

## 蒸汽爆破对黑青稞营养成分释放及消化性的影响

王洁, 曾志龙, 王豪缘, 鲁漫漫, 李耀, 易川虎, 刘雄

### Effect of Steam Explosion on the Release of Nutrients and Digestibility of Black Barley

WANG Jie, ZENG Zhilong, WANG Haoyuan, LU Manman, LI Yao, YI Chuanhu, and LIU Xiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050106>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 加工对青稞营养成分及生物活性影响的研究进展

Research Progress on the Effects of Processing on Nutrients and Biological Activity of Highland Barley

食品工业科技. 2024, 45(5): 8-17 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110345>

#### 不同灭酶方式对黑青稞籽粒结构、营养组成及抗氧化性能的影响

Effects of Different Methods of Inactivating Enzyme on Grain Structure, Nutrient Composition and Antioxidant Activity of Black Highland Barley

食品工业科技. 2022, 43(13): 25-33 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070377>

#### 发芽对青稞的营养成分和抗氧化活性的影响

Effects of Germination on the Nutrient and Antioxidant Activity of Barley

食品工业科技. 2020, 41(3): 86-89, 97 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.016>

#### 发芽青稞营养成分及功能特性研究进展

Research Progress on Nutritional Components and Functional Characteristics of Sprouted Highland Barley

食品工业科技. 2025, 46(2): 403-411 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020202>

#### 蒸汽爆破对植物多酚及抗氧化活性的影响研究进展

Research Progress in the Effects of Steam Explosion on Plant Polyphenols and Antioxidant Capacity

食品工业科技. 2022, 43(4): 438-445 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020198>

#### 青稞特征营养成分含量快速检测模型的建立及优化

Development and Optimization of a Rapid Detection Model for Characteristic Nutrient Content in Highland Barley

食品工业科技. 2024, 45(18): 228-238 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100171>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王洁,曾志龙,王豪缘,等.蒸汽爆破对黑青稞营养成分释放及消化性的影响 [J].食品工业科技,2025,46(8):222-230. doi:10.13386/j.issn1002-0306.2024050106

WANG Jie, ZENG Zhilong, WANG Haoyuan, et al. Effect of Steam Explosion on the Release of Nutrients and Digestibility of Black Barley[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 222-230. (in Chinese with English abstract). doi:10.13386/j.issn1002-0306.2024050106

· 工艺技术 ·

# 蒸汽爆破对黑青稞营养成分释放及消化性的影响

王洁<sup>1</sup>,曾志龙<sup>1</sup>,王豪缘<sup>1</sup>,鲁漫漫<sup>1</sup>,李耀<sup>2</sup>,易川虎<sup>3</sup>,刘雄<sup>1,\*</sup>

(1.西南大学食品科学学院,重庆 400715;

2.海南大学食品科学与工程学院,海南海口 570228;

3.昌都市君亲农业科技开发有限公司,西藏昌都 854000)

**摘要:**为探究蒸汽爆破(Steam Explosion, SE)对黑青稞营养成分和消化性的影响,本研究在不同汽爆压力(1.8、2.0、2.4 MPa)、汽爆时间(20、30、40 s)和不同初始含水率(8%、10%、12%)条件下,分析了黑青稞中 $\beta$ -葡聚糖、多酚和黄酮含量,以及膨化度、糊化度和淀粉水解指数的变化。结果表明,汽爆处理最高可使黑青稞游离多酚含量提高124.37%,抗性淀粉(RS)含量提高198.05%。随着压力和时间的增加,游离多酚含量最高增幅达64.46%,而 $\beta$ -葡聚糖及游离黄酮含量降低,膨化度和糊化度升高,黑青稞内部结构逐渐疏松,淀粉水解指数呈现上升的趋势。初始含水率的增加促进了 $\beta$ -葡聚糖、结合多酚和结合黄酮的含量提升。在确保黑青稞加工质量的前提下,综合考虑其营养、物理和消化特性,建议采用2.0 MPa以上、10%~12%初始含水率和30~40 s的汽爆处理条件。尽管不同汽爆条件下的游离多酚含量具有显著性差异,但全糊化处理后的各组淀粉水解指数无显著差异,表明在黑青稞复杂体系中,单纯的游离多酚不是发挥抗消化作用的决定性因素。不可忽视的是,SE展现出延迟淀粉消化的潜力。该研究可为黑青稞产品的加工利用提供理论参考。

**关键词:**黑青稞,蒸汽爆破条件,营养成分,游离多酚,淀粉水解指数

中图分类号:TS213.3

文献标识码:B

文章编号:1002-0306(2025)08-0222-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050106

本文网刊:



## Effect of Steam Explosion on the Release of Nutrients and Digestibility of Black Barley

WANG Jie<sup>1</sup>, ZENG Zhilong<sup>1</sup>, WANG Haoyuan<sup>1</sup>, LU Manman<sup>1</sup>, LI Yao<sup>2</sup>, YI Chuanhu<sup>3</sup>, LIU Xiong<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;

3. Chang Du Jun Qin Agricultural Science and Technology Development Company, Changdu 854000, China)

**Abstract:** This study investigates the effects of steam explosion (SE) on the nutrient composition and digestibility of black barley. Under different SE pressures (1.8, 2.0, 2.4 MPa), SE times (20, 30, 40 s), and initial moisture contents (8%, 10%, 12%), the contents of  $\beta$ -glucan, polyphenols, and flavonoids, as well as the swelling degree, pasting degree, and starch hydrolysis index of black barley were analyzed. Results showed that SE treatment increased the free polyphenol content by up to 124.37% and the RS content by up to 198.05%. With increasing pressure and time, free polyphenol content increased (with a maximum increase of 64.46%), while  $\beta$ -glucan and free flavonoid contents decreased, and swelling and pasting degrees increased. The internal structure of black barley became more porous, and the starch hydrolysis index showed an upward trend. Increasing the initial moisture content enhanced the levels of  $\beta$ -glucan, bound polyphenols, and bound

收稿日期: 2024-05-13

基金项目: 西藏自治区科技厅(XZ202201YD0027C)。

作者简介: 王洁(2001-),女,硕士研究生,研究方向:食品化学与营养学,E-mail: jujube1221@163.com。

\* 通信作者: 刘雄(1970-),男,博士,教授,研究方向:食品化学与营养学,E-mail: liuxiong848@hotmail.com。

flavonoids. To ensure the processing quality of black barley, while considering its nutritional, physical, and digestibility properties, it is recommended to use SE conditions of at least 2.0 MPa pressure, 10%~12% initial moisture content, and 30~40 s treatment time. Although the free polyphenol content varied significantly under different SE conditions, the starch hydrolysis index of fully gelatinized samples showed no significant differences, indicating that free polyphenols could not inhibit starch digestion in the complex system of black barley. This study provides theoretical references for the processing and utilization of black barley products.

