

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241030003

过热和湿热蒸汽对青稞粉的理化特性和贮藏稳定性的影响

严建刚^{1,2}, 马永轩¹, 李翠华², 邓媛元¹, 杜玉兰², 钟立煌^{1*}, 刘 光^{1*}

[1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室/
广东省农产品加工重点实验室, 广州 510610; 2. 完美(广东)日用品有限公司, 中山 528400]

摘 要: **目的** 探讨过热和湿热蒸汽对青稞粉理化特性和贮藏稳定性的影响。**方法** 采用湿热蒸汽和不同温度的过热蒸汽对青稞粉进行稳定化处理, 通过测定其内源酶活性、 β -葡聚糖含量、淀粉体外消化特性、糊化特性、微观结构以及贮藏稳定性, 确定最适的加工方式。**结果** 过热蒸汽显著降低青稞粉水分含量, 两种处理方式都能够灭活脂肪酶和过氧化物酶, 其中过热蒸汽处理效果更佳, 脂肪酶和过氧化物酶活性残留率为 6.21%和 13.78%; 过热蒸汽处理对青稞粉中 β -葡聚糖含量的损失影响更小, 湿热蒸汽更能促进慢消化和抗消化淀粉转变成快消化淀粉(58.82%)。两种热处理都能改变青稞粉糊化特性和微观形貌, 其中过热蒸汽处理组峰值黏度更高; 而湿热蒸汽处理组回生值(1750.00 mPa·s)和糊化温度(91.63 °C)更高, 崩解值更低(475.00 mPa·s), 淀粉结构破坏更严重。37 °C 贮藏 3 个月后, 所有处理组酸价均低于对照组, 且过热蒸汽处理组酸价增幅较小, 而湿热蒸汽组增幅较大(67.63%)。**结论** 过热和湿热蒸汽均能有效灭活青稞粉内源性酶, 提高贮藏稳定性, 但过热蒸汽效果更佳且更能保持青稞粉的品质。

关键词: 青稞粉; 过热蒸汽; 湿热蒸汽; 脂肪酶活性; 脂肪酸值

Effects of superheated steam and auto-claving steam on physicochemical properties and storage stability of *Hordeum vulgare* L. flour

YAN Jian-Gang^{1,2}, MA Yong-Xuan¹, LI Cui-Hua², DENG Yuan-Yuan¹,
DU Yu-Lan², ZHONG Li-Huang^{1*}, LIU Guang^{1*}

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2023B0202060002)、广东省自然科学基金项目(2023A1515030242)、广东特支计划项目(2019BT02N112)、深圳市科技计划项目(KCXFZ20230731100704006)、广东省农业科学院创新基金产业专项(202229)、广东省农业科学院科技创新战略专项(R2023PY-JX018)

Fund: Supported by the Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (2023B0202060002), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2023A1515030242), the Program for Guangdong Introducing Innovative and Entrepreneurial Teams (2019BT02N112), the Shenzhen Science and Technology Program (KCXFZ20230731100704006), the Innovation Fund projects of Guangdong Academy of Agricultural Sciences (202229), and the Special Fund for Scientific Innovation Strategy Construction of High Level Academy of Agriculture Science (R2023PY-JX018)

*通信作者: 钟立煌, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: zhonglihuang1993@163.com

刘 光, 博士, 副研究员, 主要研究方向为谷物加工。E-mail: liuguang@gdaas.cn

*Corresponding author: ZHONG Li-Huang, Master, Assistant Professor, Sericultural & Agri-Food Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, No.133, Yiheng Road, Tianhe District, Guangzhou 510610, China. E-mail: zhonglihuang1993@163.com

LIU Guang, Ph.D, Associate Professor, Sericultural & Agri-Food Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, No.133, Yiheng Road, Tianhe District, Guangzhou 510610, China. E-mail: liuguang@gdaas.cn

[1. Sericultural & Agri-Food Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China; 2. Perfect (Guangdong) Commodity Co., Ltd., Zhongshan 528400, China]

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of superheated steam and auto-claving steam on the physicochemical properties and storage stability of *Hordeum vulgare* L. flour. **Methods** *Hordeum vulgare* L. flour was stabilized by superheated steam at different temperatures and auto-claving steam. The endogenous enzyme activity, β -glucan content, *in vitro* starch digestibility, gelatinization properties and microstructure, as well as storage stability of *Hordeum vulgare* L. flour were determined to select the suitable processing method. **Results** Superheated steam treatment significantly reduced the moisture content of *Hordeum vulgare* L. flour, and both treatments were able to inactivate lipase and peroxidase activities, but the superheated steam treatment was more effective, with 6.21% and 13.78% residuals of lipase and peroxidase activities. In addition, superheated steam treatment had less effect on the β -glucan content in barley flour, while auto-claving steam promoted the conversion of slowly digestible and resistant starch into rapidly digestible starch (58.82%). Furthermore, both treatments altered the gelatinization properties and microstructure of *Hordeum vulgare* L. flour, and the superheated steam groups exhibited higher viscosity, while the auto-claving steam group showed higher setback value (1750.00 mPa·s), gelatinization temperature (91.63 °C), lower breakdown value (475.00 mPa·s), and more severe disruption of starch structure compared to the control group. Moreover, the acid value of all treatment groups were lower than control group, and the increase of acid value in superheated steam treatment group was smaller, while the increase of auto-claving steam group was higher (67.63%), after 3 months of storage at 37 °C. **Conclusion** Superheated steam and auto-claving steam treatment are both effective in deactivating endogenous enzymes and enhancing the storage stability of *Hordeum vulgare* L. flour. However, superheated steam treatment demonstrates superior results and is capable of preserving the quality of *Hordeum vulgare* L. flour.

