

热处理对不同品种青稞全粉结构及理化特性的影响

Effect of heat treatment on the structure and physicochemical properties of the whole barley powder of different varieties

景孝男¹ 党斌^{1,2} 杨希娟^{1,2} 张文刚^{1,2}

JING Xiao-nan¹ DANG Bin^{1,2} YANG Xi-juan^{1,2} ZHANG Wen-gang^{1,2}

张杰^{1,2} 赵萌萌¹ 陈丹硕^{3,4} 张发林^{3,4}

ZHANG Jie^{1,2} ZHAO Meng-meng¹ CHEN Dan-shuo^{3,4} ZHANG Fa-lin^{3,4}

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省农林科学院青海省青藏高原农产品

加工重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海华实科技投资管理有限公司,

青海 西宁 810016; 4. 青海省青稞资源综合利用工程技术研究中心, 青海 西宁 810016)

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

2. Qinghai Key Laboratory of Qinghai-Tibet Plateau Agricultural Products Processing, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Xining, Qinghai 810016, China; 3. Qinghai Huashi Science and Technology Investment Management Co., Ltd., Xining, Qinghai 810016, China; 4. Qinghai Province Highland Barley Resource Comprehensive Utilization Engineering Technology Research Center, Xining, Qinghai 810016, China)

摘要:目的:改善青稞全粉的加工特性。方法:采用过热蒸汽、远红外烘烤和微波烘烤处理对昆仑 15 号、肚里黄和昆仑 20 号青稞进行处理,通过扫描电镜、X-射线衍射、热分析及傅里叶变换红外光谱扫描,研究 3 种热处理方式对青稞全粉结构的影响,并对比处理后基本营养成分、色差、持水力、持油力、休止角、滑角、膨胀力、堆积密度、振实密度和糊化特性的变化。结果:热处理后,青稞全粉的粗蛋白、粗脂肪、粗纤维及灰分含量增加,而总淀粉含量显著减少($P < 0.05$);3 种热处理均可以改变青稞全粉的组织形态基团结构,但未显著改变青稞全粉的官能团结构;青稞全粉的膨胀力、堆积密度、振实密度、持水性、糊化温度显著增加($P < 0.05$),其持油性和白度降低;过热蒸汽处理增加了青稞全粉的黏度值、回生值及崩解值($P < 0.05$),而微波烘烤和远红外烘烤的与之相反。结论:热处理能够改善青稞全粉的加工特性,但不同品种之

间略有差异,且过热蒸汽处理较适合提高青稞全粉的加工特性。

关键词:过热蒸汽;远红外;微波;青稞全粉;微观结构

Abstract: Objective: This study contributed to improving the processing characteristics of highland barley flour. Methods: Using superheated steam, infrared and microwave baking to treat three different kinds of barley, i. e., kunlun 15, Duli Huang and kunlun 20 and then their influence on the structure of the barley powder was determined by scanning electron microscopy, X-ray diffraction, thermal analysis and Fourier transform infrared spectrum scanning. The changes of basic nutrients, color difference, water holding power, oil holding force, reclining Angle, sliding Angle, expansion force, bulk density, vibrating density and gelatinization characteristics were compared with before and after treatment. Results: After heat treatment, the contents of crude protein, crude fat, crude fiber and ash increased, while the contents of total starch decreased significantly ($P < 0.05$). The three kinds of heat-treatments could change the morphological group structure of the whole barley powder, without significantly change to the functional group structure of the whole barley powder. The swelling force, bulk density, vibration density, water holding capacity and gelatinization temperature of highland barley powder increased significantly ($P < 0.05$), while its oil retention

基金项目:青海省应用基础研究项目(编号:2021-ZJ-758);青海省重大科技专项(编号:2021-NK-A2);青海省中央引导地方科技发展资金项目(编号:2021ZY010)

作者简介:景孝男,男,青海大学在读硕士研究生。

通信作者:党斌(1980—),男,青海大学农林科学院副研究员,硕士。E-mail:156044168@qq.com

收稿日期:2021-06-05

and whiteness decreased. Superheated steam treatment increased the viscosity value, regression value and disintegration value ($P<0.05$), while microwave baking and far infrared baking decrease them. **Conclusion:** Heat treatment can improve the processing characteristics of highland barley flour, but slight differences were found among the different varieties. Superheated steam treatment is more suitable for improving the processing characteristics of highland barley flour.

Keywords: superheated steam; far infrared; microwave; highland barley; microstructure

青稞俗称裸大麦,是藏区农牧民赖以生存的粮食作物之一,其营养丰富均衡,具有“三高两低(高蛋白、高纤维、高维生素和低脂肪、低糖)”的营养特性,富含 β -葡聚糖,具有减缓血糖值、提升饱腹感、提高免疫力及稳定血糖值的功效^[1]。但青稞硬度大,种皮厚,其营养物质主要分布在青稞外层结构种皮及胚芽中,坚硬的外层结构保护青稞籽粒内部免受损伤的同时也造成了青稞籽粒难以研磨、加工。

近年来,热处理方式被广泛应用于各种全谷物原料中,最常用的技术有过热蒸汽、远红外、微波加热处理。吴绍华等^[2]发现适当的过热蒸汽处理可以提高全麦粉的加工特性;张月兰等^[3]发现红外烘烤处理可使小麦总体呈更加金黄的色泽,可更好地保持小麦胚淀粉颗粒和蛋白质的天然微观结构;任国宝等^[4]发现适度的微波辐照处理能够增加面粉的粉质稳定时间,提高面糊的峰值黏度和回生值。上述研究表明热处理技术能够一定程度地改善全谷物的加工特性。

热处理会对谷物理化性质产生一定影响,但有关热处理对青稞理化性质的影响尚缺乏系统性研究,尤其是热处理对不同品种青稞营养成分、粉体特性、微观结构表征的影响尚未见报道。文章拟以青海主要推广的3种粒色青稞[昆仑15号(黄粒)、肚里黄(蓝粒)、昆仑20号(黑粒)]为原料,研究热处理方式(过热蒸汽、远红外烘烤、微波烘烤)对青稞微观结构及理化特性的影响,以期改善青稞全粉的加工特性,为青稞产品开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