**Key words:** black barley; steam explosion conditions; nutrient composition; free polyphenols; starch hydrolysis index

青稞(*Hordeum vulgare* L., HB), 是禾本科、大麦属一年生草本植物, 主要分布在中国西北、西南等地区, 具有“三高两低”(高纤维、高维生素、高蛋白质、低糖、低脂肪)的特点<sup>[1]</sup>。黑青稞(BHB)是青稞的一种, 富含膳食纤维、花青素和多酚等生物活性物质, 较普通白青稞而言, 具有更高的抗氧化、降血糖和降血脂活性<sup>[2]</sup>。然而, 作为稀少的青稞品种, 黑青稞最主要的加工方式还局限于沙炒, 一种仅适合小微作坊的工艺, 存在生产规模小、成品产量低等问题, 这在很大程度上限制了黑青稞的深加工和高值化利用。常见的青稞加工方式有沙炒、蒸制和煮制等, 研究发现这些方式会造成多酚等抗氧化物质的损失, 影响其降血糖活性<sup>[3]</sup>。因此, 为发挥黑青稞的营养价值并扩大其市场, 需要寻求一种有效的加工方式。

蒸汽爆破即汽爆(Steam Explosion, SE), 是一种十分适用于植物基原料的技术, 因具有低能耗、无污染、高效率等优点在众多加工方式中脱颖而出<sup>[4]</sup>。它可以破坏致密的植物组织和细胞壁结构, 使纤维素内部氢键断裂, 促进活性成分的释放, 因此在谷物加工方面具有巨大潜力。研究发现, 汽爆可以促进红豆、全麦粉和麦麸中多酚、类黄酮和膳食纤维等活性物质的释放, 改善其理化和功能特性, 提高其生物可及性, 还能显著增加谷物的蛋白消化率<sup>[5~6]</sup>。谢勇<sup>[7]</sup>发现汽爆青稞能够有效改善Ⅱ型糖尿病大鼠的糖脂代谢。有研究表明, 游离多酚可以抑制消化酶或与直链淀粉结合形成V型复合物, 从而降低淀粉消化率<sup>[8~9]</sup>, 黑青稞富含多酚、黄酮等营养物质, 其中的营养成分变化及消化性可能会受到加工方式的影响。然而, 目前汽爆对黑青稞多酚等活性物质及消化性的影响还未可知, 尤其是汽爆条件对其的影响尚未见报道。

因此, 本文探究了不同的汽爆压力、时间以及不同初始含水率对黑青稞多酚、黄酮和 $\beta$ -葡聚糖等营养成分的影响, 结合理化、微观结构分析了汽爆对黑青稞淀粉消化性的影响。该研究全面评价了汽爆在黑青稞中的应用可行性, 以期为黑青稞产品的开发与营养保持提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

黑青稞 购自西藏自治区昌都市察雅县;  $\beta$ -葡聚糖试剂盒 上海将来实业股份有限公司; GOPOD 试剂盒 爱尔兰 Megazyme 公司; 福林酚标准品、芦丁

标准品 北京索莱宝科技有限公司;  $\alpha$ -淀粉酶(50 U/mg)、胃蛋白酶(250 U/mg)、糖化酶(100000 U/mL)

美国 Sigma-Aldrich 公司; 胰酶(8 USP) 上海泰坦化学有限公司; 其余试剂均为分析纯。

QB-200 汽爆机组 清正生态科技(苏州)有限公司; KjelFlex K-360 全自动凯氏定氮仪 瑞士 BuCHI 公司; Bio Tek ELx800 酶标仪 美国 Biotek 公司; Phenom Pro 扫描电镜 荷兰 Phenom Word 公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 汽爆黑青稞的制备 以汽爆压力、汽爆时间和黑青稞初始含水率为变量。固定汽爆时间和初始含水率分别为 30 s 和 12%, 汽爆压力分别设置为 1.8、2.0、2.4 MPa; 固定汽爆压力和初始含水率分别为 2.0 MPa 和 12%, 汽爆时间分别设置为 20、30、40 s; 固定汽爆压力和时间分别为 2.0 MPa 和 30 s, 初始含水率分别调整为 8%、10%、12%。以未经汽爆处理的黑青稞为对照组(BHB 组)。将上述处理的黑青稞全部粉碎并过 80 目筛, 于 4 °C 保存。

1.2.2 全糊化黑青稞粉的制备 将上述 10 组黑青稞粉分别以样品:水=1:20 的质量比(g:g)于沸水中糊化 10 min, 冻干, 粉碎过 80 目筛, 备用。

1.2.3 基本营养成分的测定 按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定水分含量、GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》测定总灰分含量、GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法测定蛋白质含量、GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法测定脂肪含量、GB 5009.9-2016《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》中的酸水解法测定总淀粉含量。

1.2.4  $\beta$ -葡聚糖含量的测定 按照试剂盒操作说明测定  $\beta$ -葡聚糖含量。

1.2.5 多酚含量的测定 参考廖超等<sup>[10]</sup>的方法并略作修改。称取 1.0 g 黑青稞粉, 加入 25 mL 80%(体积分数)甲醇溶液, 480 W 超声 30 min, 5000 r/min 离心 15 min, 沉淀重复操作, 合并 3 次所得上清液, 在 45 °C 条件下进行旋蒸, 用 80% 甲醇定容至 10 mL 容量瓶, 0.45  $\mu$ m 有机膜过滤, 得到游离酚提取液。向残渣中加入 20 mL 正己烷, 200 r/min 振荡 1 h, 3000 r/min 离心 5 min, 弃去上清液, 加入 15 mL 盐

酸/甲醇溶液, 70 °C 水浴 1 h, 加入 20 mL 乙酸乙酯, 3000 r/min 离心 5 min, 合并 3 次所得上清液, 在 45 °C 条件下进行旋蒸, 用 80% 甲醇定容至 10 mL 容量瓶, 0.45 μm 有机膜过滤, 得到结合酚提取液。取 100 μL 提取液, 加入 400 μL 纯水、100 μL 福林酚试剂, 室温反应 6 min 后, 再加入 1.2 mL 7.5% (质量分数) 碳酸钠和 0.8 mL 纯水, 避光反应 1.5 h, 在 760 nm 处测定吸光度。以没食子酸为标准品, 得到标准曲线为  $y=0.002x+0.0483, R^2=0.9958$ 。

**1.2.6 黄酮含量的测定** 参考谢勇<sup>[7]</sup>的方法并略作修改。取 1 mL 提取液, 加 4 mL 纯水、0.3 mL 5% (质量分数) 亚硝酸钠溶液, 室温反应 6 min 后加入 0.3 mL 10% (质量分数) 硝酸铝溶液, 混匀后加入 2 mL 1 mol/L 氢氧化钠溶液, 涡旋, 静置 10 min 后在 510 nm 处测定吸光度值。以芦丁为标准品, 得到标准曲线  $y=0.0008x+0.0427, R^2=0.9995$ 。

**1.2.7 膨化度的测定** 参考李朝鲁蒙<sup>[11]</sup>的方法并略作修改。取少量石英砂放入 250 mL 量筒内, 使其铺满量筒底部, 然后取 50 g 黑青稞放入量筒, 继续加入石英砂填满空隙并完全盖住黑青稞顶部, 振荡量筒至刻度不再变化, 记录石英砂与黑青稞总体积  $V_1$ , 最后取出青稞, 记录所用石英砂体积  $V_2$ , 按公式(1)计算膨化度。

$$P(\%) = \frac{V_1 - V_2}{V_0} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: P 表示膨化度, %;  $V_1$  表示石英砂与黑青稞总体积, mL;  $V_2$  表示石英砂体积, mL;  $V_0$  表示原料黑青稞体积, mL。

