀粉含量在发芽1 d时达到最大值,为34.92%。发芽结合水热处理组中,发芽6 d沸水处理的总黄酮含量最高(31.89 mg/g),为未发芽组的1.47倍;发芽3 d沸水处理的总酚含量最高(31.26 mg/g),较未发芽组增加了72.2%;发芽4 d沸水处理的 α -淀粉酶抑制率最高(47.33%),较未发芽组增长了47.90%;发芽1 d沸水处理的芦丁含量最高(22.31 mg/g),为未发芽组的4.75倍;发芽4 d沸水处理的槲皮素含量最高(9.8 mg/g);发芽6,5,4,2 d沸水处理

的DPPH自由基清除率、ABTS自由基清除率、羟自由基清除率与铁离子还原能力最大,分别为62.72%, 65.18%, 33.36%, 13.44 mmol;发芽4 d沸水处理的抗性淀粉含量最大(46.73%)。主成分分析结果显示发芽4 d结合水热处理综合评分最高。结论:发芽后苦荞功效组分含量和功能效果均有所提高,且发芽结合水热处理较发芽组品质更佳。

关键词:发芽;水热处理;苦荞;功能成分

Abstract: **Objective:** To improve the content of effective components, in vitro antioxidant capacity and α -amylase inhibition rate of tartary buckwheat. **Methods:** Using Tartary buckwheat as raw material, the effects were studied, including the sprouting and sprouting combined with hydrothermal treatment on the effective components (total flavonoids, total phenols, rutin and quercetin), the antioxidant activity and hypoglycemia in tartary buckwheat. And the quality of the samples was comprehensively evaluated by principal component analysis. **Results:** The contents of flavonoids and rutin in germinated group reached the maximum at 6 days after germination, which were 26.54 mg/g and 13.88 mg/g, 1.22 and 2.95 times of those in non-germinated group, respectively. The content of polyphenols reached the maximum of 23.44 mg/g on the 2nd day after germination, which was 29.1% higher than that in the non-germinated group. The inhibition rate of α -amylase reached the maximum of 37.29% on the 4th day of germination. Quercetin content reached the maximum of 7.65 mg/g on the 4th

基金项目:湖南省现代农业产业技术体系—旱粮产业技术体系项目;湖南省重点研发计划项目(编号:2021NK2014)

作者简介:罗佳倩,女,湖南大学在读硕士研究生。

通信作者:李高阳(1971—),男,湖南大学研究员,博士。

E-mail:lgv7102@163.com

收稿日期:2022-10-17 **改回日期:**2023-03-08

day of germination. The content of resistant starch reached the maximum of 34.92% on the first day after germination. In the germinating combined with hydrothermal treatment group, the content of flavonoids reached the maximum of 31.89 mg/g on the 6th day, which was 1.47 times of that in ungerminated group. The content of polyphenols reached the maximum of 31.26 mg/g on the 3rd day, which was 72.2% higher than that in the non-germinated group. The inhibition rate of α -amylase reached the maximum of 47.33% on the 4th day, which increased by 47.90% compared with the non-germinated group. The content of rutin reached the maximum of 22.31 mg/g on the first day, which was 4.75 times of that in the non-germinated group. The content of quercetin reached the maximum of 9.8 mg/g on the 4th day combined with hydrothermal treatment. The scavenging rate of DPPH radical, ABTS radical, and hydroxyl radical and ferric reducing antioxidant power reached the maximum on the 6th, 5th, 4th and 2nd day combined with hydrothermal treatment, which were 62.72%, 65.18%, 33.36% and 13.44 mmol, respectively. The content of resistant starch in Tartary buckwheat reached the maximum of 46.73% after 4 days of germination combined with hydrothermal treatment. The results of principal component analysis showed that the integrated score was the highest on the 4th day of germination combined hydrothermal treatment. **Conclusion:** The effective components and functional effects of Tartary buckwheat are improved after germination, and the quality of germinating combined with hydrothermal treatment is better than that of germinating group. **Keywords:** germination; hydrothermal treatment; tartary buckwheat; functional components

苦荞,又称鞑靼荞麦,属双子叶蓼科荞麦属,是一种药食兼用的珍贵作物资源^[1]。近年来苦荞因其营养价值和保健功效表现出了良好的市场潜力。

研究表明,黄酮类化合物可以作为糖苷酶抑制剂^[2],多酚类物质可以通过与 α -1,4-糖苷键竞争 α -淀粉酶结合位点^[3],达到延缓淀粉消化引起的餐后血糖升高的作用。另外,抗性淀粉是一种低热量的食品功能成分,具有促进肠道健康、降低餐后血糖等保健作用^[4],其含量可以用于血糖调控能力的表征。

谷物可通过发芽产生一系列的生理生化反应,从而提高其营养品质和感官品质,且发芽处理具有低成本、低能耗、绿色环保等优点^[5]。发芽过程中,谷物中原有的淀粉酶、蛋白酶、植酸酶等开始活化,糖酵解等呼吸反应增强,蛋白质转录和翻译增强^[6],合成了酚类化合物,提高了可溶性膳食纤维等物质含量^[7]。董晓萌等^[8]研究表明萌芽处理能提高苦荞中总黄酮和 γ -氨基丁酸含量并能改善其感官品质。此外,研究发现水热处理能在一定程度上提高原料的营养及功能特性。Alkaltham等^[9]研究显示,水热处理显著提高了扁豆的抗氧化活性。Sheikh

等^[10]研究发现微波结合水热处理后的李子果仁中没食子酸、绿原酸、儿茶素等酚类化合物含量提高。目前,研究人员多采用非生物胁迫发芽改良苦荞原料的功能特性,并取得了不错的效果^[11],而采用发芽结合水热以改良苦荞原料的研究未见报道。研究拟采用发芽、发芽结合水热处理改良苦荞,研究苦荞中功能性物质,其抗氧化性能、 α -淀粉酶抑制效果和体外淀粉消化率的动态变化,以期苦荞原料开发提供一条新的思路。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

苦荞:晋荞麦(苦)2号,湖南湘西;