KEY WORDS: *Hordeum vulgare* L. flour; superheated steam; auto-claving steam; lipase activity; fatty acid value

0 引言

青稞(*Hordeum vulgare* L.)又称裸大麦,是我国青藏高原地区人民的主要粮食作物^[1]。青稞具有高蛋白、高纤维、高维生素和低脂肪、低糖等“三高二低”的特点,同时富含 β -葡聚糖、多酚、黄酮等多种活性成分,可以预防心血管疾病、结肠癌、高血压、糖尿病等疾病^[2-4],是开发营养健康食品的优质原料。然而,目前我国青稞的使用方法仍为鲜食,加工利用率不高,其主要原因为青稞中高比例的不饱和脂肪酸包括油酸、亚油酸、亚麻酸等易在内源酶作用下发生脂质水解、氧化,导致酸败变质,产生不愉悦的哈喇味,从而影响了青稞的食用品质和货架期^[5]。

作为谷物常用预处理方式,热加工在青稞的工业加工中得到了广泛的应用,它可以灭活内源性脂解酶,以避免青稞储存期间的酸败和异味^[6]。传统的热处理大致可分为热风干燥、湿热蒸汽处理、炒制、微波处理等几类,这些灭酶方式存在能耗大、耗时长、营养成分损失大等弊端。过热蒸汽是一种新型热处理技术,是指在一定压力下,对饱和蒸汽继续加热成为过热蒸汽,因不含液体水分子,属

于干热蒸汽,具有更低的焓值和更高的传热传质效率,被广泛用于杀菌、物料改性、稳定化处理等加工过程^[7]。目前过热蒸汽已被广泛研究在食品中的应用,SOO 等^[8]发现香肠过热蒸汽处理后即可满足微生物安全标准。WANG 等^[9]发现过热蒸汽延缓了荞麦贮藏过程中的水解酸败和脂质营养的丧失。其在青稞中的研究应用也有报道,李孟佳等^[7]发现 600 W 微波处理 3 min, 175 °C 炒制 20 min 和 160 °C 过热蒸汽处理 12 min 的样品灭酶率在 60.00% 左右。而刘小娇等^[10]的研究发现,常压蒸制、炒制和过热蒸汽对青稞中过氧化酶的灭活率达到约 80.00%。除了酶活性,不同热加工方式对青稞粉的理化特性和结构也会产生影响。孙若琪等^[11]研究发现不同处理对青稞粉结构、糊化特性、热特性的影响不一,其中过热蒸汽处理对青稞粉的结构和理化特性影响最小,对于保持青稞粉品质更佳。同时,有研究者发现过热蒸汽提高了青稞淀粉糊化度,改变蛋白结构^[12],增加了青稞淀粉回生值和崩解值^[13]。而在已有报道中,过热蒸汽处理的多为 160 °C 处理 5 min 以上,存在温度不够高且时间较长等问题,此外,研究对象主要聚焦为青稞籽粒,对青稞粉的影响鲜有报道。

鉴于此,该研究以青稞粉作为原料,探讨高温短时的

过热蒸汽处理对青稞粉内源酶活性、淀粉理化特性及其贮藏过程品质变化,并以湿热蒸汽处理作为对照,以分析过热蒸汽(干热蒸汽)和湿热蒸汽对青稞粉的影响差异,研究结果有望促进过热蒸汽加工技术在青稞食品产业中的应用。

1 材料与方法

1.1 实验材料

青稞籽粒品种为藏青 2000,去皮率为 2%,由江西正盈食品有限公司提供。

1.2 实验试剂

淀粉葡萄糖苷酶(≥ 260 U/mL)、愈创木酚、胰脂肪酶($\geq 8 \times \text{USP}$)(美国 Sigma 公司); β -葡聚糖(混联)检测试剂盒(批号 K-BGLU-100A)、D-葡萄糖检测试剂盒(批号 K-GLUC-660A)(氧化酶试剂法,爱尔兰 Megazyme 公司);其他试剂均为国产分析纯(国药集团化学试剂有限公司)。

1.3 仪器与设备

KCW-20B 万能粉碎机(北京开创同和科技发展有限公司);YZM-M60X70BI 脉动真空压力蒸汽灭菌器(广州市豪尔生医疗设备有限公司);TW-ES200 BICI 连续式过热蒸汽灭酶系统(江苏万创医疗器械有限公司);Tecan GENios 酶标仪(瑞士 Tecan 有限公司);Starch Master2 型 RVA 快速黏度仪(瑞典 Perten 公司);S-3400N-II 扫描电子显微镜(日本日立公司);ICTHI-150 恒温恒湿培养箱[施都凯仪器设备(上海)有限公司]。

1.4 试验方法

1.4.1 不同处理方式青稞粉的制备

过热蒸汽处理:青稞籽粒磨粉过 80 目筛,设备处理温度范围为 160~200 °C,因此分别考察 170、180、190 °C 等 3 个温度对物料的影响。将青稞粉放入投料容器中,当处理仓温度达到预设条件后进行投料,青稞粉分批传送至处理仓进行灭酶(每次约 200 g),灭酶时间考虑到该设备的作用时间范围为 7~13 s,因此选择 10 s 的平均处理时间,处理完毕后样品自动输送至出口处,得到过热蒸汽处理的青稞,分别命名为 SS-170、SS-180 和 SS-190。

湿热蒸汽处理:青稞籽粒磨粉过 80 目筛,均匀铺在金属盘上(厚度不超过 2 cm),放入脉动真空压力蒸汽灭菌器中,灭酶条件设定为食品工业常用杀菌条件^[14]121 °C 处理 20 min,得到湿热蒸汽处理青稞粉,命名为 HS-121。所有样品自然冷却至室温后于-20 °C 密封保存备用。

1.4.2 水分含量及脂肪酶活性测定

参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》直接干燥法进行水分含量测定。

参考 GB/T 5523—2008《粮油检验粮食、油料的脂肪酶活动度的测定》测定脂肪酶活性,具体操作如下,研钵

中加入青稞粉 2 g、少量石英砂和 1 mL 纯油脂,混匀后加入 5 mL 磷酸盐缓冲液(pH 为 7.4)研磨成稀糊状,全部转移至锥形瓶,加塞并于 30 °C 培养箱中保温 24 h。加入乙醇乙醚混合液 50 mL,摇匀静止后过滤。准确移取 25 mL 滤液,加入 5 滴酚酞指示剂,用 0.05 mol/L 氢氧化钾溶液滴定至微红色且 30 s 不褪色,记录所用体积。另取青稞粉 2 g 做空白试验,除不用 30 °C 保温 24 h 外,其余操作同上。根据公式(1)计算脂肪酶活性。

$$X = \frac{(V_1 - V_0) \times c \times 56.1}{m \times (100 - M)} \times \frac{60}{25} \times 100 \quad (1)$$

式中: X 为脂肪酶活性, mg/g; V_1 为试样滴定用氢氧化钾溶液体积, mL; V_0 为空白试验用氢氧化钾溶液体积, mL; c 为氢氧化钾溶液浓度, mol/L; m 为试样质量, g; M 为试样水分含量, %。