**1.2.8 糊化度的测定** 参考魏星等<sup>[12]</sup>的方法并略作修改。称取 160 mg 黑青稞粉, 一份制备全糊化组, 一份为实验组。向样品中加入 15 mL 缓冲液, 沸水浴 1 h, 得到全糊化样品, 与实验组一起进行后续操作。在实验组中加入 15 mL 缓冲液、1.8 μL 糖化酶, 于 40 °C 水浴 1 h, 加入 2 mL 10% (质量分数)  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 、1 mL 0.5 mol/L NaOH, 稀释至 25 mL, 过滤。吸取 0.1 mL 滤液, 加 2 mL 铜试剂, 沸水浴 6 min 后加 2 mL 磷钼酸试剂, 沸水浴 2 min 后自然冷却, 稀释至 25 mL, 摆匀, 于 420 nm 处测吸光值。按公式(2)计算糊化度。

$$\text{糊化度}(\%) = \frac{A_n - A_0}{A_s - A_0} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中:  $A_n$  表示实验组的吸光值;  $A_s$  表示全糊化组的吸光值;  $A_0$  表示空白的吸光值。

**1.2.9 扫描电镜观察** 将冻干后的黑青稞按纵向切成薄片, 将其固定在粘有导电双面胶的圆形载物台上, 真空条件下喷金, 在 10 kV 电压条件下放大 500 倍观察切片微观结构。

#### 1.2.10 黑青稞消化性的测定

**1.2.10.1 体外模拟消化** 参考 MINEKUS 等<sup>[13]</sup>的方法并略作修改。取 1.0 g 黑青稞粉与 5 mL 模拟唾

液混合, 调节 pH 至 7.0, 在 37 °C、120 r/min 培养箱中振荡 2 min。将唾液消化物与 10 mL 模拟胃液混合, 调节 pH 至 3.0, 在 37 °C、120 r/min 培养箱中振荡 2 h。将胃液消化物与 20 mL 模拟肠液混合, 调节 pH 至 7.0, 在 37 °C、120 r/min 培养箱中振荡 2 h, 分别在消化 20、30、60、90、120 min 时取 200 μL 消化液, 并加入 1.8 mL 无水乙醇灭酶。采用 GOPOD 法测定葡萄糖含量。得到葡萄糖标准曲线为  $y=0.0711x+0.0529, R^2=0.9990$ 。根据公式(3)~公式(6)计算水解指数(Hydrolysis Index, HI)和快消化淀粉(Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)、抗性淀粉(Resistant Starch, RS)相对含量。

$$HI(\%) = \frac{AUC_{\text{样品}}}{AUC_{\text{对照}}} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中:  $AUC_{\text{样品}}$  表示黑青稞水解曲线下方面积;  $AUC_{\text{对照}}$  表示白面包水解曲线下方面积。

$$RDS(\%) = \frac{(m_{20} - m_0) \times 0.9}{TS} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

$$SDS(\%) = \frac{(m_{120} - m_{20}) \times 0.9}{TS} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

$$RS(\%) = TS - RDS - SDS \quad \text{式 (6)}$$

式中:  $m_{20}$  表示消化 20 min 时的葡萄糖质量, mg;  $m_{120}$  表示消化 120 min 时的葡萄糖质量, mg;  $m_0$  表示未进行水解前样品中游离葡萄糖质量, mg; TS 表示样品中总淀粉质量, mg。

#### 1.3 数据处理

所有数据至少重复三次, 结果以平均值±标准差表示。采用 Excel 软件进行数据处理; SPSS 26 软件进行显著性分析,  $P<0.05$  表示数据差异具有统计学意义; Origin 2022 软件进行数据统计分析与可视化。

### 2 结果与分析

#### 2.1 不同汽爆条件下黑青稞的基本成分

由表 1 可知, 水分随汽爆压力增加而呈现先降

表 1 不同汽爆条件下黑青稞的基本成分

Table 1 Basic composition of black barley under different steam explosion conditions

组别	水分 (g/100 g)	灰分 (g/100 g)	脂肪 (g/100 g)	蛋白质 (g/100 g)	淀粉 (g/100 g)
压力 (MPa)	9.53±0.03 <sup>a</sup>	2.27±0.03 <sup>c</sup>	2.2±0.01 <sup>c</sup>	13.9±0.31 <sup>a</sup>	61.2±0.20 <sup>b</sup>
	1.8 6.66±0.06 <sup>b</sup>	2.33±0.15 <sup>bc</sup>	2.7±0.06 <sup>b</sup>	12.5±0.53 <sup>b</sup>	66.7±1.62 <sup>a</sup>
	2.0 6.19±0.03 <sup>d</sup>	2.45±0.01 <sup>ab</sup>	2.7±0.09 <sup>b</sup>	12.0±0.51 <sup>b</sup>	64.9±2.80 <sup>a</sup>
	2.4 6.54±0.05 <sup>c</sup>	2.49±0.03 <sup>a</sup>	2.8±0.04 <sup>a</sup>	12.1±0.31 <sup>b</sup>	60.1±2.18 <sup>b</sup>
	8 6.16±0.15 <sup>b</sup>	2.46±0.02 <sup>a</sup>	3.0±0.07 <sup>a</sup>	11.5±0.28 <sup>a</sup>	65.3±1.43 <sup>a</sup>
含水率 (%)	10 6.46±0.03 <sup>a</sup>	2.42±0.01 <sup>b</sup>	2.8±0.04 <sup>b</sup>	11.8±0.54 <sup>a</sup>	65.0±2.46 <sup>a</sup>
	12 6.19±0.03 <sup>b</sup>	2.45±0.01 <sup>a</sup>	2.7±0.09 <sup>c</sup>	12.0±0.51 <sup>a</sup>	64.9±2.80 <sup>a</sup>
	20 7.04±0.07 <sup>a</sup>	2.73±0.00 <sup>a</sup>	3.1±0.08 <sup>a</sup>	12.2±0.37 <sup>a</sup>	58.9±2.12 <sup>b</sup>
时间 (s)	30 6.19±0.03 <sup>c</sup>	2.45±0.01 <sup>c</sup>	2.7±0.09 <sup>b</sup>	12.0±0.51 <sup>a</sup>	64.9±2.80 <sup>a</sup>
	40 6.72±0.04 <sup>b</sup>	2.53±0.02 <sup>b</sup>	3.0±0.06 <sup>a</sup>	11.9±0.58 <sup>a</sup>	61.1±1.02 <sup>ab</sup>