α -淀粉酶:酶活 $\geq 4\ 000$ U/g,上海瑞永生物科技有限公司;

淀粉葡萄糖苷酶:酶活 ≥ 100 U/mg,上海瑞永生物科技有限公司;

乙醇、盐酸、氢氧化钠、三氯化铝、可溶性淀粉、3,5-二硝基水杨酸、碳酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

没食子酸一水合物:纯度 $\geq 98.5\%$,上海麦克林生化科技公司;

DPPH:纯度 $\geq 97.0\%$,上海化成工业发展有限公司;

ABTS:纯度 $\geq 98.0\%$,上海瑞永生物科技有限公司;

芦丁标准品、槲皮素标准品:纯度 $\geq 98\%$,德斯特生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

全波长荧光扫描酶标仪:CLARIOstar型,德国BMG公司;

电热恒温水浴锅:HH.S21-Ni6型,北京三二八科学仪器有限公司;

精密分析天平:BSA124S型,广州市授科仪器科技有限公司;

恒温恒湿箱:LHS-250HC-11型,上海一恒科学仪器有限公司;

高速离心机:Avanti J-26xp型,美国Beckman公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 根据文献^[12]修改如下:苦荞种子清洗后,用1%的次氯酸钠溶液浸泡消毒15 min,洗净后常温浸泡4 h。随后,均匀铺于发芽盘上,下层盛水,于25℃恒温箱中黑暗条件培养,每天换水一次并于同一时间采收。将同一发芽天数的苦荞样品分成两份,取一份于沸水中加热1 min,捞出冷却至室温(发芽结合水热组),另一份不做处理(发芽组),分别于40℃下恒温干燥4 h,全果粉碎后过40目筛收集于封口袋中,-80℃条件下贮藏。未发芽组清洗后,在相同条件下恒温干燥、粉碎过筛,-80℃条件下贮藏。

1.3.2 提取液制备 根据文献^[13-14]修改如下:称取

0.2 g 试样,加入 10 mL 70% 的甲醇溶液,超声提取 40 min。4 000 r/min 离心 15 min,收集上清液,沉淀加 10 mL 70% 的甲醇溶液混匀,重复上述步骤,合并 3 次提取液于 50 mL 棕色容量瓶中,用 70% 的甲醇溶液定容,于 4 ℃ 下保存 48 h。

1.3.3 总黄酮测定 根据文献[13]。

1.3.4 总酚测定 根据文献[15]修改如下:将 0.5 mL 提取液与 0.5 mL 福林酚试剂充分混合,加入 1.5 mL 7.5% Na₂CO₃ 溶液,加水定容至刻度,摇匀,避光反应 2 h,于 765 nm 下测定其吸光度值。结果以没食子酸当量进行换算,按式(1)计算待测液中总酚含量。

$$X = \frac{C \times V}{W}, \quad (1)$$

式中:

X——总酚含量,mg/g;

W——样品质量,g;

C——标准曲线方程计算出的总酚质量浓度,mg/mL;

V——反应体系总体积,mL。

1.3.5 芦丁、槲皮素含量测定 根据文献[16]修改如下:将提取液过 0.22 μm 的微孔滤膜,冷藏备用;柱温 30 ℃,进样量 20 μL,流速 1 mL/min,于 254 nm 下测定;流动梯度如表 1 所示。

表 1 流动相梯度

Table 1 The mobile phase gradient

时间/min	A 相(乙腈)/%	B 相(3%冰乙酸水溶液)/%
0	20	80
15	40	60
16	90	10
22	90	10

1.3.6 抗氧化能力测定

(1) DPPH 自由基清除率:根据文献[11]修改如下:将提取液稀释 20 倍,取 2 mL 样品稀释液与 2 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液混匀,室温避光反应 30 min,于 517 nm 处测吸光度 A₁;用 70% 的甲醇溶液代替样品稀释液,按照相同方法测定吸光度 A₀;用 2 mL 70% 的甲醇溶液代替 DPPH,按照相同方法测定吸光度 A₂。

$$E = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

E——自由基清除率,%;

A₀——70% 甲醇溶液与试剂溶液的吸光值;

A₁——样品溶液与试剂溶液的吸光值;

A₂——70% 甲醇溶液与样品溶液吸光值。

(2) ABTS 自由基清除率:根据文献[17]修改如下:

将提取液稀释 20 倍,取 2 mL 稀释液加入 4 mL ABTS 储备液,混匀,室温避光反应 10 min,于 734 nm 处测定吸光度 A₁;用 70% 的甲醇溶液代替 ABTS 储备液,按相同方法测定吸光度 A₂;用 70% 的甲醇溶液代替样品稀释液,按照相同方法测定吸光度 A₀。按式(2)计算 ABTS 自由基清除率。

(3) 羟自由基清除能力:根据文献[18]修改如下:在 10 mL 比色管中加入 3 mL 样液,加入 1.5 mL 70% 甲醇混匀,分别加入 9 mmol/L 的水杨酸—乙醇溶液 2 mL、9 mmol/L 硫酸亚铁溶液 2 mL、8.8 mmol/L 的过氧化氢溶液 2 mL,混匀后于 37 ℃ 下避光反应 30 min,510 nm 下测定吸光度 A_j;用去离子水替代过氧化氢溶液,按照相同方法测定吸光度 A_i;空白组将样液换成 3 mL 去离子水,相同条件下测定吸光度 A₀。按式(3)计算羟自由基清除率。

$$F = \left(1 - \frac{A_j - A_i}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

F——羟自由基清除能力,%;

A₀——去离子水与试剂溶液的吸光值;

A_j——样品溶液与试剂溶液的吸光值;

A_i——去离子水代替过氧化氢与其他试剂溶液吸光值。

(4) 铁离子还原能力:根据文献[19]修改如下:用 2.5 mL TPTZ 溶液(10 mmol/L TPTZ 在 40 mmol/L HCl 中)、2.5 mL FeCl₃ · 6H₂O 溶液(20 mmol/L)和 25 mL 醋酸缓冲液(300 mmol/L, pH 3.6)配制新鲜的 FRAP 试剂。将试剂加热至 37 ℃,加入 2 mL FRAP 试剂于比色皿中,测量初始吸光度。将 100 μL 样液或 FeSO₄ 标准液(0~1 mmol/L)加入比色皿中,反应 60 min 后于 593 nm 下测定吸光度。结果以 100 g 样品相当于 FeSO₄ 的 mmol 量表示。