1.4.3 过氧化物酶活性测定

青稞粉过氧化物酶活性测定参考 SUN 等^[15]的方法并稍作修改。称取青稞粉 0.5 g 加入 10 mL 蒸馏水混匀,在室温下孵育 30 min。然后 5000 r/min 离心 10 min,产生的上清液为含粗酶溶液。将愈创木酚(1 g/100 mL 95%乙醇)和 H_2O_2 溶解(2 g/100 mL) 1:1 混合,吸取 2 mL 混合液加到 1 mL 粗酶溶液中制备测试液。用蒸馏水代替 H_2O_2 制备空白测试液。使用酶标仪在 470 nm 处测定吸光度值,每分钟读取一次,4 min 后停止读数。过氧化物酶活性随时间增加吸光度值随之增大,且在 1 min 和 3 min 之间呈线性关系。根据公式(2)计算过氧化物酶活性。

$$Y = \frac{\Delta 4470 \times VT}{W \times VS \times 0.01 \times \Delta t} \quad (2)$$

式中: Y 为过氧化物酶活性, U/(g·min); $\Delta 4470$ 为 1 min 和 3 min 之间的吸光度差异; VT 为提取物的总体积, mL; W 为样品的质量, g; VS 为加入到测试液中的提取物的体积, mL; Δt 为线性区域中的反应时间, min。

1.4.4 β -葡聚糖含量测定

使用 Megazyme 混联 β -葡聚糖检测试剂盒对青稞粉中 β -葡聚糖含量进行测定,具体步骤为:准确称取青稞粉 100 mg 放入离心管中,加入 0.2 mL 乙醇(50%)润湿样品,加入 4.0 mL 磷酸钠缓冲液(0.02 mol/L, pH 为 6.5)涡旋混匀。放入沸水孵育 60 s,涡旋混匀后于 100 °C 孵育 2 min,再次涡旋混匀。置于 50 °C 孵育平衡 5 min 后,加入 0.2 mL 地衣聚糖酶(10 U),混匀后封口于 50 °C 孵育 1 h,期间不时用涡旋器进行混匀(3~4 次)。加入 5.0 mL 醋酸钠缓冲液(0.2 mol/L, pH 为 4.0),混匀后室温平衡 5 min,2500 r/min 离心 10 min。分别向 2 个试管准确吸取 0.1 mL 反应液,加入 0.1 mL 溶于醋酸钠缓冲液(0.05 mol/L, pH 为 4.0)的 β -葡萄糖苷酶(0.2 U),空白则加入 0.1 mL 醋酸钠缓冲液(0.05 mol/L, pH 为 4.0)。所有试管 50 °C 孵育 10 min,然后加入 3.0 mL GOPOD 试剂,50 °C 再次孵育 20 min。用酶标仪在 510 nm 处测定吸光度。

根据公式(3)计算 β -葡聚糖含量。

$$Z/\% = \Delta A \times F \times 94 \times \frac{1}{1000} \times \frac{100}{W} \times \frac{162}{180} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Z 为 β -葡聚糖含量, %; ΔA 为 β -葡萄糖苷酶反应后吸光度值减去试剂反应空白的吸光度值; F 为吸光度值转换为葡萄糖的因子, 即 100 (D -葡萄糖的重量 μg)/100 μg D -葡萄糖的吸光度值; 94 为体积校正因子; W 为样品干重, mg ; 162/180 为游离的 D -葡萄糖转化为 D -葡萄糖酐的因子。

1.4.5 糊化特性分析

采用快速黏度仪对青稞粉糊化特性进行测定^[16], 称取青稞粉 3.5 g 于样品筒中, 加水后上下快速搅动分散式样, 放入快速黏度分析仪中。测定程序: 50 °C 保温 1 min, 在 3.7 min 内升温至 95 °C, 保持 2.5 min, 然后在 3.8 min 内降温至 50 °C, 保温 2 min。搅拌器转速 960 r/min, 保持 10 s, 随后维持 160 r/min。记录样品的糊化特性曲线、糊化温度、峰值黏度、最低黏度、回生值、崩解值等。

1.4.6 体外消化能力测定

淀粉的体外消化能力测定参考陈旭^[17]的方法并稍作修改, 具体方法如下: 准确称取淀粉青稞粉(总淀粉含量 $\leq 600 \text{ mg}$)于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 乙酸钠缓冲液(pH 为 5.2, 0.1 mol/L), 涡旋混匀后置于 37 °C 水浴锅 30 min, 加入含有猪胰酶和淀粉葡萄糖苷酶的混合酶 5 mL, 充分涡旋, 加入玻璃珠盖上盖子置于 37 °C 水浴锅中振荡反应并准确计时。于 0、20 和 120 min 分别吸取 0.1 mL 酶解液, 置于 1.9 mL 的 66% 乙醇溶液终止酶解, 8000 r/min 离心 5 min, 吸取上清液, 用 GOPOD 葡萄糖检测试剂盒测定葡萄糖含量, 分别记为 FG 、 G_{20} 和 G_{120} 。根据公式(4)~(6)计算快消化淀粉(ready digestible starch, RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)的含量。

$$\text{RDS}/\% = (G_{20} - \text{FG}) \times 0.9 / \text{TS} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{SDS}/\% = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 / \text{TS} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{RS}/\% = [\text{TS} - (\text{RDS} + \text{SDS})] / \text{TS} \times 100\% \quad (6)$$

式中: FG 为酶解前淀粉中游离的葡萄糖含量, mg ; G_{20} 为淀粉水解 20 min 酶解液的葡萄糖含量, mg ; G_{120} 为淀粉水解 120 min 酶解液葡萄糖含量, mg ; TS 样品中总淀粉含量, mg ; 0.9 为转换因子。

1.4.7 微观结构观察

扫描电子显微镜观察参考 HAN 等^[18]的方法并稍作修改。用牙签挑取适量青稞粉, 铺在覆盖有双面黏性碳带的圆形金属片上, 经离子溅射喷金后置于扫描电子显微镜观察, 使用 5 kV 电压和 500 $\times$ 的条件进行拍照。

1.4.8 贮藏稳定性分析

贮藏稳定性考察参考曹洪伟等^[19]的方法并稍作修改。样品按 20 g/份采用铝箔袋单独分装并封口, 置于 37 °C、相对湿度 75% 的恒温培养箱中进行贮藏。每隔 7 d 取样, 采