注: 不同小写字母表示同一个汽爆变量下各水平的差异显著,  $P<0.05$ , 表2~表3同。

低后增加的趋势( $P<0.05$ ),这是因为压力的变化影响了水蒸气的有效渗透,从而导致水分的变化;淀粉含量在 2.4 MPa 时显著降低( $P<0.05$ ),表明部分淀粉糖苷键和分子间氢键在高压下断裂,裂解成葡萄糖分子<sup>[12]</sup>,此外,淀粉含量随着压力增大而呈现下降的趋势,这显示出汽爆处理在改善谷物可消化性方面的潜力。增加初始含水率,黑青稞脂肪含量显著降低( $P<0.05$ ),这与水分的增加导致物料中脂肪相对比例下降有关。较短的汽爆时间(20 s)时,黑青稞水分含量最高,这是因为在较短的时间内水分子还未完全汽化便释压;随着汽爆时间的延长,部分挥发性矿物质如硒和碘等在释压瞬间挥发<sup>[13]</sup>,导致黑青稞灰分含量有不同程度的降低。与 BHB 组相比,SE 处理后的水分含量显著降低,这是因为释压瞬间黑青稞内部水蒸气挥发,同时,由于高温高压环境下的部分含氮物质溶解或蛋白变性<sup>[14]</sup>,SE 处理后的蛋白质含量显著

降低。总体而言,汽爆处理整体上保持了黑青稞的基本营养价值,这对新型健康食品开发具有重要意义。

## 2.2 不同汽爆条件下黑青稞的 $\beta$ -葡聚糖含量

$\beta$ -葡聚糖是一类存在于大麦和燕麦等细胞壁中的重要生物活性多糖,它在抗氧化、抗肿瘤和降低餐后血糖水平等方面发挥着重要的作用<sup>[15]</sup>。汽爆加工可以较大幅度地破坏黑青稞胚乳细胞壁,增加细胞壁基质中  $\beta$ -葡聚糖的释放<sup>[14]</sup>。由图 1 可知,  $\beta$ -葡聚糖含量随着汽爆压力增加或时间延长而呈现下降趋势,这可能是与  $\beta$ -葡聚糖内部糖苷键断裂有关<sup>[16]</sup>。提高初始含水率有助于  $\beta$ -葡聚糖的释放,这可能是由于水分的增加改善了细胞壁的渗透性,促使更多的可溶性的  $\beta$ -葡聚糖从复合基质中解离出来<sup>[17]</sup>。同时,与 BHB 组相比,SE 处理显著增加了  $\beta$ -葡聚糖的释放,这有利于黑青稞营养与功能的最大化利用。

## 2.3 不同汽爆条件下黑青稞的多酚含量

蒸汽爆破技术可以使物料变得疏松多孔,利于

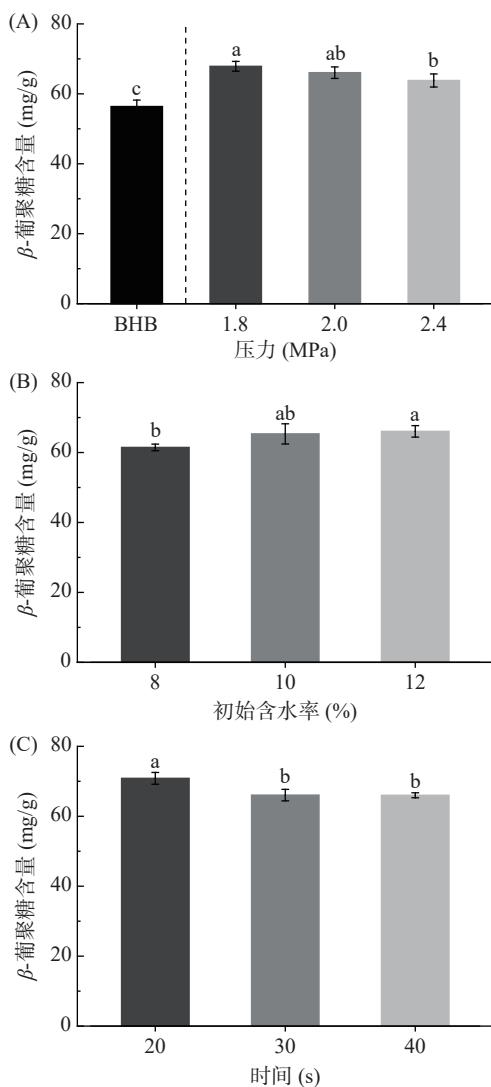


图 1 不同汽爆条件下黑青稞的  $\beta$ -葡聚糖含量

Fig.1 Beta-glucan content of black barley under different steam explosion conditions

注: (A)未汽爆组与不同汽爆压力组; (B)不同初始含水率组; (C)不同汽爆时间组; 不同小写字母表示同一个汽爆变量下各水平的差异显著, 图 2~图 5 同。

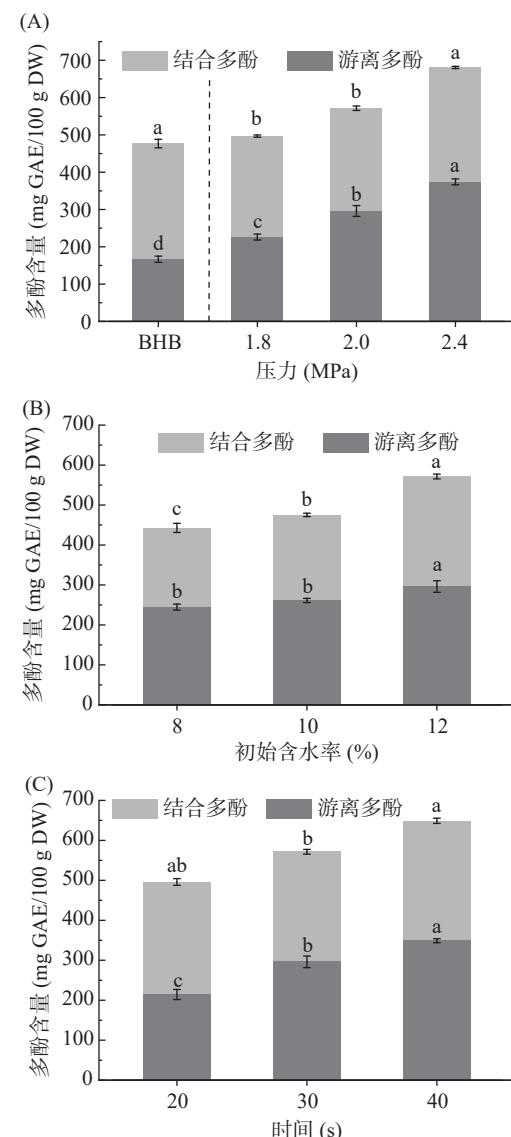


图 2 不同汽爆条件下黑青稞的多酚含量

Fig.2 Polyphenol content of black barley under different steam explosion conditions

生物活性物质的释放,从而提高其提取率和利用率。由图2可知,黑青稞游离多酚含量随汽爆压力升高而显著增加( $P<0.05$ ),这是因为更高的压力增加了细胞内部结构的破坏程度,从而加速了多酚类物质的释放。同时,多酚含量的提高也受初始含水率的影响,较高的水分可能作为缓冲,减少了细胞壁的破坏,使得一部分多酚保持在结合状态。延长汽爆时间,游离多酚含量显著增加( $P<0.05$ ),而汽爆20 s的结合多酚含量高于30 s的,这是因为汽爆时间越长,多酚与细胞壁物质的共价键逐渐被破坏<sup>[18]</sup>,部分结合多酚转变为游离多酚。与BHB组相比,SE处理使游离多酚含量提高了124.37%,这揭示了SE技术在食品加工中促进生物活性成分释放的潜力。