昆仑15号、昆仑20号和肚里黄青稞:青海省农林科学院;

乙醇、石油醚、甲醇、盐酸:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;

碳酸氢钠、氢氧化钠、碳酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

试验用水为去离子水。

1.2 仪器与设备

过热蒸汽瞬时灭菌设备:WS-FMD15型,江苏万创灭

菌设备科技厂区;

格兰仕微波炉:G80F20CN1L-DG(S0)型,佛山市顺德区格兰仕微波炉电器有限公司;

远红外线食品烘炉:CK-2型,广州市麦盛烘焙设备有限公司;

色差计:WSC-S自动型,日本HITACHI公司;

高分辨扫描电子显微镜:JSM-6610型,日本HITACHI公司;

傅里叶变换红外光谱扫描:Nicolet6700型,美国Thermo Fisher Scientific公司;

X射线衍射仪:D/MAX2500X型,荷兰帕纳科公司;

同步热分析仪:STA 449 F3型,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 将一定质量的青稞籽粒预处理至水分含量20%^[5],并按以下3种热处理方式进行处理,冷却至室温后贮藏备用。

(1) 过热蒸汽:取青稞籽粒300g,用过热蒸汽瞬时灭菌设备对青稞籽粒进行处理。处理温度190℃,处理时间70s。

(2) 远红外烘烤:取青稞籽粒100g平铺于烘盘上,上、下火150℃烘烤40min。

(3) 微波烘烤:取青稞籽粒100g平铺于玻璃器皿中,微波功率800W下处理150s。

1.3.2 青稞全粉营养成分测定

(1) 水分:参照GB 5009.3—2010。

(2) 脂肪含量:参照GB/T 5009.6—2003。

(3) 总膳食纤维:参照GB 5009.88—2014。

(4) 灰分:参照GB 5009.4—2010。

(5) 总淀粉:采用TOTAL STARCH试剂盒。

(6) 粗蛋白:参照GB 5009.5—2016。

1.3.3 青稞全粉的色度和结构表征

(1) 色度:采用色差计进行检测,同一样品测定3次取平均值。

(2) 电子显微形态观察:参照文献^[6]并稍作改动,取适量青稞麸皮粉样品置于样品台上,于真空喷镀仪内使样品喷金导电,采用扫描电子显微镜观察样品表面结构,电压为15kV。

(3) 热分析:准确称取3mg样品和6mg去离子水于铝制坩埚中,加盖密封。采用差示扫描量热法测定样品的热力学性质,并在充N₂的条件下进行试验,升温速率10℃/min,测定范围22~200℃^[7-8]。

(4) 傅里叶变换红外光谱扫描:参照曹龙奎等^[9]的方法。

(5) X射线衍射:参照曹龙奎等^[9]的方法。

1.3.4 青稞全粉的粉体特性分析

(1) 休止角与滑角:参照易甜等^[10]的方法。

- (2) 膨胀力:参照符群等^[11]的方法。
- (3) 堆积密度与振实密度:参照陈如等^[12-13]的方法。
- (4) 持水性和持油性:参照 Li 等^[14]的方法。
- (5) 糊化特性:参照赵萌萌等^[15]的方法。

1.4 数据处理

所有试验均重复 3 次,利用 Excel、Origin 2019 和 SPSS 25 软件进行数据统计分析及绘图,显著性差异采用 LSD 多重比较法,相关性分析采用 Pearson 双侧检验法。

2 结果与分析

2.1 热处理对青稞全粉营养成分的影响

由表 1 可知,青稞经热处理后粗蛋白含量均略微上升,但差异不显著,与邓家汶等^[2]的结果一致;粗脂肪含量均显著上升($P<0.05$),其中过热蒸汽处理的增幅最大,其次是远红外烘烤和微波烘烤,主要是由于谷物中的脂肪一部分与淀粉或蛋白相结合,另一部分则以游离脂酸的形式存在,适度处理使脂肪与蛋白的结合力变弱,从而使部分结合脂肪由结合态变为游离态^[16]。总淀粉含量均下降,其中微波烘烤的下降幅度最大,下降了 11.38%,而过热蒸汽处理的下降了 2.04%,远红外烘烤的下降了 9.17%,可能是由于热处理导致部分淀粉分解为糊精或还原糖^[17],导致青稞中总淀粉含量降低,与申瑞玲等^[18]的结果一致。灰分含量均有所上升,可能是热处理过程中,水分含量下降,青稞籽粒皮层产生微膨化效果^[19],降低了青稞麸皮的韧性,使青稞麸皮在制粉过程中更容易破碎,灰分含量上升,与赵波^[1]的结果一致。粗纤维含量显著上升($P<0.05$),其中远红外烘烤的上升幅度最大,上升了 29.10%,而微波烘烤和过热蒸汽的分别上升了

15.53%,8.17%,可能是由于高温条件下,分子运动加剧,易于膳食纤维溶出^[20]。

2.2 热处理对青稞全粉结构表征的影响

2.2.1 色度值 由表 2 可知,经热处理后,青稞亮度值(L^*)显著下降($P<0.05$),下降幅度为过热蒸汽>远红外烘烤>微波烘烤,可能是过热蒸汽、微波和远红外烘焙处理使青稞全粉的灰分含量升高,引起青稞粉亮度值降低^[21];红绿值(a^*)和黄蓝值(b^*)显著增加($P<0.05$),增加幅度为远红外烘烤>过热蒸汽>微波烘烤。研究^[22]发现,热处理会导致谷物发生轻微的美拉德和焦糖化反应,使麦麸的黄色和红色加深。温度和时间是美拉德反应中最重要的影响因素,远红外烘烤时间最长,因此,其对青稞粉的 a^* 值和 b^* 值的影响更大。过热蒸汽和微波烘烤对 a^* 值和 b^* 值的影响相对较低,可能是由于处理时间短,参与美拉德反应的蛋白和还原糖含量较低^[23];从总色差值(ΔE)可以看出,经热处理后,青稞总色差均低于对照组,说明 3 种处理方式均未对青稞本身的色泽造成破坏,仍保持其原有的色泽。