1.3.7 α-淀粉酶抑制率 根据文献[20]。

1.3.8 淀粉组分含量测定 根据文献[21]修改如下:取 500 mg 苦荞粉于三角瓶中,加入 20 mL 的乙酸钠缓冲液(0.2 mol/L、pH 5.2),沸水浴中平衡 30 min,冷却至室温后于 37 ℃ 下平衡 5 min,加入 10 mL α-淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶混合物,分别在 0, 20, 120 min 时取样 0.5 mL,加入 4.5 mL 无水乙醇灭酶,4 000 r/min 离心 15 min,吸取上清液 300 μL 与 600 μL DNS 溶液混匀,沸水浴 10 min 后冷却,纯水定容至 10 mL,加塞摇匀,于 540 nm 测定葡萄糖含量。分别按(4)~(6)计算快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉含量。

$$R = \frac{G_{20} - F}{T} \times 0.9 \times 100, \quad (4)$$

$$D = \frac{G_{120} - G_{20}}{T} \times 0.9 \times 100, \quad (5)$$

$$S = \frac{G-F}{T} \times 0.9 \times 100 - (R+D), \quad (6)$$

式中:

R——快消淀粉含量,%;

D——慢消淀粉含量,%;

S——抗性淀粉含量,%;

F——酶水解前样品中葡萄糖总量,mg;

G₂₀——水解 20 min 时体系中葡萄糖总量,mg;

G₁₂₀——水解 120 min 时体系中葡萄糖总量,mg;

G——样品中总葡萄糖含量,mg;

T——总淀粉含量,mg。

1.3.9 数据处理 数据统计分析采用 SPSS Statistic 22 软件,所有结果均用平均值±标准差表示,使用 SPSS Statistics 23 进行数据分析, $P < 0.05$ 表示差异显著,数据绘图采用 Origin 2019。相关性分析采用 Pearson's 法。

2 结果与分析

2.1 对苦荞中活性成分的影响

2.1.1 总黄酮、总酚含量 由图 1(a)可知,发芽处理组中,苦荞总黄酮含量随发芽时间的增加呈逐步升高的趋势,发芽 6 d 的总黄酮含量最高,为 26.54 mg/g。发芽 0~1 d 时总黄酮含量显著降低($P < 0.05$),黄金等^[22]与 Molinari 等^[23]的研究结果中也呈现出相同的趋势,可能是发芽前处理的浸泡过程中黄酮类物质溶出。水热处理组中苦荞总黄酮含量随发芽时间的增加呈先上升后稳定的趋势,发芽 3~4 d 结合水热处理的总黄酮含量显著升高($P < 0.05$),由 26.60 mg/g 增长至 31.89 mg/g。此外,同一发芽天数下,发芽结合水热处理组总黄酮含量较发芽处理组显著增加($P < 0.05$)。Jin 等^[24]和 Liu 等^[25]研究显示煮沸处理有助于提高苦荞中总黄酮含量。

由图 1(b)可知,发芽处理组中总酚含量随发芽时间

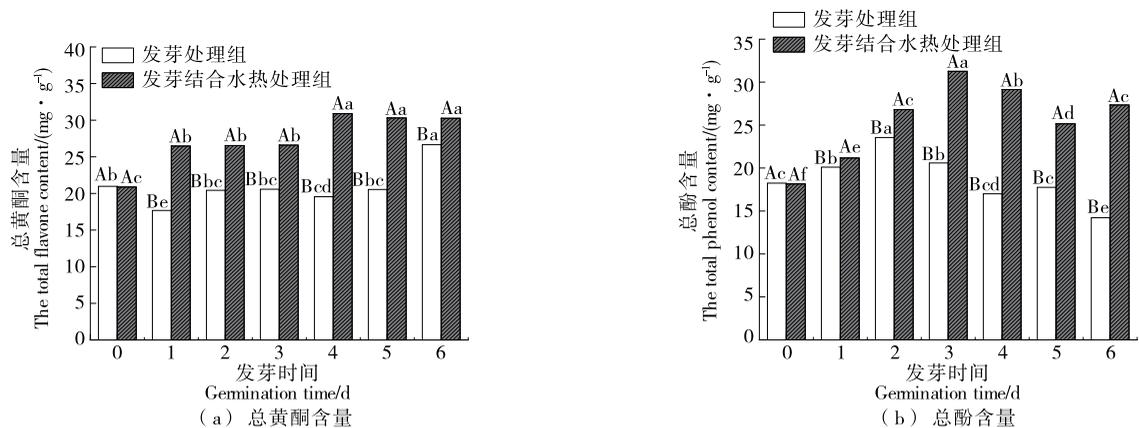
的增加呈先上升后下降的趋势,发芽 2 d 的总酚含量最高,为 23.44 mg/g,较未发芽组增加了 29.1%。Cáceres 等^[26]研究显示糙米发芽后总酚含量显著增加。发芽 3 d 结合水热处理的总酚含量最高,为 31.26 mg/g,较未发芽组增加了 72.2%,较发芽 2 d 增长了 33.4%。此外,同一发芽天数下,发芽结合水热处理组多酚含量均显著高于发芽处理组,Jin 等^[24]和 Liu 等^[25]的研究结果也显示沸水浸泡有助于提高苦荞中总酚含量。