#### 2.4 不同汽爆条件下黑青稞的黄酮含量

汽爆处理对黑青稞中黄酮的影响呈现出复杂的趋势。由图3可知,随着汽爆压力升高,黑青稞游离黄酮含量显著降低( $P<0.05$ ),这与黄酮分子在高压下

的不稳定性有关,导致其快速分解<sup>[19]</sup>,对于结合黄酮含量的升高,则可能是高压减弱了结合黄酮与细胞壁的结合强度,使其更易被提取。结合黄酮含量随初始含水率的提高而显著增加,这表明水分可能有助于缓冲压力的影响,进而保护部分黄酮免于分解。在本研究中,汽爆时间对黄酮含量的影响较不显著,这可能是因为时间的影响被压力和温度的效应所掩盖。同时,与BHB组相比,过高的压力(2.4 MPa)处理导致黄酮含量显著降低,这为我们提供了优化汽爆工艺的思路。

#### 2.5 不同汽爆条件下黑青稞的膨化度

膨化度可以反映汽爆处理的黑青稞体积膨胀程度。由图4可知,黑青稞的膨化度随着汽爆压力和时间的增加先显著增大( $P<0.05$ )后趋于平稳,这一变化反映了随着内部蒸汽压的增大,释压瞬间造成的细胞结构破坏越大,从而导致体积增大。然而,当细胞壁破坏达到一定程度后,膨化度不再显著增大,这可

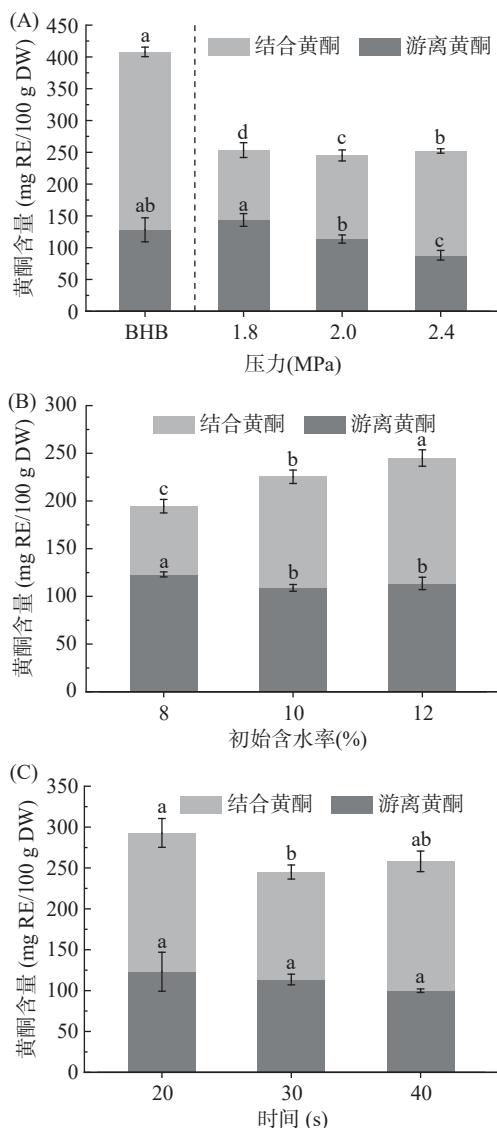


图3 不同汽爆条件下黑青稞的黄酮含量

Fig.3 Flavonoid content of black barley under different steam explosion conditions

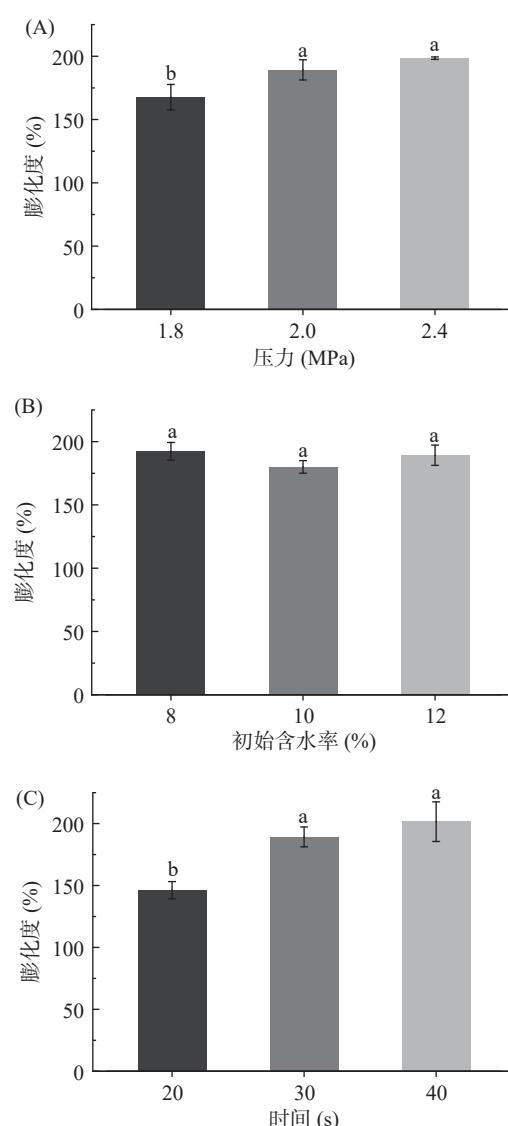


图4 不同汽爆条件下黑青稞的膨化度

Fig.4 Expansion of black barley under different steam explosion conditions

能是因为细胞的结构已达到最大的物理扩展能力。本研究中, 初始含水率对黑青稞膨化度影响不显著, 下一步的研究将考虑调节汽爆压力和时间的组合, 以实现更优的膨化效果和物料的功能性质。

## 2.6 不同汽爆条件下黑青稞的糊化度

糊化程度与淀粉的消化性紧密相关, 较高的糊化度导致更高的淀粉消化率, 因为淀粉在糊化过程中有序的结晶结构逐渐变成无定形结构, 催化位点逐渐暴露, 进而增加了淀粉对酶的敏感性<sup>[20]</sup>。由图 5 可知, 通过增加汽爆压力和延长汽爆时间, 可以显著提高黑青稞的糊化度( $P<0.05$ )。这一现象表明, 更强的物理处理可能促进了对淀粉微晶及分子短程有序性的破坏, 加速了糊化过程<sup>[21]</sup>。然而, 初始含水率对黑青稞糊化度的影响并不显著, 这是因为外部蒸汽的渗透和压力作用掩盖了内部水分变化的影响。未来的研究可以进一步探索不同汽爆条件下的糊化动态, 以实现对黑青稞加工的精准控制。