2.2.2 电镜扫描 由图 1 可知,对照组中淀粉颗粒饱满,球体结构轮廓清晰且表面附着蛋白质基质。经过过热蒸汽处理后,淀粉颗粒与蛋白质基质脱离发生塌陷变形,表面粗糙且有不同程度的凸起,可能是由于淀粉糊化和蛋白质变性造成的^[24];经远红外烘烤后,一部分淀粉颗粒仍保持球体结构但体积明显膨胀,可能是由于远红外烘烤处理对青稞全粉中的淀粉起到了一定的膨化作用^[3];经微波烘烤后,淀粉粒表面的蛋白质基质与淀粉粒脱离,小淀粉颗粒破裂,大淀粉颗粒仍保持结构完整,可能是由于微

表 1 热处理对青稞全粉营养成分的影响[†]

Table 1 Effects of different stabilization treatments on nutrient composition of whole barley powder of different varieties %

品种	处理方式	粗蛋白	粗脂肪	总淀粉	灰分	粗纤维
昆仑 15 号	对照组	10.24±0.54 ^a	2.03±0.02 ^c	65.55±1.33 ^a	1.69±0.15 ^b	2.67±0.73 ^c
	过热蒸汽	10.65±0.43 ^a	2.55±0.03 ^a	63.73±1.42 ^a	2.02±0.16 ^a	2.68±0.81 ^c
	远红外烘烤	10.11±0.51 ^a	2.32±0.01 ^b	57.36±1.12 ^b	1.74±0.10 ^b	3.08±0.74 ^a
	微波烘烤	10.94±0.33 ^a	2.17±0.02 ^c	56.55±1.23 ^c	1.74±0.11 ^b	2.83±0.52 ^b
肚里黄	对照组	9.63±0.52 ^a	2.09±0.01 ^d	64.60±1.32 ^a	1.92±0.11 ^b	1.91±0.43 ^d
	过热蒸汽	10.25±0.43 ^a	2.73±0.02 ^a	63.63±1.12 ^a	1.93±0.21 ^b	2.23±0.71 ^c
	远红外烘烤	9.88±0.51 ^a	2.37±0.02 ^b	58.87±1.01 ^b	2.12±0.12 ^a	2.83±0.82 ^a
	微波烘烤	9.79±0.51 ^a	2.22±0.01 ^c	55.92±1.31 ^c	1.94±0.16 ^b	2.38±0.62 ^b
昆仑 20 号	对照组	12.05±0.33 ^a	2.02±0.22 ^c	57.95±1.33 ^a	1.99±0.21 ^c	2.62±0.21 ^d
	过热蒸汽	12.72±0.42 ^a	2.75±0.33 ^a	56.88±1.02 ^a	2.02±0.24 ^c	2.83±0.42 ^c
	远红外烘烤	12.41±0.41 ^a	2.33±0.22 ^b	54.38±1.42 ^b	2.23±0.12 ^b	3.23±0.42 ^a
	微波烘烤	12.10±0.53 ^a	2.08±0.22 ^c	53.58±1.22 ^c	2.35±0.13 ^a	3.02±0.32 ^b

[†] 同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 2 热处理对青稞全粉色度值的影响[†]

Table 2 Effects of different stabilization treatments on the total pink degree of highland barley

品种	处理方式	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	ΔE
昆仑 15 号	对照组	81.66±0.02 ^a	0.74±0.04 ^d	11.44±1.21 ^b	78.33±0.07 ^a
	过热蒸汽	67.55±0.01 ^d	1.32±0.03 ^b	11.94±0.01 ^b	65.73±0.01 ^c
	远红外烘烤	77.12±0.01 ^c	2.17±0.03 ^a	16.58±0.01 ^a	71.67±0.01 ^b
	微波烘烤	80.34±0.01 ^b	0.89±0.01 ^c	11.49±0.01 ^b	77.22±0.01 ^a
肚里黄	对照组	79.55±0.14 ^a	-0.14±0.03 ^d	10.35±0.01 ^d	77.08±0.13 ^a
	过热蒸汽	66.47±0.01 ^d	0.64±0.01 ^b	10.64±0.01 ^c	64.82±0.01 ^c
	远红外烘烤	76.50±0.01 ^c	1.54±0.01 ^a	15.39±0.01 ^a	71.87±0.01 ^b
	微波烘烤	78.26±0.01 ^b	0.19±0.02 ^c	10.93±0.01 ^b	76.66±0.01 ^a
昆仑 20 号	对照组	73.52±0.01 ^a	-0.95±0.01 ^d	8.81±0.01 ^d	72.07±0.01 ^a
	过热蒸汽	61.80±0.14 ^d	-0.78±0.02 ^c	9.59±0.01 ^b	60.61±0.03 ^d
	远红外烘烤	68.99±0.02 ^c	0.01±0.02 ^a	12.90±0.02 ^a	66.42±0.01 ^c
	微波烘烤	71.46±0.01 ^b	-0.15±0.02 ^b	9.11±0.01 ^c	70.04±0.01 ^b

[†] 同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

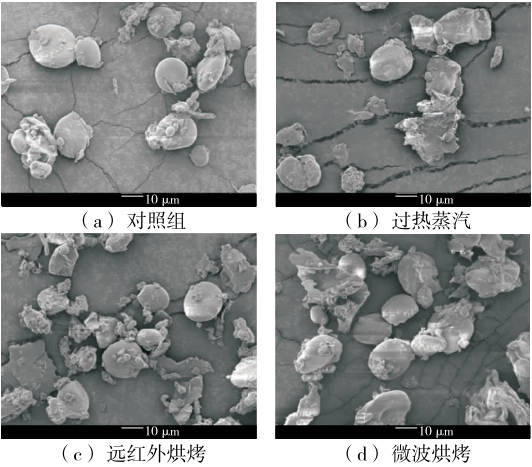


图 1 热处理后青稞全粉电镜图

Figure 1 Electron microscope images of the whole powder of highland barley after different stabilization treatments ($\times 1\ 000$)