2.1.2 芦丁、槲皮素含量 由表 2 可知,随着苦荞发芽时间的延长,发芽组中芦丁含量呈先减少后增加的趋势,发芽 3 d 时达到最小值,为 2.22 mg/g。而苦荞中槲皮素含量呈相反的趋势,发芽 3 d 和发芽 4 d 时分别达到 7.08, 7.65 mg/g,可能由于发芽过程中芦丁降解酶活化,促进了芦丁向槲皮素的转化。且同一发芽天数下,发芽结合水热处理组芦丁含量显著高于发芽组,Wu 等^[27]研究显示过热蒸汽处理 60 s 后苦荞中芦丁含量显著增加,Jin 等^[24]研究结果显示沸水、蒸煮等水热处理方式均显著提高了苦荞中芦丁含量,可能与水热处理促进了芦丁从麸皮到面粉中的迁移有关^[28]。研究中发芽 1 d 结合水热处理的芦丁含量最高,发芽 4 d 结合水热处理的槲皮素含量最高,分别为未发芽组的 4.75, 1.75 倍。因此,发芽结合水热处理有效提高了苦荞中芦丁含量及芦丁、槲皮素总含量。

2.2 对苦荞抗氧化性的影响

由图 2(a)可知,发芽处理组中,DPPH 自由基清除率随发芽时间的延长呈先增加再降低的趋势,在发芽第 4 天达到最大值,为 48.55%。发芽结合水热处理组中,DPPH 自由基清除率随发芽时间的延长呈逐步上升的趋势,发芽 6 d 结合水热处理的 DPPH 自由基清除率达到 62.72%,为未发芽组的 1.45 倍、发芽第 4 天的 1.29 倍。

由图 2(b)可知,发芽 1~3 d 苦荞 ABTS 自由基清除



小写字母不同表示同一处理方式、不同发芽天数下平均值之间存在显著差异($P < 0.05$);大写字母不同表示同一发芽天数、不同处理方式下平均值之间存在显著差异($P < 0.05$)

图 1 不同处理条件下苦荞中总黄酮及总酚含量的变化

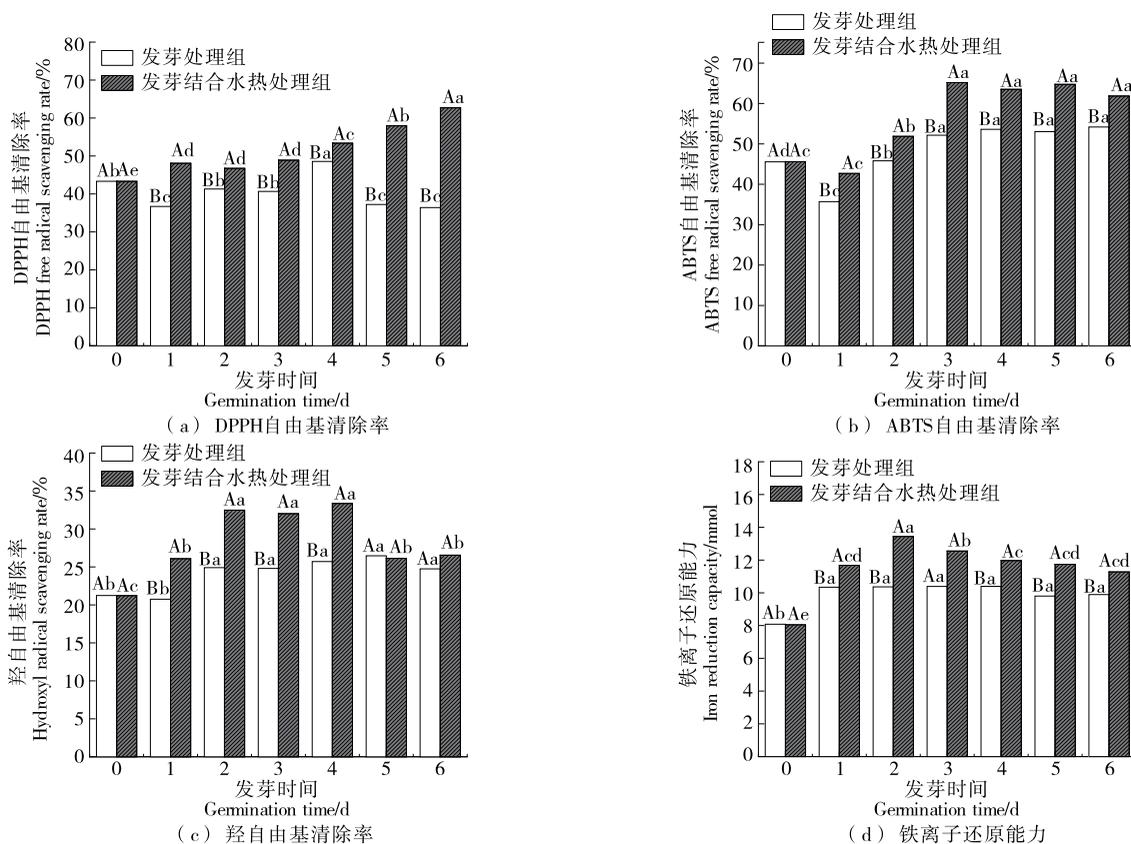
Figure 1 Effects of different treatment on the content of flavonoids and phenols of tartary buckwheat

表 2 处理方式对苦荞中芦丁及槲皮素含量的影响[†]

Table 2 Effects of different treatments on the contents of rutin and quercetin of tartary buckwheat

发芽时间/d	芦丁/(mg·g ⁻¹)		槲皮素/(mg·g ⁻¹)	
	发芽处理	发芽结合水热处理	发芽处理	发芽结合水热处理
0	4.69±0.21 ^{Ad}	4.69±0.21 ^{Ae}	5.62±0.09 ^{Ac}	5.62±0.09 ^{Ac}
1	6.32±0.37 ^{Bc}	22.31±0.08 ^{Aa}	6.18±0.08 ^{Abc}	2.67±0.17 ^{Be}
2	4.99±0.84 ^{Bd}	20.30±0.02 ^{Ab}	6.27±0.11 ^{Bbc}	7.57±0.19 ^{Ab}
3	2.22±0.26 ^{Be}	19.74±0.29 ^{Ab}	7.08±0.61 ^{Bab}	9.83±0.04 ^{Aa}
4	4.56±0.10 ^{Bd}	17.20±0.05 ^{Ac}	7.65±0.10 ^{Ba}	9.85±0.04 ^{Aa}
5	7.74±0.52 ^{Bb}	14.52±0.16 ^{Ad}	5.27±0.05 ^{Ac}	5.74±0.21 ^{Ac}
6	13.88±0.54 ^{Aa}	14.14±0.34 ^{Ad}	4.32±0.52 ^{Ad}	4.39±0.67 ^{Ad}