用 GB/T 15684—2015《谷物碾磨制品脂肪酸值的测定》方法测定脂肪酸值, 以评价其贮藏稳定性。

1.5 数据处理

所有试验均设置 3 个平行, 数据用平均值 $\pm$ 标准偏差表示, 采用 Origin 2024 b 作图和 SPSS 25.0 进行数据分析处理, 用单因素方差分析和 Duncan's 多重比较法检验数据显著性差异, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同处理对青稞粉水分含量及酶活性的影响

青稞粉中内源酶活性是影响其稳定性的主要因素, 而水分含量对酶活性具有一定影响, 因此, 优先探讨了不同温度的过热蒸汽对青稞粉水分含量以及脂肪酶和过氧化物酶活性影响, 并与常规的湿热蒸汽处理作进行比较, 结果如表 1 所示。由表可见, 湿热蒸汽处理的青稞粉水分含量无显著影响, 而过热蒸汽处理的青稞粉则下降明显, 且随处理温度升高而逐渐降低, 其中 SS-190 组水分含量降低至 5.09%, 较对照组减少一半。过热蒸汽处理降低物料水分含量的原因主要为过热蒸汽属于干蒸汽, 不含液态水分子, 在与物料接触时, 不但不能增加物料水分含量, 反而在过高的温度下引起了物料水分蒸发, 导致其水分含量降低^[20], 而水分含量的降低对谷物中酶活性可能会产生进一步影响。

从脂肪酶的变化(表 1)可得, 过热蒸汽和湿热蒸汽都能够显著降低酶活性, 但对不同酶的影响程度不一。对于脂肪酶而言, 湿热蒸汽处理后, 青稞粉脂肪酶灭活率达 93.21%, 灭活效率高于 SS-170 组(91.63%)和 SS-180 组(92.56%), 但略低于 SS-190 组(93.79%), 也即随着过热蒸汽温度提高其脂肪酶灭活效率逐渐提高, 这与高温更易促进酶的变性有关。总体来看, 两种处理方式对青稞粉脂肪酶活性影响相当。党斌等^[5]研究发现 190 °C 的过热蒸汽处理青稞籽粒 70 s, 可以使其脂肪酶活性降低约 85%, 相比而言, 青稞粉过热蒸汽灭酶效率更高, 其原因可能与其粉碎后更易发生热传递, 从而加速酶的失活有关。

对于过氧化物酶而言, 湿热蒸汽处理后, 青稞粉过氧化物酶灭活率达 77.55%, 显著低于 SS-170 (83.17%)、SS-180 (84.18%)和 SS-190 (86.22%), 也即过热蒸汽对于青稞粉过氧化物酶的灭活效果更佳, 且随温度升高, 其灭活效率提高, 尽管组间无显著差异。李孟佳等^[7]研究发现 160 °C 过热蒸汽处理 12 min, 脂肪酶灭活率为 60.00%左右, 过氧化物酶则完全失活。而该研究结果表明, 过氧化物酶较脂肪酶更难灭活, 两者差异的结果可能与青稞原料形态以及来源有关。在现有处理条件下, 青稞两种内源酶都没有完全灭活, 这可能与谷物中存在耐热性较好的膜结合脂肪酶有关^[21]。

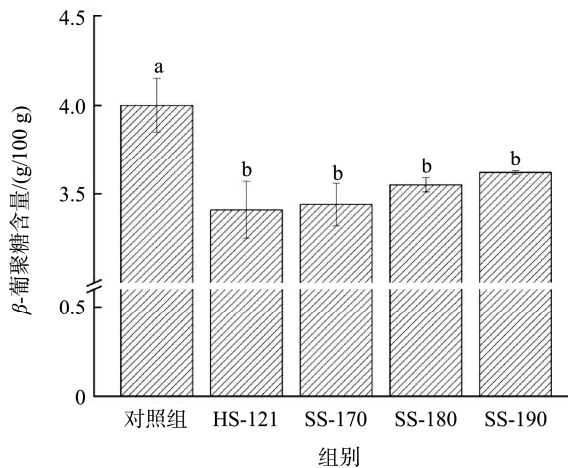
表 1 不同处理对青稞粉水分含量和内源酶活性影响
Table 1 Effects of different treatments on moisture content and endogenous enzyme activity of *Hordeum vulgare* L. flour

样品	水分含量/%	脂肪酶活性 /(mg/g)	过氧化酶活 /[U/(g·min)]
对照组	10.33±0.01 ^a	17.08±0.26 ^a	51.45±1.48 ^a
HS-121	10.55±0.09 ^a	1.16±0.38 ^b	11.55±1.48 ^b
SS-170	5.79±0.02 ^b	1.43±0.30 ^b	8.66±1.11 ^b
SS-180	5.57±0.08 ^b	1.27±0.18 ^b	8.14±2.60 ^b
SS-190	5.09±0.12 ^b	1.06±0.25 ^b	7.09±0.37 ^b

注: 同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$), 下同。

2.2 不同处理对青稞粉中 β -葡聚糖含量的影响

在大麦类粮食作物中, 青稞含有的 β -葡聚糖含量最高, 其具有较好的调节血糖、改善心血管疾病等功效^[22-23]。热处理对青稞 β -葡聚糖含量可能产生影响, 因此, 进一步评价了其含量变化, 结果如图 1 所示。由图 1 可见, 过热蒸汽和湿热蒸汽处理都显著降低了青稞粉中 β -葡聚糖含量, 其中 HS-121 组 β -葡聚糖损失率为 17.63%, 而过热蒸汽组则在 12.56%~16.91%之间, 较湿热蒸汽组损失小。张垚等^[24]



注: 图中不同小写字母代表差异显著, $P<0.05$ 。

图1 不同处理对青稞粉中 β -葡聚糖含量影响

Fig.1 Effects of different treatments on the content of β -glucan in *Hordeum vulgare* L. flour

研究发现青稞炒制后也降低了 β -葡聚糖含量。但也有学者发现, 热加工处理可提高 β -葡聚糖含量, 如青稞焙烤后, 其 β -葡聚糖含量提高了约 15.00%, 这可能与膳食纤维发生分解生成了 β -葡聚糖有关^[25]。因此, 青稞中 β -葡聚糖的含量受加工方式的影响而呈现不同的变化规律。该研究结果表明无论是过热还是湿热蒸汽处理, 都降低了 β -葡聚糖含量, 但随着过热蒸汽温度的升高, β -葡聚糖含量减少的幅度降低, 尽管组间无显著差异, 究其原因与更高的温度处理后促进了膳食纤维糖苷键的断裂, 生成了新的 β -葡聚糖, 从而减少了 β -葡聚糖的加工损失有关。