波烘烤在淀粉粒中产生较大的蒸气压,结构强度较小的小淀粉颗粒破裂。综上,远红外和微波烘烤的青稞全粉淀粉结构保存更完整,过热蒸汽处理后淀粉结构破坏严重。

2.2.3 热分析 由表 3 可知,过热蒸汽和微波烘烤使青稞全粉糊化温度上升,远红外烘烤降低了青稞全粉的糊化温度。昆仑 15 号经过热蒸汽处理后糊化焓增加了 33.61%,经远红外和微波烘烤后糊化焓分别降低了 39.22%和 30.07%;肚里黄经过热蒸汽、远红外和微波烘烤后糊化焓分别增加了 1.55%,16.08%,1.87%;昆仑 20 号经过热蒸汽、远红外和微波烘烤后糊化焓分别降低了 13.02%,62.68%,7.67%。糊化温度和糊化焓的降低,可

以降低糊化所需的能量,从而缩短蒸煮时间,降低加工难度^[25]。综上,昆仑 15 号和昆仑 20 号适宜使用远红外烘烤,肚里黄适宜使用过热蒸汽处理。

2.2.4 X 射线衍射 由图 2 可知,经热处理后,青稞样品的衍射峰强度明显增大,结晶特性发生明显变化。 2θ 均在 15.3° , 17.4° , 18.1° , 20.1° , 23.3° (峰 1~峰 5)处有明显的衍射峰,呈 A 型淀粉晶型,与文献^[26]报道一致。其中, 2θ 为 17.4° 和 18.1° 处的衍射峰是相连的双峰, 20.1° 处的主峰是一种内源性淀粉脂质化合物^[27-28]。与原青稞全粉相比,经过热蒸汽处理后峰 1、峰 2、峰 4 和峰 5 被抑制消失,在 20.1° 处结晶峰(峰 3)变得尖锐,吸收峰增强,结晶度显著下降。这可能是由于过热蒸汽的水分子吸收了强辐射热,变成高能水分子,穿透在淀粉颗粒内部,作用于淀粉结晶区,螺旋结构发生转变,结晶结构遭到破坏所导致^[29]。经远红外烘烤后 5 个衍射峰位置并未改变,与对照组相比峰形变得清晰,说明远红外烘烤未改变青稞粉的结晶特性。经微波烘烤后,可以观察到峰 3 和峰 4,其余吸收峰变得弥散未被观察到,可能是由于微波烘烤破坏了淀粉的微观结构^[30-31]。

2.2.5 傅里叶变换红外光谱扫描 由图 3 可知, $3\ 700\sim 3\ 000\text{ cm}^{-1}$ 处出现较强的宽展圆滑的吸收峰是 O—H 的伸缩振动产生的^[31],热处理前后,青稞均在 $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 处出现吸收峰;在 $2\ 932\text{ cm}^{-1}$ 处出现一个弱吸收峰,是糖类甲基 C—H 的反对称伸缩振动所致^[31]; $1\ 656\text{ cm}^{-1}$ 处有一个较大的吸收峰,为—COOH 的吸收峰,表明青稞全粉中含有康、糖醛酸^[32]; $1\ 000\sim 1\ 200\text{ cm}^{-1}$ 处是糖类 C—O 的收缩振动,其中 $1\ 160\text{ cm}^{-1}$ 处是半纤维素和纤维素 C—O—C 伸缩振动所致^[33]; $1\ 049\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是由糖环 C—O—C 的 C—O 伸缩振动所致,是多糖类另一特

表 3 热处理对青稞全粉热分析的影响[†]

Table 3 Influence of different stabilization treatments on thermal analysis of total powder of highland barley

品种	处理方式	$T_o/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$	$T_c/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
昆仑 15 号	对照组	89.3 ± 1.16^b	119.3 ± 1.36^b	109.1 ± 2.47^b	$1\,315.0 \pm 5.47^b$
	过热蒸汽	93.8 ± 1.29^a	125.1 ± 1.36^a	110.6 ± 1.58^a	$1\,757.0 \pm 5.46^a$
	远红外烘烤	84.7 ± 1.48^c	112.7 ± 1.15^c	101.6 ± 1.47^d	799.2 ± 5.24^d
	微波烘烤	91.7 ± 1.74^{ab}	116.4 ± 1.17^{bc}	103.5 ± 2.55^c	919.6 ± 5.18^c
肚里黄	对照组	91.5 ± 1.85^{ab}	118.8 ± 1.68^a	110.2 ± 3.55^a	$1\,549.0 \pm 5.66^c$
	过热蒸汽	92.1 ± 1.59^{ab}	120.0 ± 1.49^a	107.0 ± 2.69^b	$1\,573.0 \pm 3.57^b$
	远红外烘烤	89.0 ± 1.76^b	119.0 ± 1.38^a	110.6 ± 1.65^a	$1\,798.0 \pm 5.24^a$
	微波烘烤	93.4 ± 1.46^a	118.4 ± 1.79^a	107.5 ± 2.94^b	$1\,578.0 \pm 5.06^b$
昆仑 20 号	对照组	92.0 ± 1.69^a	121.5 ± 1.65^{ab}	107.8 ± 2.47^b	$1\,812.0 \pm 4.46^a$
	过热蒸汽	93.3 ± 1.18^a	124.4 ± 1.54^a	109.0 ± 3.29^a	$1\,576.0 \pm 5.53^c$
	远红外烘烤	78.9 ± 1.68^b	109.0 ± 1.96^c	97.4 ± 1.36^c	676.3 ± 3.56^d
	微波烘烤	92.4 ± 1.47^a	119.2 ± 1.28^b	109.0 ± 2.47^a	$1\,673.0 \pm 5.24^b$

[†] T_o 、 T_p 、 T_c 、 ΔH 分别表示起始温度、峰值温度、终止糊化温度和糊化焓,同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