[†] 小写字母不同表示同一处理方式、不同发芽天数下平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$)；大写字母不同表示同一发芽天数、不同处理方式下平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。



小写字母不同表示同一处理方式、不同发芽天数下平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$)；大写字母不同表示同一发芽天数、不同处理方式下平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

图 2 处理方式对苦荞抗氧化能力的影响

Figure 2 Effects of different treatment on the antioxidant capacity of tartary buckwheat

率显著上升,在第 3 天后基本趋于平稳。发芽结合水热处理中 ABTS 自由基清除率随发芽时间的延长先增加后趋于稳定,其中发芽 5 d 结合水热处理的 ABTS 自由基清除率最高,为 65.18%,是未发芽组的 1.42 倍。Zhong 等^[29] 研究显示煮沸处理能显著提高球芽甘蓝的 ABTS 自由基清除率。

如图 2(c)所示,发芽处理组中,羟自由基清除率随发芽时间的延长先增加后趋于稳定。发芽 1~2 d 羟自由基清除率显著上升,随后基本稳定在 24.73%~26.45%。发芽结合水热处理组羟自由基清除率在 1~2 d 显著增加,在 2~4 d 趋于平稳,发芽 4 d 时达到最大值,为 33.36%,较未发芽组增加了 60%。

由图 2(d)可知,发芽处理组中,发芽 0~1 d 时样品铁离子还原能力显著增加,随后基本趋于稳定。发芽结合水热处理组,随发芽时间的延长铁离子还原能力先增强后减弱,其中发芽 2 d 结合水热处理的铁离子还原能力最强,为 13.44 mmol,是未发芽的 1.67 倍。

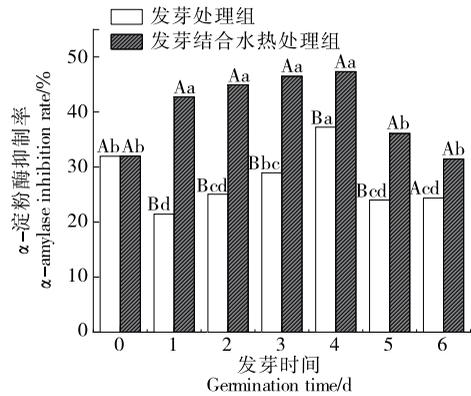
苦荞发芽结合水热处理后,由于总黄酮、总酚等抗氧化物质的积累,DPPH 自由基、ABTS 自由基、羟自由基和铁离子还原能力,较未发芽和仅发芽组效果更佳。Jin 等^[24]和 Liu 等^[25]研究显示煮沸处理显著提高了苦荞清除 DPPH 自由基与 ABTS 自由基的能力。因此,发芽结合水热处理能有效提高苦荞的体外抗氧化能力。

2.3 对 α -淀粉酶抑制率的影响

由图 3 可知,苦荞发芽过程中, α -淀粉酶抑制率呈先上升后下降的趋势。发芽 0~1 d, α -淀粉酶抑制率显著下降,推测与发芽前浸泡导致功能性物质部分溶出有关^[23]。发芽 1~4 d, α -淀粉酶抑制率显著升高,由 21.47% 上升至 37.29%,提高了 73.7%。发芽结合水热处理组,发芽 0~1 d 时沸水处理的 α -淀粉酶抑制率显著升高,上升至 42.75%,较发芽前增加了 33.59%;发芽 1~4 d 时沸水处理的 α -淀粉酶抑制率缓慢升高,其中发芽第 4 天沸水处理的最高,为 47.33%。此外,发芽结合水热处理组 α -淀粉酶抑制率均显著高于发芽组。不同样品 α -淀粉酶抑制率的差异可能与样品中芦丁、槲皮素的动态变化有关,研究^[2]发现苦荞中的芦丁和槲皮素可以通过疏水相互作用和氢键与 α -淀粉酶结合形成复合物,从而进行竞争性抑制。因此,摄入发芽 1~4 d 结合水热处理的苦荞样品能较好地延缓膳食中碳水化合物的吸收,具有被开发为辅助降血糖产品的潜力。

2.4 对苦荞淀粉组分含量的影响

由表 3 可知,快消化淀粉含量随发芽时间的延长呈先上升再下降的趋势,发芽 3 d 时达到最大值,较未发芽组显著升高了 17.59% ($P < 0.05$),可能由于发芽前期总淀粉酶活力提高,淀粉被水解形成孔洞^[30],导致快消淀粉



小写字母不同表示同一处理方式、不同发芽天数下平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$);大写字母不同表示同一发芽天数、不同处理方式下平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

图 3 处理方式对苦荞 α -淀粉酶抑制率的影响

Figure 3 Effects of different treatment on the α -amylase inhibition rate of tartary buckwheat

含量增加。发芽 1~6 d 结合水热处理的快消淀粉含量较未发芽组、发芽组有所下降,其中发芽 4 d 结合水热处理的快消淀粉含量最低。抗性淀粉的变化趋势与快消淀粉相反,发芽组中抗性淀粉含量于第 3 天达到最小值。发芽结合水热处理组中抗性淀粉含量随发芽时间的延长先增加再减少,发芽 4 d 沸水处理的抗性淀粉含量最高,较发芽前提高了 43.98%。发芽 2~5 d 时,发芽结合水热处理的抗性淀粉含量显著高于仅发芽组的 ($P < 0.05$),吴晓江等^[31]研究结果显示过热蒸汽处理后,苦荞粉中快速消化淀粉含量显著降低 ($P < 0.05$),而抗性淀粉含量显著增加 ($P < 0.05$)。这可能由于发芽结合水热处理促进了淀粉分子重排,并与槲皮素形成复合物,从而显著提高了苦荞中抗性淀粉含量^[32]。此外,Oh 等^[28]研究显示水热处理并常温冷却后淀粉的膨胀能力显著降低,从而延缓了淀粉的糊化。因此,发芽结合水热处理能有效提高苦荞中抗性淀粉含量,从而抑制餐后血糖的上升。