2.3 不同处理对青稞粉体外消化特性的影响

淀粉可分为 RDS、SDS、RS, 其中 RDS 能被快速消化并在小肠中的十二指肠和邻近区域吸收, 与样品的生糖指数值呈正相关, 而 SDS 和 RS 则呈现负相关关系^[26]。热加工过程中, 青稞淀粉会发生糊化, 从而引起不同类型淀粉含量变化。

不同处理条件青稞淀粉体外消化特性变化结果如表 2 所示, 由表 2 可得, 过热蒸汽和湿热蒸汽处理后, 青稞粉中的 SDS 和 RS 含量显著下降, RDS 含量则显著升高。相比于过热蒸汽组, 湿热蒸汽处理组其 RDS 含量增加幅度更大(58.82%), 这可能是由于湿热蒸汽处理时间较长, 且水分含量比过热蒸汽高(见表 1), 淀粉颗粒吸水膨胀, 淀粉分子链断裂重排, 促使抗性淀粉与慢消化淀粉向快消化淀粉转变, 这与后续糊化特性及微观结构的结果吻合。

从过热蒸汽组结果可以看见, RS 含量随处理温度增加而下降, 当处理温度在 190 $^{\circ}\text{C}$ 时 RS 含量最低(29.13%), 其 RDS 含量在 3 个处理组中最大(52.97%)且与湿热蒸汽组接近。这可能是当处理温度为 170 $^{\circ}\text{C}$ 时, 淀粉颗粒状态保持相对完整, 随着处理温度增加至 190 $^{\circ}\text{C}$, 过热蒸汽引起的结构破坏更加严重(见图 1), 淀粉结晶区和非结晶区氢键或双螺旋断裂, 淀粉链伸展后更容易与消化酶结合^[27]。但无论是湿热蒸汽或是过热蒸汽, 均能促使其 RDS 含量增加, 与任欣等^[28]的研究结果结果一致, 即热处理能够增加 RDS 含量, 而降低 RS 含量。

表 2 不同处理对青稞粉淀粉体外消化特性影响
Table2 Effects of different treatments on the *in vitro* digestion characteristics of starch in *Hordeum vulgare* L. flour

样品	总淀粉含量/%	RDS/%	SDS/%	RS/%
对照组	71.36±3.01 ^a	13.81±0.58 ^c	22.67±2.72 ^a	63.51±2.14 ^a
HS-121	73.37±3.08 ^a	58.82±1.40 ^a	8.58±0.66 ^d	32.60±2.06 ^c
SS-170	71.74±0.33 ^a	41.44±0.98 ^d	15.74±0.75 ^c	42.82±0.23 ^b
SS-180	74.20±0.11 ^a	48.18±0.22 ^c	17.38±0.44 ^b	34.43±0.65 ^c
SS-190	72.06±1.31 ^a	52.97±0.27 ^b	17.90±0.15 ^d	29.13±0.42 ^d

2.4 不同处理对青稞粉糊化特性的影响

淀粉体外消化特性的变化势必影响青稞粉的糊化特性, 因此, 进一步评价了不同处理条件对青稞粉糊化特性影响, 结果如表 3 所示。由表 3 可见, 过热蒸汽和湿热蒸汽处理组中青稞粉的峰值黏度、最低黏度、回生值和糊化温度值都显著性变化, 其中过热蒸汽处理组的峰值黏度和最低黏度增加幅度较大; 而湿热蒸汽处理组的回生值和糊化温度提高较多, 糊化程度更高。

峰值黏度表示淀粉颗粒破损和膨胀的平衡点, 即加热过程中淀粉颗粒破损前的最大膨胀度^[29]; 而最低黏度是样品达到峰值黏度后, 在冷却过程中出现的最小黏度值。相比于对照组, 湿热蒸汽组峰值黏度和最低黏度分别提高了 15.49%和 25.65%, 过热蒸汽组分别提高了 31.25%~35.40%和 38.52%~43.42%, 两个处理组样品峰值黏度和最低黏度提高的原因应与热处理减弱了青稞粉中脂肪与蛋白的结合有关, 前者渗透到淀粉分子内部并与其中的直链淀粉分子形成复合物, 从而降低淀粉颗粒的膨胀性, 导致峰值和最低黏度提高^[10]。过热蒸汽处理组较湿热蒸汽处理组样品具有更高的黏度值应与过热蒸汽温度更高, 破坏脂质与蛋白的结合力更强有关。

回生值可衡量淀粉冷糊的稳定性和老化趋势, 回生值越大表明越容易老化^[30]; 糊化温度则是表征使淀粉颗粒发生不可逆膨胀的温度^[31]。研究表明, 热处理尤其是湿热处理能够促进淀粉分子链间的重排, 形成少量新的单螺旋、V 型结晶结构, 这些有序化结构赋予了更高的回生值和糊化温度^[32]。湿热蒸汽组回生值(1750.00 mPa·s)与糊化温度(91.63 ℃)均高于过热蒸汽组, 表明其淀粉糊化程度更高, 更容易老化反生。

崩解值是淀粉糊最终黏度与谷值黏度的差值, 表征淀粉的耐剪切性能, 崩解值越大, 说明淀粉糊的耐剪切性越差^[33]。由表 3 可见, 相比于对照组, 过热蒸汽处理组后的青稞粉崩解值提高, 而湿热蒸汽处理组则降低(475.00 mPa·s), 其原因推测是湿热蒸汽处理时间较过热蒸汽长, 青稞粉中淀粉交联度增加, 从而提高了其耐剪切性能。生庆海等^[34]研究发现湿热蒸汽处理后的玉米粉其崩解值显著降低, 但不

影响燕麦粉。而景孝男等^[13]使用过热蒸汽处理了 3 种青稞样品, 发现昆仑 15 号和肚里黄两种样品处理后崩解值降低, 而昆仑 20 号样品崩解值升高。因此, 这些结果表明, 谷物粉糊化特性的崩解值除了受加工方式影响, 还受其自身品种影响。