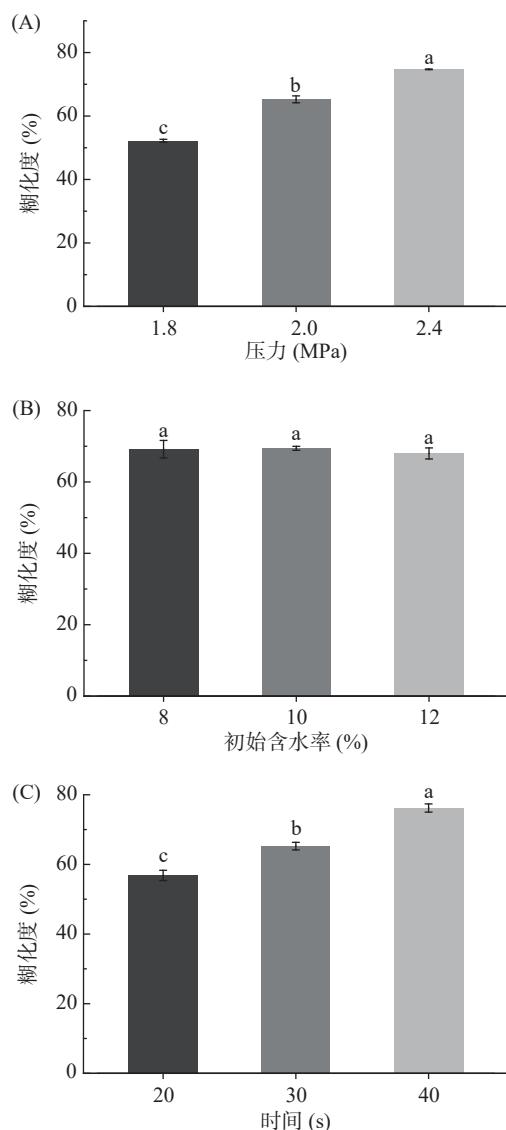


图 5 不同汽爆条件下黑青稞的糊化度

Fig.5 Pasting degree of black barley under different steam explosion conditions

## 2.7 不同汽爆条件下黑青稞的微观结构

蒸汽爆破可以有效破坏谷物的天然屏障, 在高温高压的环境下, 内部水分汽化, 填满细胞间隙, 在瞬间降温释压时发生“爆炸”, 从而破坏谷物致密结构, 在细胞壁上形成大量孔洞<sup>[6]</sup>。由图 6 可知, 黑青稞谷粒的完整细胞已经完全消失。一方面由于细胞内的淀粉发生糊化, 有序的结晶结构变成无定形结构, 导致内部表现出碎片化和空腔化; 另一方面部分糊化的淀粉和变性的蛋白质发生融合表现出拉扯撕裂的结构<sup>[22]</sup>, 整体呈现出一种松散、无规则的多孔蜂窝状结构<sup>[23]</sup>。随着汽爆压力(图 6(a)~(c))和时间(图 6(g)~(i))的增加, 黑青稞孔壁变薄, 孔径增大, 说明增大汽爆强度会增加对黑青稞结构的破坏程度, 进一步解释了前文膨化率增大、多酚含量逐渐增加的结果。在一定的汽爆压力和时间下, 糊化的淀粉形成了凝胶, 不同初始含水率的黑青稞孔壁表现出相似的厚度(图 6(d)~(f)), 这与图 5 中不同初始含水率下的糊化度结果一致。

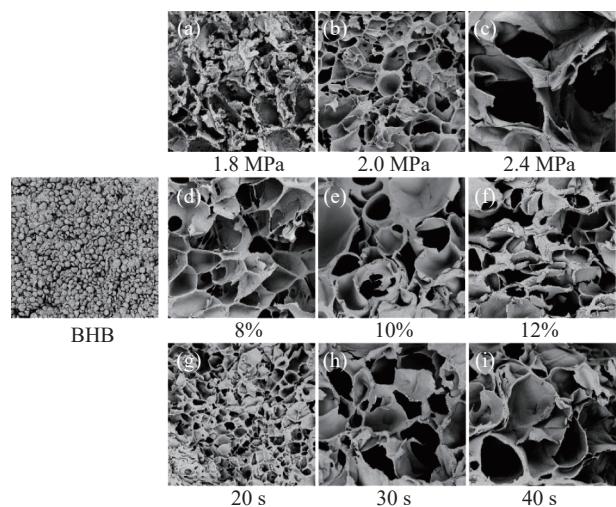


图 6 不同汽爆条件下黑青稞的 SEM 图(500 $\times$ )

Fig.6 SEM images of black barley under different steam explosion conditions (500 $\times$ )

## 2.8 消化性

2.8.1 不同汽爆条件下黑青稞粉的消化性 淀粉在小肠中的消化速度是食物在饭后提高血糖和胰岛素水平的决定性因素<sup>[24]</sup>, 通常以 HI、RDS、SDS 和 RS 的变化反映其消化情况。由表 2 可知, 随着汽爆压力的增加, 黑青稞淀粉水解指数升高, RS 含量显著降低( $P<0.05$ ), 这表明汽爆压力是影响黑青稞消化性的关键参数, 因为更高的压力导致淀粉糊化度更高, 从而提高其消化率。然而, 这一变化不能简单归因于糊化度的变化, 还可能与淀粉颗粒结构的改变、SE 处理释放出的活性物质导致  $\alpha$ -淀粉酶与淀粉相互作用的微环境发生改变有关<sup>[25]</sup>。初始含水率对淀粉水解率及 RDS、SDS、RS 含量无显著影响。短时间汽爆(20 s)处理黑青稞表现出较高的 RS 含量, 这是因为此时黑青稞淀粉糊化度最低(56.84%), 短时

表2 不同汽爆条件下黑青稞的消化参数

Table 2 Digestion parameters of black barley under different steam explosion conditions

组别	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)	HI(%)
压力(MPa)	1.8	30.40±1.34 <sup>b</sup>	31.44±2.66 <sup>a</sup>	38.16±1.56 <sup>a</sup>
	2.0	37.98±2.70 <sup>a</sup>	31.22±2.80 <sup>a</sup>	30.71±1.14 <sup>b</sup>
	2.4	38.66±0.59 <sup>a</sup>	35.09±0.88 <sup>a</sup>	26.25±1.47 <sup>c</sup>
初始含水率(%)	8	38.29±1.65 <sup>a</sup>	31.21±3.73 <sup>a</sup>	30.50±2.83 <sup>a</sup>
	10	38.56±0.57 <sup>a</sup>	29.90±1.14 <sup>a</sup>	31.54±0.98 <sup>a</sup>
	12	38.07±1.92 <sup>a</sup>	31.22±2.80 <sup>a</sup>	30.71±1.14 <sup>b</sup>
时间(s)	20	35.03±1.14 <sup>b</sup>	29.69±2.41 <sup>b</sup>	35.28±1.38 <sup>a</sup>
	30	38.07±1.92 <sup>a</sup>	31.22±2.80 <sup>a</sup>	30.71±1.14 <sup>b</sup>
	40	31.74±0.17 <sup>c</sup>	35.39±0.77 <sup>a</sup>	32.87±0.89 <sup>b</sup>