表 3 处理方式对苦荞淀粉组分含量的影响[†]

Table 3 Effects of different treatments on the content of starch components in tartary buckwheat

发芽时间/d	快消淀粉/%		慢消淀粉/%		抗性淀粉/%	
	发芽处理	发芽结合水热处理	发芽处理	发芽结合水热处理	发芽处理	发芽结合水热处理
0	62.54 ± 0.87 ^{Ab}	62.54 ± 0.87 ^{Ab}	3.55 ± 0.51 ^{Acd}	3.55 ± 0.51 ^{Ae}	32.46 ± 1.66 ^{Ab}	32.46 ± 1.66 ^{Ad}
1	61.10 ± 1.11 ^{Ab}	51.65 ± 0.98 ^{Be}	4.50 ± 0.30 ^{Bcd}	15.01 ± 1.90 ^{Ab}	34.92 ± 0.77 ^{Aa}	33.06 ± 1.16 ^{Ad}
2	60.82 ± 1.30 ^{Ab}	56.59 ± 0.83 ^{Acd}	2.51 ± 1.01 ^{Bd}	9.95 ± 1.146 ^{Ac}	33.84 ± 0.30 ^{Ba}	36.69 ± 0.00 ^{Ac}
3	75.89 ± 1.12 ^{Aa}	53.15 ± 0.26 ^{Be}	12.57 ± 0.43 ^{Aa}	12.21 ± 0.87 ^{Abc}	13.02 ± 1.87 ^{Be}	41.08 ± 1.28 ^{Ab}
4	71.34 ± 0.96 ^{Aa}	44.58 ± 1.31 ^{Bf}	8.89 ± 1.57 ^{Ab}	8.68 ± 0.50 ^{Acd}	22.13 ± 1.51 ^{Bd}	46.73 ± 1.41 ^{Aa}
5	62.98 ± 1.41 ^{Ab}	54.50 ± 1.87 ^{Bde}	13.31 ± 1.02 ^{Aa}	5.72 ± 1.21 ^{Be}	24.73 ± 1.26 ^{Bc}	40.56 ± 0.48 ^{Ab}
6	62.34 ± 0.36 ^{Ab}	59.54 ± 1.50 ^{Abe}	6.19 ± 1.05 ^{Bbc}	16.71 ± 1.12 ^{Aa}	33.02 ± 0.79 ^{Aa}	26.40 ± 1.36 ^{Bef}

[†] 每一列小写字母不同表示同一处理方式、不同发芽时间条件下平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$);同一指标中大写字母不同表示同一发芽时间、不同处理方式下平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.5 相关性分析

由表 4 可知,总黄酮含量与总酚含量、DPPH 自由基(DPPH·)清除率、ABTS 自由基(ABTS·)清除率、羟自由基(·OH)清除率、铁离子还原能力、 α -淀粉酶抑制率、抗性淀粉含量以及芦丁含量呈极显著正相关,与快消淀粉含量呈极显著负相关。Zhong 等^[29] 研究显示总黄酮含量与 DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率有较好

的相关性。总酚含量与抗氧化能力、 α -淀粉酶抑制率、抗性淀粉含量、芦丁含量、槲皮素含量均呈极显著正相关,与快消淀粉含量呈极显著负相关。 α -淀粉酶抑制率与总黄酮含量、总酚含量、体外抗氧化能力、抗性淀粉含量、芦丁含量、槲皮素含量均呈极显著正相关,与快消淀粉含量呈极显著负相关。此外,抗性淀粉含量与快消淀粉含量呈极显著负相关。

表 4 苦荞活性成分及其功能特性相关性系数矩阵[†]

Table 4 Correlation coefficient matrix of active components and functional properties of tartary buckwheat

指标	总黄酮	总酚	DPPH·	ABTS·	·OH	铁离子	α -淀粉酶	抗性淀粉	快消淀粉	慢消淀粉	芦丁	槲皮素
总黄酮	1.000											
总酚	0.875**	1.000										
DPPH·	0.777**	0.639**	1.000									
ABTS·	0.503**	0.537**	0.623**	1.000								
·OH	0.542**	0.704**	0.376*	0.593**	1.000							
铁离子	0.667**	0.747**	0.492**	0.429**	0.760**	1.000						
α -淀粉酶	0.620**	0.605**	0.494**	0.435**	0.727**	0.668**	1.000					
抗性淀粉	0.555**	0.540**	0.256	0.236	0.417**	0.417**	0.461**	1.000				
快消淀粉	-0.744**	-0.676**	-0.442**	-0.312	-0.519**	-0.555**	-0.552**	-0.855**	1.000			
慢消淀粉	0.216	0.251	0.348*	0.317*	0.383*	0.377*	0.248	-0.314	-0.079	1.000		
芦丁	0.584**	0.563**	0.452**	0.373*	0.651**	0.759**	0.676**	0.620**	-0.777**	0.389*	1.000	
槲皮素	0.316	0.516**	0.106	0.423**	0.562**	0.352*	0.495**	0.288	-0.115	-0.131	-0.017	1.000

† 相关性为 Pearson 类型; * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

2.6 主成分分析

由于各指标间存在较强的相关性,为更好地评价不同指标对苦荞品质的贡献,同时明确不同处理条件下苦荞品质差异,采用主成分分析并进行综合评价。通过 KMO 检验和 Bartlett's 球状检验对所得数据进行适应性检验,得知 KMO 为 0.720,大于 0.5, Sig 值小于 0.05,证明 12 项检测指标进行主成分分析能得到较理想的结果。