2.5 不同处理对青稞粉微观结构的影响

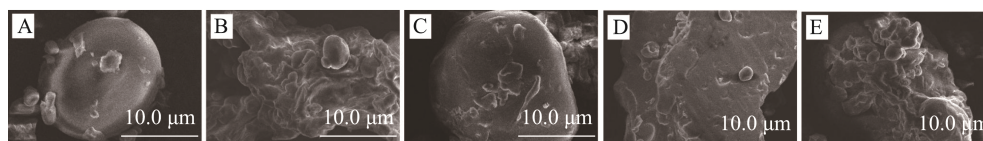
扫描电镜可用于观察样品的微观结构, 不同热处理青稞粉微观结构如图 2 所示。由图 2 可见, 未处理的青稞粉呈椭圆卵型, 外表光滑, 且同时包含大尺寸扁圆形淀粉和小尺寸圆形淀粉颗粒, 为淀粉 A 型颗粒和 B 型颗粒^[11]。经过热蒸汽处理后, 青稞粉表面变得粗糙(SS-170), 且随处理温度的升高, 椭圆淀粉颗粒逐渐被破坏, 发生了不同程度的变形(SS-180 和 SS-190)。过热蒸汽组中 170 ℃处理的青稞粉形态总体保持较好。而经过湿热蒸汽处理的样品, 其淀粉颗粒结构被完全破坏, 并与其他组分连成致密的块状, 这与长时间湿热处理导致淀粉充分糊化有关。总体而言, 过热蒸汽对于青稞粉的破坏相对较小, 湿热蒸汽影响较为严重, 这与孙若琪等^[11]报道的结果相一致。该结论也可以从消化特性和糊化特性的数值上体现出来, 湿热蒸汽组的 RDS 含量比过热蒸汽组(SS-170)高了 42.01%, 糊化温度也是所有组别中最高的(91.63 ℃), 糊化程度最大。因此, 过热蒸汽更能维持青稞结构完整, 有利于青稞粉加工应用。

2.6 不同处理青稞粉贮藏品质评价

脂肪酸值可反映谷物的新鲜程度, 油脂通过脂肪酶水解作用生成游离脂肪酸(水解酸败), 而其中的不饱和脂肪酸经过氧化产生碳基化合物、烃、呋喃等小分子物质, 形成哈败风味, 从而降低谷物制品的食用品质^[35-36]。因此, 评价样品贮藏过程中的酸价变化可分析其品质特性。过热蒸汽和湿热蒸汽处理的青稞粉样品贮藏过程脂肪酸价变化情况如图 3 所示。贮藏 90 d 后, 对照组青稞粉酸价从 53.63 mg/100 g 增加到 72.29 mg/100 g, 增幅达 34.79%, 而过热蒸汽组贮藏期间酸价增幅都低于对照组, 在 12.64%~16.68%区间, 其中 190 ℃处理的样品酸价最低, 说明过热蒸汽处理的青稞粉能够有效减缓贮藏过程中的酸价变化, 这主要与其内源脂肪酶和过氧化物酶的灭活有关。

表 3 不同处理对青稞粉糊化特性影响
Table 3 Effects of different treatments on gelatinization properties of *Hordeum vulgare* L. flour

样品	峰值黏度/(mPa·s)	最低黏度/(mPa·s)	崩解值/(mPa·s)	回生值/(mPa·s)	糊化温度/℃
对照组	1923.50±85.56 ^c	1390.00±55.15 ^c	533.50±30.41 ^b	1341.50±20.51 ^b	87.50±0.01 ^c
HS-121	2221.50±27.58 ^b	1746.50±19.90 ^b	475.00±8.49 ^c	1750.00±16.97 ^a	91.63±0.53 ^a
SS-170	2524.50±160.51 ^a	1969.50±96.87 ^a	605.00±7.07 ^a	1621.50±62.93 ^a	89.63±0.04 ^b
SS-180	2535.50±33.23 ^a	1925.50±16.2 ^a	610.00±16.97 ^a	1671.00±123.04 ^a	89.50±0.28 ^b
SS-190	2604.50±154.86 ^a	1993.50±86.97 ^a	611.00±67.88 ^a	1624.50±6.36 ^a	89.60±0.14 ^b



注: A. 对照组; B. HS-121; C. SS-170; D. SS-180; E. SS-190。

图2 不同处理青稞粉的微观形貌图(500×)

Fig.2 Microscopic images of *Hordeum vulgare* L. flour under different treatments (500×)

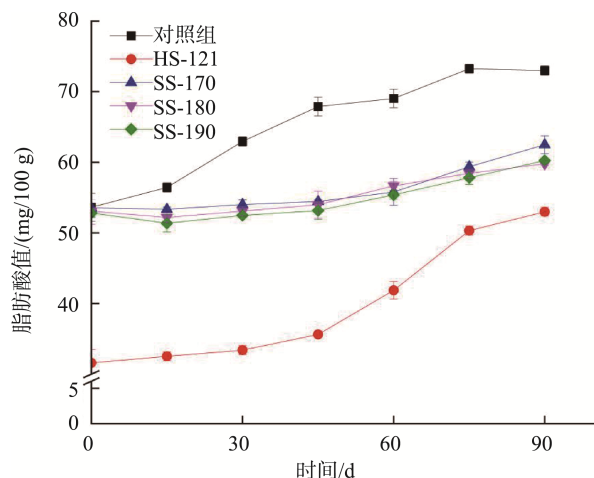


图3 不同处理青稞粉贮藏过程中脂肪酸值影响

Fig.3 Effects of different treatments on the change of acid value during storage of *Hordeum vulgare* L. flour

从湿热蒸汽处理组的贮藏结果来看, 其初始的酸价远低于对照组和过热蒸汽组, 这可能与其长时间湿热处理后青稞粉中脂肪酸的挥发有关。贮藏时间在 50 d 以内时, 湿热蒸汽组酸价增加缓慢, 而在 50~80 d 时间段, 其酸价迅速升高, 总体来看, 贮藏期间其酸价增幅高达 67.63%, 远高于过热蒸汽处理组, 可以预见到进一步延长贮藏时间, 湿热蒸汽组的青稞样品其酸价必然会高于过热蒸汽组。党斌等^[5]分析了红外、微波以及过热蒸汽对青稞籽粒贮藏稳定性, 发现红外处理的青稞粉其贮藏过程中酸价增幅高于对照组。尽管红外和湿热蒸汽都能够一定程度灭活青稞内源酶, 但对于抑制其贮藏过程中的酸价变化并无太多帮助, 也即可能存在影响青稞酸价变化的其他机制。