间的处理未能完全破坏黑青稞淀粉的颗粒结构,保留了一定量的抗性淀粉。相比之下,长时间汽爆(40 s)处理可能导致了过度的美拉德和焦糖化反应,形成了不易消化的焦糊物质,从而降低淀粉的水解速率和RDS的生成。此外,汽爆处理可能促进了更多多酚与直链淀粉的结合,形成不易被消化酶分解的复合物<sup>[26]</sup>,这与前文多酚含量结果一致(图2)。未来需要更加深入地探究汽爆处理的微观机制,以及各类关键参数之间如何相互作用,同时还需从生物活性及健康效益角度,评估这些复合物对人体的潜在影响。

**2.8.2 全糊化黑青稞粉的消化性** 糊化度是影响淀粉消化率的关键因素。为了进一步探究游离多酚在复杂的食品基质中是否起到抑制淀粉消化的作用,将黑青稞粉做全糊化处理,对比不同汽爆条件下不同游离多酚含量的黑青稞粉的消化情况。尽管在汽爆处理的不同条件下,三组黑青稞粉的游离多酚含量具有显著性差异(图2),但由表3可知,模拟消化后,每个汽爆变量下的三组黑青稞粉的RDS、SDS、RS含量均无显著性差异,HI值几乎一致。这表明游离多酚对淀粉消化未产生影响,与多数报道中多酚抑制淀粉消化的结果不同。这说明天然谷物中的多酚在经过体外消化后不足以达到抑制淀粉消化的作用。之前的研究常通过简化的体系(多酚-酶-淀粉)探究多酚对淀粉消化的抑制作用,并普遍发现多酚在较高浓度时能显著影响淀粉的消化。然而,天然谷物中的多酚含量通常较低,并且在消化过程中可能会发生降解,

这可能解释了我们未观察到显著抑制作用的原因。不可忽视的是,SE组的RDS含量显著低于BHB组,RS含量显著高于BHB组,且HI值低于BHB组,这表明青稞表现出的降血糖功效不只限于游离多酚的作用,可能是与其他活性物质(如黄酮、膳食纤维等)的综合作用,在这种作用下,淀粉水解速率减慢,部分RDS转变为SDS甚至RS。该现象揭示了SE技术在改善黑青稞消化性方面的潜力。

## 2.9 黑青稞基本性质的相关性分析

由图7可知,黑青稞的淀粉水解率与 $\beta$ -葡聚糖和游离黄酮含量呈显著负相关,而与游离多酚含量和糊化度呈显著正相关;RS含量与 $\beta$ -葡聚糖和游离黄酮含量呈显著正相关,与游离多酚含量和糊化度呈显著负相关;糊化度与游离多酚含量呈显著正相关,与游离黄酮含量呈显著负相关( $P<0.05$ )。较高的 $\beta$ -葡聚糖含量使体系的粘度增加,同时浓度较高的游离黄酮可能在酶和淀粉的界面形成阻碍,从而限制了消化酶的扩散,导致淀粉水解率降低,RS含量升高<sup>[27]</sup>。糊化度的提高通常意味着淀粉结构的部分解构,这使淀粉暴露出更多的催化活性位点,导致淀粉水解率提高。在此过程中,黑青稞内部分子之间的连接变得松散,释放出更多的游离多酚,而游离黄酮在高温高压的条件下易发生分解,这可能解释了其含量与糊化度呈负相关的现象。然而,这一系列观点需要进一步的实验证明,并应当引入更多的变量进行考察,以建立一个多因素交互的更为完整的消化模型。我们还需要考虑消化过程中消化酶的种类、活性、淀粉晶型的改变等多种因素对淀粉水解动态的影响。

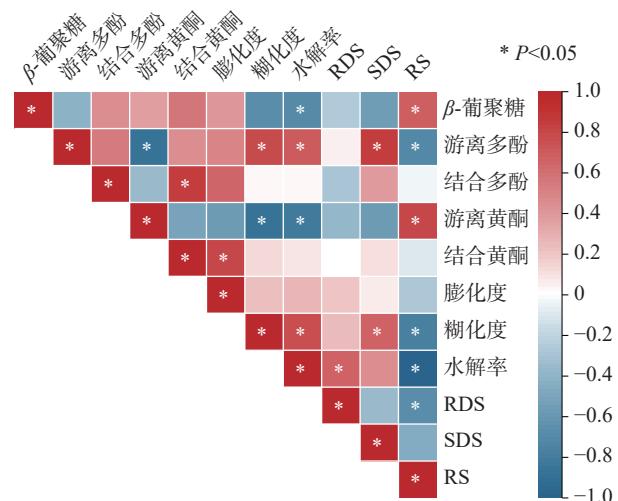


图7 黑青稞基本性质的相关性分析  
Fig.7 Correlation analysis of the basic properties of black barley

## 3 结论

本研究全面分析了不同汽爆压力(1.8、2.0、2.4 MPa)、汽爆时间(20、30、40 s)以及黑青稞初始含水率(8%、10%、12%)对黑青稞中 $\beta$ -葡聚糖、多酚、黄酮等营养成分释放及其消化性的影响。研究

表3 全糊化黑青稞粉的消化参数

Table 3 Digestion parameters of fully pasted black barley flour

组别	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)	HI(%)
BHB	73.82±1.08 <sup>a</sup>	23.61±1.82 <sup>b</sup>	2.56±0.79 <sup>b</sup>	95.63
	1.8	59.20±0.99 <sup>b</sup>	34.32±0.72 <sup>a</sup>	6.49±0.95 <sup>a</sup>
	2.0	60.02±0.98 <sup>b</sup>	32.34±0.28 <sup>a</sup>	7.63±1.23 <sup>a</sup>
压力(MPa)	2.4	60.96±1.85 <sup>b</sup>	33.00±2.19 <sup>a</sup>	6.05±0.80 <sup>a</sup>
	8	61.11±1.28 <sup>a</sup>	31.34±1.01 <sup>b</sup>	7.55±0.74 <sup>a</sup>
	10	59.12±1.23 <sup>a</sup>	34.4±1.23 <sup>a</sup>	6.48±0.97 <sup>a</sup>
初始含水率(%)	12	58.56±1.46 <sup>a</sup>	34.46±1.02 <sup>a</sup>	6.98±0.56 <sup>a</sup>
	20	60.05±0.82 <sup>a</sup>	33.49±1.73 <sup>a</sup>	6.46±1.07 <sup>a</sup>
	30	59.37±1.57 <sup>a</sup>	34.46±1.97 <sup>a</sup>	6.17±1.02 <sup>a</sup>
时间(s)	40	60.65±2.26 <sup>a</sup>	32.28±2.45 <sup>a</sup>	7.07±0.79 <sup>a</sup>