由表 5 可知,主成分 1、2、3 的方差贡献率分别为 56.369%, 13.262%, 9.489%, 累计可以解释 79.120% 的变量信息。主成分载荷矩阵可以表示变量对响应主成分的影响程度。由表 6 可知,对第一主成分产生正向影响的为总黄酮含量、总酚含量、DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率、羟自由基清除率、铁离子还原能力、 α -淀粉酶抑制率、抗性淀粉含量及芦丁含量,这些指标均具有较高的载荷权数,产生负向影响的为快消淀粉含量。第二主成分主要反映慢消淀粉和快消淀粉含量,产生负向影响的主要为抗性淀粉含量。第三主成分主要反映槲皮素含量,与总黄酮含量、DPPH 自由基清除率、铁离子还原能力、抗性淀粉含量、慢消淀粉含量以及芦丁含量呈负相关。3 个主成分的得分记为 F_1 、 F_2 、 F_3 , 以 3 个主成分相应的贡献率大小作为权重数,建立主成分综合评价模型:

$$F_{\text{综}} = 0.564 \times F_1 + 0.133 \times F_2 + 0.095 \times F_3 \quad (7)$$

表 5 主成分特征值及累计贡献率

Table 5 Principal component eigenvalue and cumulative contribution rate

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	6.764	56.369	56.369
2	1.591	13.262	69.631
3	1.139	9.489	79.120

表 6 主成分载荷矩阵

Table 6 Principal component load matrix

指标	成分		
	1	2	3
黄酮含量	0.850	-0.096	-0.173
多酚含量	0.899	-0.058	0.152
DPPH 自由基清除率	0.711	0.175	-0.197
ABTS 自由基清除率	0.688	0.314	0.088
OH 自由基清除率	0.837	0.194	0.236
铁离子还原能力	0.844	0.155	-0.018
淀粉酶抑制率	0.842	0.122	0.129
抗性淀粉含量	0.656	-0.710	-0.060
快消淀粉含量	-0.798	0.457	0.248
慢消淀粉含量	0.323	0.810	-0.310
芦丁含量	0.819	-0.054	-0.372
槲皮素含量	0.540	0.019	0.816

由表7可知,发芽4 d结合水热处理的样品总黄酮、总酚、芦丁、ABTS 自由基清除率、羟自由基清除率、 α -淀粉酶抑制率、抗性淀粉含量均相对较高,故综合评分最

高,为53.72,品质最优。其次为发芽3 d和发芽2 d结合水热处理的,综合评分分别为52.59,47.46,品质较好,且耗时较少。

表7 发芽及水热处理苦荞样品的综合评分及排序

Table 7 Comprehensive score and ranking of tartary buckwheat samples in germination and hydrothermal treatment

处理方式	$F_{\text{综}}$	排序	处理方式	$F_{\text{综}}$	排序
未发芽	32.63	10	发芽1 d结合水热处理	43.70	6
发芽1 d	28.83	13	发芽2 d结合水热处理	47.46	3
发芽2 d	33.81	8	发芽3 d结合水热处理	52.59	2
发芽3 d	31.01	12	发芽4 d结合水热处理	53.72	1
发芽4 d	35.92	7	发芽5 d结合水热处理	46.91	4
发芽5 d	33.74	9	发芽6 d结合水热处理	46.36	5
发芽6 d	32.27	11			

3 结论

采用发芽和发芽结合水热处理对苦荞进行加工,苦荞中活性物质总体增加,功能特性有所提升,且发芽结合水热处理较未发芽及发芽处理具有较好的抗氧化能力和 α -淀粉酶抑制效果。其中,发芽4 d结合水热处理组综合评分达到最大值,为53.72。该处理条件下苦荞总黄酮、总酚、芦丁、槲皮素等功能性物质含量相对丰富,体外抗氧化能力、 α -淀粉酶抑制效果较好,具有被开发为辅助降血糖功能性产品的潜力。但人体血糖调控机制复杂,采用体外结合体内试验可以得到更综合、系统的功能性评价,因此,今后可继续进行发芽结合水热处理体内降血糖功效的研究。

参考文献

[1] 孙坤坤, 卢奕霏, 侯泽豪, 等. 苦荞芽菜游离酚、结合酚及抗氧化活性研究[J]. 西北农业学报, 2020, 29(7): 1 035-1 044.
SUN K K, LU Y F, HOU Z H, et al. Free and bound phenol compounds and antioxidant activity in tartary buckwheat sprouts[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(7): 1 035-1 044.

[2] 周一鸣, 马思佳, 蒋晴怡, 等. 苦荞中芦丁和槲皮素对淀粉消化酶的抑制能力[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 30-37.
ZHOU Y M, MA S J, JIANG Q Y, et al. Inhibition of starch digestive enzymes by rutin and quercetin in Tartary buckwheat[J]. Food Science: 2022, 43(18): 30-37.

[3] JI F Z, CAI X L, GUI D W, et al. α -Amylase inhibition of a certain dietary polyphenol is predominantly affected by the concentration of α -1, 4-glucosidic bonds in starchy and artificial substrates[J]. Food Research International, 2022, 157: 11210.

[4] CHENG Z H, LI J N, QIAO D L, et al. Microwave reheating enriches resistant starch in cold-chain cooked rice: A view of

structural alterations during digestion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 208: 80-87.

[5] 邢宝. 发芽处理对藜麦淀粉结构和理化性质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021: 5-6.
XING B. Effect of germination treatment on the structural and physico chemical properties of quinoa starch[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021: 5-6.

[6] 高琨, 谭斌, 汪丽萍, 等. 萌芽全谷物的研究现状、问题与机遇[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 71-80.
GAO K, TAN B, WANG L P, et al. The research status, problems and opportunities of sprouted whole grain [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 71-80.

[7] 高芬, 王宇婷, 石磊. 荞麦发芽过程中植酸含量变化的研究[J]. 农产品加工, 2019, 7(13): 59-61, 66.
GAO F, WANG Y T, SHI L. Study on the change of phytic acid content in buckwheat germination process [J]. Farm Products Processing, 2019, 7(13): 59-61, 66.

[8] 童晓萌, 柴春祥, 王永强. 萌发对苦荞籽粒品质的影响及工艺优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 176-183.
TONG X M, CHAI C X, WANG Y Q. Effect of germination on grain quality of Tartary buckwheat and optimization of technology [J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 176-183.

[9] ALKALTHAM M S, OZCAN MM, USLU N, et al. Changes in antioxidant activity, phenolic compounds, fatty acids, and mineral contents of raw, germinated, and boiled lentil seeds[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(4): 1 639-1 649.