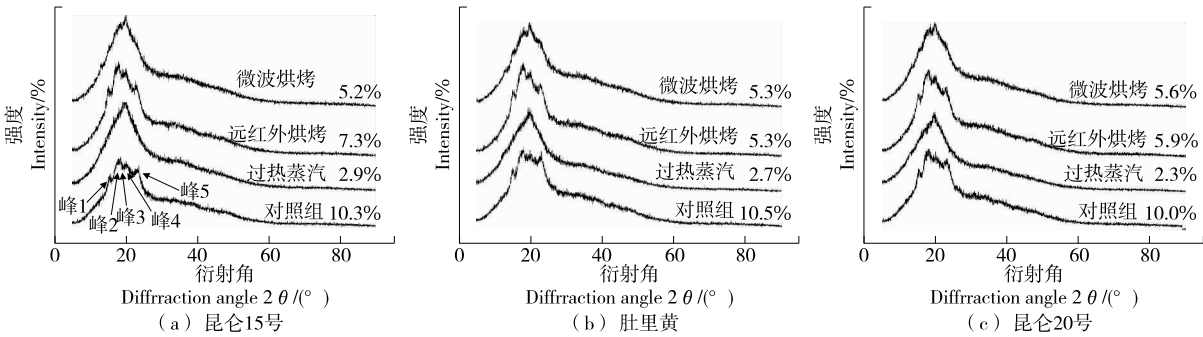


图 2 热处理后青稞全粉 X 射线衍射图谱及相对结晶度

Figure 2 X-ray diffraction pattern and relative crystallinity of highland barley powder after different stabilization treatments

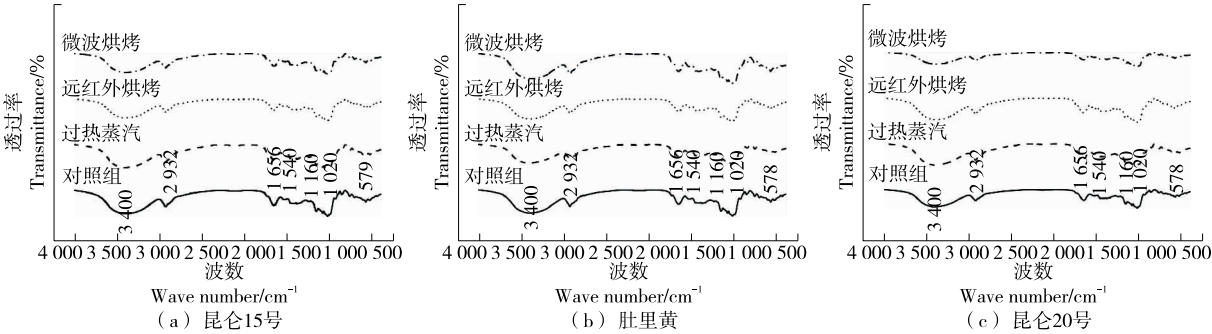


图 3 热处理后青稞全粉的傅里叶变换红外光谱图

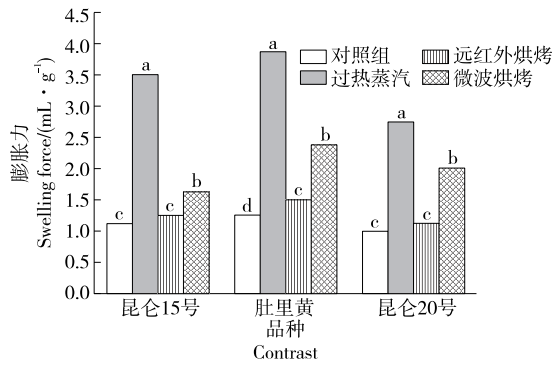
Figure 3 Fourier transform infrared spectrum of highland barley powder after different stabilization treatments

征吸收峰^[34]; 综上,不同品种的青稞经热处理后无新的基团生成,粉体结构未发生改变。

2.3 热处理对青稞全粉粉体特性的影响

2.3.1 膨胀力 由图 4 可知,处理前不同品种青稞之间

膨胀力差异不显著。经热处理后,青稞膨胀力显著增加($P<0.05$),增加幅度为过热蒸汽>微波烘烤>远红外烘烤。综上,热处理会显著增加青稞粉的膨胀力,其中过热蒸汽处理的效果最显著。

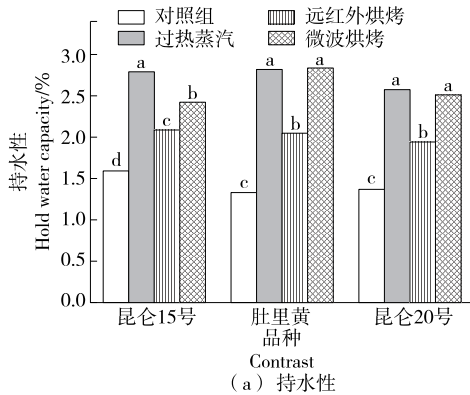


同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 热处理后青稞全粉的膨胀力

Figure 4 The expansive force of the whole barley powder after different stabilization treatments

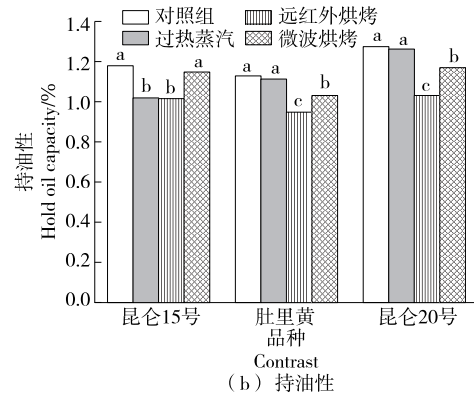
2.3.2 持水性和持油性 由图5可知,经热处理后,青稞的持油性有所下降,持水性显著增加 ($P < 0.05$)。其中处理前肚里黄与昆仑20号的持水性相当,均小于昆仑15



同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

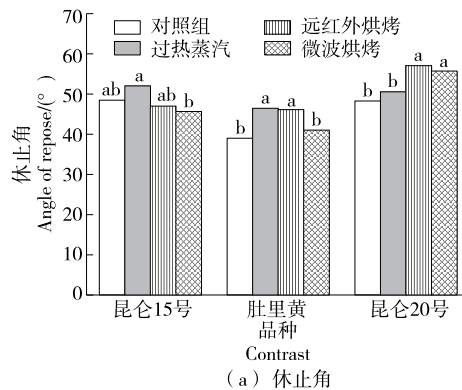
图5 热处理后青稞全粉的持水性和持油性

Figure 5 The water and oil holding properties of the whole highland barley powder after different stabilization treatments