因此, 贮藏试验结果表明, 相比于湿热蒸汽处理, 过热蒸汽处理的青稞粉在贮藏过程中增幅更小, 也即对于保持青稞粉的品质更佳。

3 结 论

本研究对比探究了过热和湿热蒸汽稳定化处理对青稞粉内源酶活性、 β -葡聚糖含量、消化和糊化特性、微观结构及贮藏稳定性的影响。结果显示, 两种处理都能有效灭活青稞粉的内源酶活性, 其中高温短时的过热蒸汽效果更佳; 相比于湿热蒸汽, 过热蒸汽处理可以减少青稞粉中

β -葡聚糖损失, 但湿热蒸汽却有助于促进快消化淀粉含量的增加; 两种处理都能够增加青稞粉的峰值黏度、最低黏度、回生值和糊化温度值, 而湿热蒸汽处理表现出了更低的崩解值, 表明其在促进淀粉交联方面强于过热蒸汽组; 两种处理都能够破坏淀粉的微观结构, 其中湿热蒸汽尤为显著; 相比于湿热蒸汽处理, 过热蒸汽处理在延缓贮藏过程中的酸价增幅更有优势。综上所述, 短时高温的过热蒸汽处理更适合青稞粉的热加工, 综合考虑灭酶效果、理化特性和结构变化等多方面因素, 170 °C、10 s 的过热蒸汽处理条件被认为是所选体系下保持青稞粉品质最佳条件。研究结果为过热蒸汽在青稞产业中的应用提供了理论指导。

参考文献

- [1] LI MJ, WANG HR, TONG LT, *et al.* A comparison study of three heating assisted enzyme inactivation pretreatments on the physicochemical properties and edible quality of highland barley grain and flour [J]. *J Cere Sci*, 2022, 104: 103404.
- [2] WANG HR, CUI SW, WANG AL, *et al.* Influence of superheated steam treatment with tempering on lipid oxidation and hydrolysis of highland barley during storage [J]. *Food Cont*, 2021, 127: 108133.
- [3] WANG HR, WANG LL, TONG LT, *et al.* Effect of superheated steam inactivation on naturally existent microorganisms and enzymes of highland barley [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2019, 54(8): 2570–2577.
- [4] 马贺, 孙培利, 雷梅英, 等. 猴头菌固态发酵青稞基活性成分及抗氧化能力研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(20): 6764–6771.
MA H, SUN PL, LEI MY, *et al.* Study on bioactive compounds and antioxidant capacity in *Hordeum vulgare* Linn. substrate under solid-state fermentation with *hericium erinaceus* [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(20): 6764–6771.
- [5] 党斌, 景孝男, 张杰, 等. 不同稳定化处理对青稞籽粒储藏稳定性的影响[J]. *食品科技*, 2024, 49(3): 173–182.
DANG B, JING XN, ZHANG J, *et al.* Effect of different stabilization treatments on storage stability of highland barley grain [J]. *Food Sci Technol*, 2024, 49(3): 173–182.
- [6] WANG HR, LI Y, WANG LJ, *et al.* Multi-scale structure, rheological and digestive properties of starch isolated from highland barley kernels subjected to different thermal treatments [J]. *Food Hyd*, 2022, 129: 107630.
- [7] 李孟佳, 佟立涛, 范蓓, 等. 不同灭酶方式对黑青稞籽粒结构、营养成分及抗氧化性能的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(13): 25–33.