[10] SHEIKH M A, SAINI C S. Combined effect of microwave and hydrothermal treatment on anti-nutritional factors, antioxidant potential and bioactive compounds of plum (*Prunus domestica* L.) kernels[J]. Food Bioscience, 2022, 46: 101467.

[11] 张晓婷, 王满生, 邱浩楠, 等. 青叶苎麻叶多酚超声辅助提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(12): 152-158.

- ZHANG X T, WANG M S, QIU H N, et al. Research on the optimization of ultrasonic assisted extraction technology and antioxidant activity of polyphenols extracted from green leaves ramie[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(12): 152-158.
- [12] ZI X B, JIAN F W, HUI M, et al. Effect of microwave radiation on antioxidant capacities of Tartary buckwheat sprouts[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(10): 3 913-3 919.
- [13] 龙晓珊, 胡腾根, 邹宇晓, 等. 发酵和加工对桑椹抗氧化和降血糖作用的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 116-123.
- LONG X S, HU T G, ZOU Y X, et al. Effect of fermentation and processing on antioxidant and hypoglycemic activity of mulberry fruit[J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 116-123.
- [14] 李忍, 吴娜娜, 李志江, 等. 发芽结合其他加工方式对全谷物的营养品质及感官特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(11): 187-193, 202.
- LI R, WU NN, LI Z J, et al. Effect of germination combined with other processing methods on nutritional quality and sensory characteristics of whole grains[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2020, 35(11): 187-193, 202.
- [15] 孙强, 王丽艳, 荆瑞勇, 等. 不同品种亚麻籽 8 种生物活性物质含量及其主成分分析[J]. *食品与机械*, 2022, 38(9): 40-45, 145.
- SUN Q, WANG L Y, JIN R Y, et al. Determination and principal component analysis of 8 kinds of bioactive substances in different flaxseed varieties[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(9): 40-45, 145.
- [16] LI B C, LI Y Q, HU Q B. Antioxidant activity of flavonoids from tartary buckwheat bran [J]. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2016, 98(3/4): 429-438.
- [17] 宋盼盼. 苦荞粉不同熟化工艺比较及系列营养糊产品开发[D]. 成都: 成都大学, 2021: 27-28.
- SONG P P. Comparison of different curing processes of tartary buckwheat powder and development of series nutritional paste products[D]. Chengdu: Chengdu University, 2021: 27-28.
- [18] XU Q L, WANG L, LI W X, et al. Scented tartary buckwheat tea: Aroma components and antioxidant activity[J]. *Molecules*, 2019, 24(23): 4 368.
- [19] REN Q, LIU W, ZHAO M, et al. Changes in α -glucosidase inhibition, antioxidant, and phytochemical profiles during the growth of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn) [J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 2 689-2 699.
- [20] 刘思含. 紫薯降血糖发酵液的工艺优化及其品质变化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020: 15-16.
- LIU S H. Study on the technology optimization and quality change of purple sweet potato hypoglycemic fermentation broth [D]. Changsha: Hunan University, 2020: 15-16.
- [21] 李云龙, 董桂梅, 董吉林, 等. 不同糊化度苦荞粉理化性质和体外消化性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(3): 21-27.
- LI Y L, DONG G M, DONG J L, et al. Physicochemical properties and in vitro digestibility of tartary buckwheat flour with different degrees of gelatinization[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2021, 36(3): 21-27.
- [22] 黄金, 秦礼康, 石庆楠, 等. 藜麦萌芽期营养与功能成分的动态变化[J]. *食品与机械*, 2017, 33(5): 54-58.
- HUANG J, QING L K, SHI Q N, et al. Dynamic changes of nutritional and ingredients during germination in quinoa[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(5): 54-58.
- [23] MOLINARI R, COSTANTINI L, TIMPERIO A M, et al. Tartary buckwheat malt as ingredient of gluten-free cookies[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 80: 37-43.
- [24] JIN H R, YU J, CHOI S J. Hydrothermal treatment enhances antioxidant activity and intestinal absorption of rutin in tartary buckwheat flour extracts[J]. *Foods*, 2019, 9(1): 8-22.
- [25] LIU Y X, CAI C Z, YAO Y L, et al. Alteration of phenolic profiles and antioxidant capacities of common buckwheat and tartary buckwheat produced in China upon thermal processing[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(12): 5 565-5 576.
- [26] CÁ CERES P J, MARTÍ NEZ-VILLALUENGA C, AMIGO L, et al. Maximising the phytochemical content and antioxidant activity of ecuadorian brown rice sprouts through optimal germination conditions[J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 407-414.
- [27] WU X J, FU G M, LI R Y, et al. Effect of thermal processing for rutin preservation on the properties of phenolics & starch in tartary buckwheat achenes [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 164: 1 275-1 283.
- [28] OH M, OH I, JEONG S, et al. Optical, rheological, thermal, and microstructural elucidation of rutin enrichment in tartary buckwheat flour by hydrothermal treatments[J]. *Food Chemistry*, 2019, 300: 125193.
- [29] ZHONG L Y, NIU B, TANG L, et al. Effects of polysaccharide elicitors from endophytic fusarium oxysporum Fat 9 on the growth, flavonoid accumulation and antioxidant property of fagopyrum tataricum sprout cultures[J]. *Molecules*, 2016, 21(12): 1 590-1 603.
- [30] 陈春旭, 郭元新. 苦荞发芽过程中淀粉的理化特性变化[J]. *食品科学*, 2015, 36(13): 69-73.
- CHEN C X, GUO Y X. Changes in starch physicochemical properties during germination of tartary buckwheat [J]. *Food Science*, 2015, 36(13): 69-73.
- [31] 吴晓江, 范浩伟, 付桂明, 等. 过热蒸气处理对苦荞粉理化性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(11): 89-97.
- WU X J, FAN H W, FU G M, et al. Effect of superheated steam treatment on the physicochemical properties of tartary buckwheat flours[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(11): 89-97.
- [32] LI Y L, GAO S S, JI X L, et al. Evaluation studies on effects of quercetin with different concentrations on the physicochemical properties and in vitro digestibility of Tartary buckwheat starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 1 729-1 737.