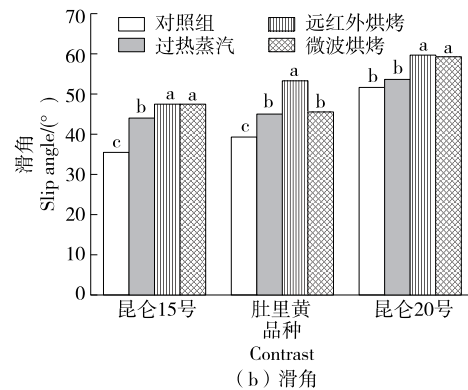
同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图5 热处理后青稞全粉的持水性和持油性



同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图6 热处理对青稞全粉休止角与滑角的影响



同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图6 热处理对青稞全粉休止角与滑角的影响

Figure 6 Effects of different stabilization treatments on Angle of repose and Angle of slip of whole barley powder

红外烘烤后的增加幅度最大,为 17.14%。综上,远红外和微波烘烤会使青稞休止角和滑角显著增大($P<0.05$),流动性变差。这主要是因为青稞全粉中膳食纤维含量高,经热处理后膳食纤维结构被破坏,表面变得粗糙,在磨粉过程中更易破碎为更小的颗粒,导致密度变大,粉体之间静摩擦系数增大,流动性变差^[35]。

2.3.4 堆积密度与振实密度 由图 7 可知,热处理前,各青稞样品之间的堆积密度与振实密度差异不显著,经热处理后青稞粉的堆积密度与振实密度均显著增加($P<0.05$)。其中昆仑 15 号和肚里黄经过热蒸汽处理后的堆积密度增幅最大,其次是远红外和微波烘烤,分别增加了 22.52%,18.21%,11.31%。昆仑 20 号经远红外烘烤后的堆积密度增幅最大,其次是过热蒸汽和微波烘烤,分别增加了 21.81%,11.73%,12.71%。昆仑 15 号、肚里黄、昆仑 20 号经远红外烘烤后的振实密度增幅最大,分别为

80.43%,77.03%,90.53%。综上,经热处理后的青稞全粉更易压缩,其疏松性、填充性和成型性相对较好^[36]。

2.3.5 糊化特性 由表 4 可知,昆仑 15 号和肚里黄经过热蒸汽处理后,其峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解值和回生值均显著提升($P<0.05$),而经远红外和微波烘烤后显著下降($P<0.05$)。昆仑 20 号经 3 种热处理后的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解值和回生值均显著下降($P<0.05$)。由于过热蒸汽处理温度高,导致脂质与蛋白质之间结合力减弱,脂类转向与淀粉结合,油脂会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,而这种复合物会显著降低淀粉颗粒的膨胀性,从而使青稞全粉的黏度提高。青稞经热处理后,糊化温度均呈不同程度的上升,可能是热处理导致谷物中淀粉交联度增加,从而导致其糊化温度升高^[37]。研究^[38]表明,糊化特性与面制品的各种性质有着密切关系,面粉生产出来的

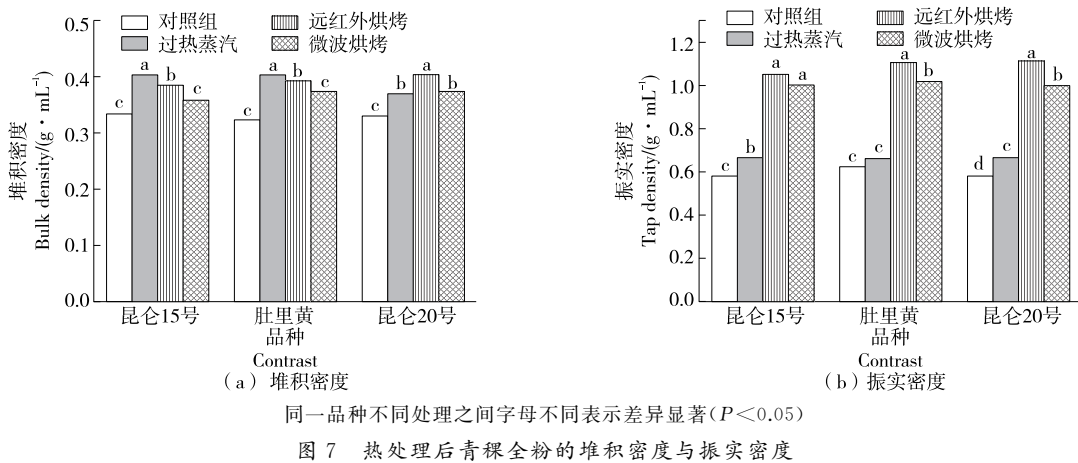


Figure 7 Bulk density and vibrational density of highland barley powder after different stabilization treatments

表 4 热处理对青稞全粉糊化特性的影响[†]

Table 4 Effects of different stabilization treatments on total pulverization characteristics of highland barley