- LI MJ, TONG LT, FAN B, *et al.* Effects of different methods of inactivating enzyme on grain structure, nutrient composition and antioxidant activity of black highland barley [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(13): 25–33.
- [8] SOO HA, SU SY, YEON CK, *et al.* Heat penetration and quality attributes of superheated steam sterilization (SHS) home meal replacement (HMR) meat products stew [J]. *LWT*, 2024, 191: 115621.
- [9] WANG LJ, WANG LB, QIU J, *et al.* Effects of superheated steam processing on common buckwheat grains: Lipase inactivation and its association with Lipidomics profile during storage [J]. *J Cere Sci*, 2020, 95: 103057.
- [10] 刘小娇, 白婷, 王姗姗, 等. 不同处理对青稞脂肪氧化酶活性及品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(7): 39–44.
- LIU XJ, BAI T, WANG SS, *et al.* Effects of different treatments on the activity of lipoxigenase and quality of highland barley [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(7): 39–44.
- [11] 孙若琪, 王丽丽, 李孟佳, 等. 不同灭酶处理对青稞理化特性的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(2): 9–15, 22.
- SUN RQ, WANG LL, LI MJ, *et al.* Effects of different enzyme killing treatments on physicochemical properties of highland barley powder [J]. *J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2022, 43(2): 9–15, 22.
- [12] WANG HR, LI ZG, WANG LL, *et al.* Different thermal treatments of highland barley kernel affect its flour physicochemical properties by structural modification of starch and protein [J]. *Food Chem*, 2022, 387: 132835.
- [13] 景孝男, 党斌, 杨希娟, 等. 热处理对不同品种青稞全粉结构及理化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(9): 44–52.
- JING XN, DANG B, YANG XJ, *et al.* Effect of heat treatment on the structure and physicochemical properties of the whole barley powder of different varieties [J]. *Food Mach*, 2021, 37(9): 44–52.
- [14] 马欣龙, 于晓刚, 李新伟, 等. 食用菌预制菜加工研究进展[J]. *食品科技*, 2024, 49(5): 35–41.
- MA XL, YU XG, LI XW, *et al.* Research progress on prepared dishes processing of edible mushroom [J]. *Food Sci Technol*, 2024, 49(5): 35–41.
- [15] SUN Y, JI XY, YAO YY, *et al.* Effect of low temperature microwave treatment on lipid stability and antioxidant capacity of whole wheat flour [J]. *LWT*, 2023, 182: 114854.
- [16] BOUDRES N, BEIHANECHR N, NADJEMI B, *et al.* Physicochemical and functional properties of starches from sorghum cultivated in the Sahara of Algeria [J]. *Carb Poly*, 2009, 78(3): 475–480.
- [17] 陈旭. 蛋白和脂质对淀粉消化特性的影响机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- CHEN X. Mechanism for the digestion properties of starch influenced by lipid and protein [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [18] HAN LH, CAO SP, YU YT, *et al.* Modification in physicochemical, structural and digestive properties of pea starch during heat-moisture process assisted by pre-and post-treatment of ultrasound [J]. *Food Chem*, 2021, 360: 129929.
- [19] 曹洪伟, 乐翔云, 王玉琪, 等. 微波钝化藜麦脂肪酶及改善藜麦风味研究[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(4): 20–29.
- CAO HW, LE XY, WANG YQ, *et al.* Research on microwave inactivation of lipase from quinoa and improvement of flavor [J]. *Sci Technol Cere Oils*, 2021, 29(4): 20–29.
- [20] 赵波. 青稞适度加工稳定化关键技术及制品品质改良机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- ZHAO B. Research on the key technology of hull-less barley moderate process and stabilization and mechanism for improvement of product quality [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Thesis, 2020.
- [21] 刘春伶, 潘碧晖, 邓媛元, 等. 米糠耐热脂肪酶的提取及粗酶特性初探[J/OL]. *现代食品科技*, 1–9 [2024-08-06]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.1002>.
- LIU CL, PAN BH, DENG YY, *et al.* Extraction of heat-resistant lipase from rice bran and preliminary investigation of crude enzyme characteristics [J/OL]. *Mod Food Sci Technol*, 1–9 [2024-08-06]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.1002>.
- [22] 吴雨晴, 张佳琪, 范蓓, 等. 加工对青稞营养成分及生物活性影响的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(5): 8–17.
- WU YQ, ZHANG JQ, FAN B, *et al.* Research progress on the effects of processing on nutrients and biological activity of highland barley [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2024, 45(5): 8–17.
- [23] 李晶, 曹颖, 张或格, 等. 青稞酒糟中 β -葡聚糖提取工艺优化及理化特性分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(5): 180–188.
- LI J, CAO Y, ZHANG YG, *et al.* Optimization of extraction process of β -glucan from highland barley vinasse and analysis of its physicochemical properties [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(5): 180–188.
- [24] 张垚, 张文刚, 党斌, 等. 炒制时间及炒制方式对青稞挥发性风味化合物的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(14): 271–277.
- ZHANG Y, ZHANG WG, DANG B, *et al.* Effects of stir-frying time and method on volatile flavor compounds in highland barley [J]. *Food Sci*, 2020, 41(14): 271–277.
- [25] 王新坤, 刘超, 杨清梅, 等. 青稞籽粒 β -葡聚糖含量及不同加工方式对其变化的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(2): 124–130.
- WANG XK, LIU C, YANG QM, *et al.* Beta glucan content in highland barley grains and its change influenced by different processing methods [J]. *Shandong Agric Sci*, 2019, 51(2): 124–130.
- [26] 张根义, 王明珠, 彭善丽. 慢消化淀粉的结构基础和机理[J]. *食品与生物技术学报*, 2010, 29(4): 481–487.
- ZHANG GY, WANG MZ, PENG SL. Controlled glucose delivery in food for optimal health [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2010, 29(4): 481–487.
- [27] XIE XH, QI L, XU C, *et al.* Understanding how the cooking methods affected structures and digestibility of native and heat-moisture treated rice starches [J]. *J Cere Sci*, 2020, 95: 103085.
- [28] 任欣, 秦梦园, 张敏, 等. 不同熟化方式对青稞淀粉体外消化及多酚利用特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(7): 79–86.

- REN X, QIN MY, ZHANG M, *et al.* Effects of different cooking methods on in vitro starch digestion and polyphenols utilization characteristics of highland barley [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2023, 38(7): 79–86.
- [29] 阎莹莹, 张陈, 张文会. 不同稳定化处理方式对 4%剥皮率青稞粉营养组分与理化特性的影响研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(1): 25–29.
- YAN YY, ZHANG C, ZHANG WH. Effects of different stabilization treatments on nutrient components and physicochemical properties of 4% peeling rate highland barley powder [J]. *Cere Oils*, 2022, 35(1): 25–29.
- [30] 朱静, 杨洁茹, 刘海波, 等. 不同提取方法对青稞淀粉结构和性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(1): 109–116.
- ZHU J, YANG JR, LIU HB, *et al.* Effect of different extraction methods on structure and properties of highland barley starch [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2024, 39(1): 109–116.
- [31] 舒在习, 戴煌. 优质籼稻储藏期间稻米 RVA 特性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 112–119.
- SHU ZX, DAI H. RVA characteristics of high quality indica rice during storage period [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(2): 112–119.
- [32] 陈瑾, 何大伟, 陈玲. 湿热处理环境下咖啡酸/绿原酸对板栗淀粉消化和回生性能的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(8): 41–48.
- CHEN J, HE DW, CHEN L. Effect of caffeic acid/chlorogenic acid on digestion and retrogradation properties of chestnut starch under heat-moisture treatment [J]. *J South China Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2022, 50(8): 41–48.
- [33] 缪铭, 江波, 张涛. 淀粉的消化性能与 RVA 曲线特征值的相关性研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(5): 16–19.
- MIAO M, JIANG B, ZHANG T. Correlation analysis between starch digestibility and rapid viscosity analyzer profile characteristics [J]. *Food Sci*, 2009, 30(5): 16–19.
- [34] 生庆海, 龙金利, 李朋亮, 等. 热处理对谷物粉物化性质及淀粉体外消化性的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(9): 170–177.
- SHENG QH, LONG JL, LI PL, *et al.* Effect of heat treatment on physicochemical properties of grain flours and in vitro digestibility of grain starch [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2022, 22(9): 170–177.
- [35] 白术群, 梁富浩, 马笑巍, 等. 高浓度 CO₂ 气调对隆子黑青稞储藏品质调控研究[J]. *食品科技*, 2021, 46(12): 155–159.
- BAI SQ, LIANG FH, MA XW, *et al.* Effect of high concentration CO₂ on the quality of highland barley storage [J]. *Food Sci Technol*, 2021, 46(12): 155–159.
- [36] 舜菁, 胡迪, 黄克愁, 等. 过热蒸汽处理对米糠营养性质和储藏稳定性的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(5): 213–221.
- LUO SJ, HU D, HUANG KC, *et al.* Effects of superheated steam treatment on the nutritional properties and storage stability of rice bran [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(5): 213–221.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

作者简介



严建刚, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品加工。

E-mail: yjg78228@perfect99.com



钟立煌, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品加工。

E-mail: zhonglihuang1993@163.com



刘 光, 博士, 主要研究方向为谷物加工。

E-mail: liuguang@gdaas.cn