结果表明, 汽爆处理在保证黑青稞基本营养价值的基础上, 显著促进了其活性成分的释放, 尤其是游离多酚含量在汽爆后最高提高了 124.37%, 同时还表现出改善消化性的潜力, RS 含量在汽爆后最高提高了 198.05%。增加汽爆压力和时间有助于提升黑青稞中游离多酚的含量, 而  $\beta$ -葡聚糖和游离黄酮含量却因此降低。SE 处理显著影响了黑青稞的膨化度和糊化度, 增大了内部孔隙, 导致淀粉水解指数整体呈现上升趋势, 但长时间(40 s)汽爆处理下产生的焦糊物质会对淀粉水解指数造成负面影响。另一方面, 初始含水率的变化对上述理化性质影响并不显著。因此, 为将黑青稞营养成分最大化利用, 同时平衡其物理和消化特性, 建议选择 2.0 MPa 以上、10%~12% 初始含水率和 30~40 s 的汽爆处理条件以达到较好的加工质量。此外, 尽管不同汽爆条件改变了黑青稞粉中多酚的含量, 但全糊化处理后的黑青稞粉进行体外模拟消化结果显示, RDS、SDS、RS 含量以及 HI 值并无显著性差异, 这揭示了在 BHB 复杂体系中, 单纯的游离多酚并未对其消化性起到决定性作用。但不可忽视的是, SE 处理整体表现出延缓淀粉消化的作用。

综上, 汽爆处理是一种有效的青稞加工方式, 它可以调控黑青稞的营养成分释放并改善其消化性, 特别是在提升黑青稞中的游离多酚含量上具有显著效果。然而, 不同汽爆条件对其他营养成分的影响差异表明, 应根据特定的营养目标进行精细化的处理参数调控。本研究结果为黑青稞的加工与营养价值提升提供了科学依据, 并且为后续关于谷物加工技术的研究指出了新的方向, 即探索不同汽爆条件对营养成分和淀粉消化性能的综合效应和优化处理方案。未来研究应注重多酚与其它营养成分相互作用的机理研究, 并探索更全面的营养评估模型以及健康效应分析。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 参考文献

- [1] XI H H, WANG A X, QIN W Y, et al. The structural and functional properties of dietary fibre extracts obtained from highland barley bran through different steam explosion-assisted treatments[J]. *Food Chemistry*, 2023, 406: 135025.
- [2] GE X Z, JING L Z, ZHAO K, et al. The phenolic compounds profile, quantitative analysis and antioxidant activity of four naked barley grains with different color[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127655.
- [3] 杨洋, 范蓓, 李杨, 等. 不同加工方式对青稞中酚类物质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 11~18. [ YANG Y, FAN B, LI Y, et al. Influence of different processing methods on phenols in hulless barley[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 11~18. ]
- [4] YANG X J, ZHANG W G, LAN Y L, et al. An investigation into the effects of various processing methods on the characteristic compounds of highland barley using a widely targeted metabolomics approach[J]. *Food Research International*, 2024, 180: 114061.
- [5] MA C, NI L Y, GUO Z B, et al. Principle and application of steam explosion technology in modification of food fiber[J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3370.
- [6] WANG C R, LIN M F, YANG Q Y, et al. The principle of steam explosion technology and its application in food processing by-products[J]. *Foods*, 2023, 12(17): 3307.
- [7] 谢勇. 不同热加工全谷青稞营养功能及对 2 型糖尿病的改善效果[D]. 重庆: 西南大学, 2021: 177. [ XIE Y. Nutritional functions of whole-grain hulless barley treated by various thermal processing and its alleviative effect on type 2 diabetic rats[D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 177. ]
- [8] FAN J X, GUO X N, ZHU K X. Insight into the dynamic molecular mechanism underlying the endogenous polyphenols inhibiting the *in vitro* starch digestion of highland barley noodles[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137870.
- [9] WANG T L, XIAO Z S, LI T G, et al. Improving the quality of soluble dietary fiber from *Poria cocos* peel residue following steam explosion[J]. *Food Chemistry*, 2023, 19: 100829.
- [10] 廖超, 谢勇, 覃小丽, 等. 不同干燥方式对发芽青稞活性成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 139~146. [ LIAO C, XIE Y, QIN X L, et al. Effect of different drying methods on the bioactive components of germinated highland barley[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(21): 139~146. ]
- [11] 李朝鲁蒙. 红豆汽爆预膨化特性及品质研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 46. [ LI C L M. Steam explosion puffing of red bean and quality analysis[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016: 46. ]
- [12] 魏星, 李小平, 王晓龙, 等. 加压煮制对干面条煮制品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(5): 156~164. [ WEI X, LI X P, WANG X L, et al. Effect of pressure cooking on cooking quality of dry noodles[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(5): 156~164. ]
- [13] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food—An international consensus[J]. *Food & Function*, 2014, 5(6): 1113~1124.
- [14] 洪晴悦. 不同热加工对青稞主要生物活性成分和体外消化与肠菌发酵特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021: 46. [ HONG Q Y. Effects of different thermal processing on main bioactive components, *in vitro* digestion and fermentation characteristics of Qingke[D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 46. ]
- [15] HARTININGSIH S, PRANOTO Y, SUPRIYANTO NULL. Structural and rheological properties of modified sago starch (*Metroxylon sagu*) using treatment of steam explosion followed by acid-hydrolyzed as an alternative to produce maltodextrin[J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 1231~1242.
- [16] AMES N, MALUNGA L N, MOLLARD R, et al. Effect of processing on oat  $\beta$ -glucan viscosity, postprandial glycemic response and subjective measures of appetite[J]. *Food & Function*, 2021, 12(8): 3672~3679.
- [17] GOUDAR G, SHARMA P, JANGHU S, et al. Effect of pro-

- cessing on barley  $\beta$ -glucan content, its molecular weight and extractability[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 162: 1204–1216.
- [ 18 ] CHENG A W, HOU C Y, SUN J Y, et al. Effect of steam explosion on phenolic compounds and antioxidant capacity in adzuki beans[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(12): 4495–4503.
- [ 19 ] WANG L, PANG T R, KONG F, et al. Steam explosion pre-treatment for improving wheat bran extrusion capacity[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2850.
- [ 20 ] DING L, XIE Z Q, FU X, et al. Structural and *in vitro* starch digestion properties of potato parenchyma cells: Effects of gelatinization degree[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106464.
- [ 21 ] LJU Y, CHAO C, YU J L, et al. New insights into starch gelatinization by high pressure: Comparison with heat-gelatinization[J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126493.
- [ 22 ] HONG Q Y, CHEN G J, WANG Z R, et al. Impact of processing parameters on physicochemical properties and biological activities of Qingke (highland hull-less barley) treated by steam explosion[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(10): e14793.
- [ 23 ] DANG B, ZHANG W G, ZHANG J, et al. Effect of thermal treatment on the internal structure, physicochemical properties and storage stability of whole grain highland barley flour[J]. *Foods*, 2022, 11(14): 2021.
- [ 24 ] QADIR N, WANI I A. *In vitro* digestibility of rice starch and factors regulating its digestion process: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 291: 119600.
- [ 25 ] WANG X L, YANG J C, LI H, et al. Mechanistic study and synergistic effect on inhibition of  $\alpha$ -amylase by structurally similar flavonoids[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 360: 119485.
- [ 26 ] GUTIÉRREZ T J, TOVAR J. Update of the concept of type 5 resistant starch (RS5): Self-assembled starch V-type complexes[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 711–724.
- [ 27 ] XIE Y, ZHU M, LIU H B, et al. Effects of  $\beta$ -glucan and various thermal processing methods on the *in vitro* digestion of hullless barley starch[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 129952.