品种	处理方式	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	崩解值/cP	终值黏度/cP	回生值/cP	糊化温度/℃
昆仑 15 号	对照组	1 129±2.17 ^b	961±3.73 ^a	168±1.49 ^c	1 587±4.65 ^b	625.35±4.34 ^b	85.20±0.57 ^c
	过热蒸汽	1 443±3.46 ^a	916±1.75 ^b	527±1.55 ^a	2 075±5.54 ^a	1 158.67±3.96 ^a	87.45±0.34 ^b
	远红外烘烤	307±3.15 ^d	208±3.85 ^d	99±1.58 ^d	489±1.79 ^d	280.90±1.79 ^d	89.55±0.96 ^a
	微波烘烤	573±2.16 ^c	399±2.23 ^c	174±1.55 ^b	931±2.55 ^c	531.03±2.98 ^c	90.10±0.38 ^a
肚里黄	对照组	1 491±5.46 ^b	943±1.66 ^b	548±1.77 ^b	1 843±4.55 ^b	899.87±3.46 ^b	85.20±0.76 ^c
	过热蒸汽	2 559±2.58 ^a	1 526±1.97 ^a	1 033±4.89 ^a	2 552±4.27 ^a	1 025.67±3.76 ^a	80.90±0.56 ^b
	远红外烘烤	316±1.86 ^d	215±1.55 ^c	101±1.86 ^c	673±6.96 ^c	457.67±2.25 ^c	90.00±0.76 ^a
	微波烘烤	600±2.58 ^c	—15±1.49 ^d	77±1.59 ^d	242±2.85 ^d	256.67±1.06 ^d	90.05±0.87 ^a
昆仑 20 号	对照组	1 481±3.12 ^a	998±1.45 ^a	483±2.45 ^a	1 473±1.45 ^a	598.66±1.84 ^a	87.45±0.38 ^b
	过热蒸汽	729±4.34 ^b	443±1.36 ^b	286±1.48 ^b	1 042±1.36 ^b	474.66±1.23 ^b	89.85±0.78 ^a
	远红外烘烤	140±1.54 ^d	99±1.59 ^d	41±1.23 ^d	316±1.47 ^d	216.67±1.34 ^d	89.00±0.67 ^{ab}
	微波烘烤	603±3.54 ^c	348±1.45 ^c	255±1.96 ^c	690±1.12 ^c	341.66±1.69 ^c	89.60±0.67 ^a

[†] 同一品种不同处理之间字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

蛋糕、面包、面条及馒头等往往具有更好的质构和口感。因此,过热蒸汽处理青稞将有利于改善青稞全粉的加工特性,提高面制品品质。

3 结论

3种热处理方式均对青稞微观结构及理化特性具有一定影响。经热处理后,青稞全粉的粗蛋白、粗脂肪、粗纤维及灰分含量均增加,而其总淀粉含量均减少;青稞全粉亮度下降,组织形态和晶体结构改变,但未显著改变青稞的官能团结构;青稞全粉的膨胀力、堆积密度、振实密度、持水性、糊化温度均显著增加($P<0.05$),但其持油性显著降低($P<0.05$);此外,过热蒸汽处理增加了青稞全粉的各黏度值、回生值及崩解值,而微波及远红外烘烤的则反之。综合分析,过热蒸汽处理的青稞粉的理化性质较好,因此可优先推荐其作为青稞的热处理方式。青稞全粉在贮藏过程中会发生一系列复杂的理化变化,因此后续可继续探索热处理对青稞贮藏稳定性的影响。

参考文献

- [1] 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: 1-3.
ZHAO Bo. Research on key technology of highland barley moderate processing stabilization and product quality improvement mechanism[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020: 1-3.
- [2] 邓家汶, 吴绍华, 郭晓娜, 等. 过热蒸汽处理对全麦粉理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(10): 29-34.
DENG Jia-wen, WU Shao-hua, GUO Xiao-na, et al. Effects of superheated steam treatment on physicochemical properties of whole wheat flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(10): 29-34.
- [3] 张兰月. 远红外烘烤处理对小麦胚品质及贮藏稳定性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 36-37.
ZHANG Lan-yue. Effects of far-infrared baking on quality and storage stability of wheat embryos[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013: 36-37.
- [4] 任国宝, 郇美丽, 陈佳佳, 等. 微波辐照稳定化处理小麦籽粒及其品质变化的研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 7-11.
REN Guo-bao, XUN Mei-li, CHEN Jia-jia, et al. Study on grain and quality change of wheat stabilized by microwave irradiation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(11): 7-11.
- [5] WANG Hao-ran, WANG Li-li, TONG Li-tao, et al. Effect of superheated steam inactivation on naturally existent microorganisms and enzymes of highland barley[J]. John Wiley and Sons, 2019, 54(8): 2 570-2 577.
- [6] HE Shu-dong, LI Jing, HE Qian, et al. Physicochemical and antioxidant properties of hard white winter wheat (*Triticum aestivum* L.) bran superfine powder produced by eccentric vibratory milling[J]. Powder Technology, 2018, 325: 126-133.
- [7] HUANG Zu-qiang, LU Jian-ping, LI Xuan-ai, et al. Effect of mechanical activation on physico-chemical properties and structure of cassava starch[J]. Carbohydr Polym, 2007, 68(1): 128-135.
- [8] 王立东, 肖志刚. 气流粉碎对玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 276-281.
WANG Li-dong, XIAO Zhi-gang. Effects of airflow grinding on structure and physicochemical properties of corn starch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 276-281.
- [9] 曹龙奎, 康丽君, 寇芳, 等. 改性前后小米糠膳食纤维结构分析及体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 46-52.
CAO Long-kui, KANG Li-jun, KOU Fang, et al. Analysis of dietary fiber structure of rice bran before and after modification and inhibition of α -glucosidase activity in vitro[J]. Food Science, 2018, 39(11): 46-52.
- [10] 易甜, 崔文文, 王明锐, 等. 锦橙皮渣膳食纤维微粉化及其功能特性分析[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 8-14.
YI Tian, CUI Wen-wen, WANG Ming-rui, et al. Micropulverization and functional characteristics of dietary fiber from orange peel residue[J]. Food Science, 2019, 40(10): 8-14.
- [11] 符群, 李卉, 王路, 等. 球磨法和均质法改善薏米粉物化及功能性质[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 285-291.
FU Qun, LI Hui, WANG Lu, et al. Effect of ball milling and homogenization on the physicochemical and functional properties of *Rhizoma japonicum* powder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(9): 285-291.
- [12] 陈如, 何玲. 超微粉碎对苹果全粉物化性质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 150-154.
CHEN Ru, HE Ling. Effects of ultrafine grinding on physicochemical properties of apple whole powder[J]. Food Science, 2017, 38(13): 150-154.
- [13] 王军, 程晶晶. 振动式超微粉碎对绿豆全粉物化特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(11): 38-41.
WANG Jun, CHENG Jing-jing. Effects of vibration ultrafine grinding on physicochemical properties of mung bean whole powder[J]. Grain and Oils, 2016, 29(11): 38-41.
- [14] LI Guang-hui, GUO Wei-yun, GAO Xue-li, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of soybean residue powder[J]. Food Science and Nutrition, 2020, 8: 1208-1214.
- [15] 赵萌萌, 党斌, 张文刚, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉微观结构及功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 278-286.
ZHAO Meng-meng, DANG Bin, ZHANG Wen-gang, et al. Effects of ultrafine grinding on microstructure and functional properties of highland barley bran powder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 278-286.
- [16] ZHOU M, ROBERTS G L, ROBARDS K, et al. Effects of sowing date, nitrogen application, and sowing rate on oat quality[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1998, 49(5): 332-340.
- [17] 胡新中, 罗勤贵, 欧阳韶晖, 等. 裸燕麦酶活性抑制方法及品质比较[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(5): 46-50.

- HU Xin-zhong, LUO Qin-gui, OUYANG Shao-hui, et al. Inhibition methods and quality comparison of bare oat enzyme activity[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006, 21(5): 46-50.
- [18] 申瑞玲, 张亚蕊, 张婷, 等. 不同热加工对萌动青稞营养成分和加工特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 147-152.
- SHEN Rui-ling, ZHANG Ya-rui, ZHANG Ting, et al. Effects of different thermal processing on nutrient composition and processing characteristics of hullless barley[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(3): 147-152.
- [19] LIANG Bing, LI Li-qian, LI Mei-ling, et al. Photochromic properties of chemically modified bacteriorhodopsin films[C]// San Diego, CA, United States: SPIE Optics + Photonics, 2000: 64-70.
- [20] 赖爱萍, 陆国权. 蒸煮加工对甘薯渣膳食纤维特性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(21): 107-144.
- LAI Ai-ping, LU Guo-quan. Effects of cooking on dietary fiber properties of sweet potato residue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(21): 107-144.
- [21] HU Yue-ming, WANG Li-juan, ZHU Hong, et al. Superheated steam treatment improved flour qualities of wheat in suitable conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(6): 13238.
- [22] GIALLOUROU N, ORUNA-CONCHA M J, HARBOURNEN. Effects of domestic processing methods on the phytochemical content of watercress (*Nasturtium officinale*) [J]. Food Chemistry, 2016, 212: 411-419.
- [23] SEHRAWAT R, NEMA P K, KAUR B P. Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 285-301.
- [24] 胡迪. 过热蒸汽对米糠营养、理化与储藏性质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2018: 17-18.
- HU Di. Effects of superheated steam on nutrition, physicochemistry and storage properties of rice bran [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018: 17-18.
- [25] 徐斌, 周世龙, 苗文娟, 等. 微波辐射对小麦胚芽糊化特性与微观结构的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 151-157.
- XU Bin, ZHOU Shi-long, MIAO Wen-juan, et al. Effects of microwave irradiation on gelatinization characteristics and microstructure of wheat germ [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 151-157.
- [26] GUO Peng, YU Jing-lin. Mechanisms of starchgelatinization during heating of wheat flour and its effect on in vitro starch digestibility[J]. Food Hydrocoll, 2018, 82: 370-378.
- [27] MIAO Ming, ZHANG Tao, JIANG Bo. Characterisations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 1 025-1 032.
- [28] 马岁祥, 李涛, 宋洪波, 等. 过热蒸汽改性典型晶型淀粉的理化性质研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(8): 99-106.
- MA Sui-xiang, LI Tao, SONG Hong-bo, et al. Study on the physical and chemical properties of superheated steam modified typical crystalline starch[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 18(8): 99-106.
- [29] PETCHARAT Jaiboon, NATTAPOL Poomsaad, PATCHAREE Tungtrakul, et al. Improving head rice yield of glutinous rice by novel parboiling process[J]. Taylor and Francis, 2016, 34(16): 1 991-1 999.
- [30] CHAIWAT Rattanamechaiskul, NITTAYA Junka, SOMKIAT Prachayawarakorn, et al. Modeling the improved textural properties of purple waxy rice dried through fluidization [J]. Drying Technology, 2018, 36(9): 1 061-1 075.
- [31] 苗宇叶, 姚亚亚, 刘阳星月, 等. 超高静压改性麦麸对其功能性质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(19): 164-171.
- MIAO Zi-ye, YAO Ya-ya, LIU Yang-xing-yue, et al. Effects of ultra-high static pressure modification on functional properties of wheat bran[J]. Food Science, 2019, 40(19): 164-171.
- [32] 康丽君, 寇芳, 沈蒙, 等. 响应面试验优化小米糠膳食纤维改性工艺及其结构分析[J]. 食品科学, 2017, 38(2): 240-247.
- KANG Li-jun, KOU Fang, SHEN Meng, et al. Optimization of the modification process of rice bran dietary fiber by response surface test and its structure analysis [J]. Food Science, 2017, 38(2): 240-247.
- [33] 刘天一, 马莺, 陈历水, 等. 非晶化玉米淀粉的制备及其结构表征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(2): 286-291.
- LIU Tian-yi, MA Ying, CHEN Li-shui, et al. Preparation and characterization of amorphous corn starch [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(2): 286-291.
- [34] 康丽君. 小米糠膳食纤维结构分析及体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2017: 29-30.
- KANG Li-jun. Analysis of dietary fiber structure of millet bran and its inhibition of α -glucosidase activity in vitro [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017: 29-30.
- [35] SHARMA M, YADAV D N, SINGH A K, et al. Rheological and functional properties of heat moisture treated pearl millet starch[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(10): 6 502-6 510.
- [36] 朱怡婷, 李状, 黄晓兵, 等. 超微粉碎对毛竹笋微观结构及营养成分的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(5): 937-941.
- ZHU Yi-ting, LI Zhuang, HUANG Xiao-bing, et al. Effect of superfine grinding on microstructure and nutrients of phyllostachys pubescens shoot[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(5): 937-941.
- [37] 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 Xiao-jiao, BAI Ting, WANG Shan-shan, et al. Effects of different treatments on activities and quality of fat oxidase in Highland barley[J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 39-44.
- [38] 景新俊. 不同热加工对萌动青稞加工特性和营养作用的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2019: 12-13.
- JING Xin-jun. Effects of different thermal processing on processing characteristics and nutrition of germination highland barley[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2019: 12-13.