DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80401

糙米粉粒径对糙米直条米粉品质的影响

熊绍百[1] 杨晓莉[2] 陈婷婷[1,3] 罗舜菁[1,3] 刘成梅[1,3]

（1. 南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室,江西 南昌 330047; 2. 江西金农米业集团有限公司,江西 宜春 336400; 3. 江西南大国创院食品科技有限公司,江西 南昌 330200）

摘要:[**目的**]改善糙米直条米粉品质。[**方法**]采用低温冲击磨制备平均粒径($D_{[4,3]}$)分别为370,86,62,47,30 μm的糙米粉,并分别制备糙米直条米粉,考察糙米直条米粉淀粉短程有序结构、晶体结构、蒸煮品质和质构特性。[**结果**]糙米直条米粉淀粉短程有序度和相对结晶度随着粒径的减小呈先升后降的趋势,硬度和咀嚼性也呈先升后降的趋势,由适中粒径($D_{[4,3]}$为86 μm)糙米粉制作的糙米直条米粉的淀粉短程有序度和相对结晶度最高,硬度和咀嚼性最大,品质最好。[**结论**]适度粉碎有利于糙米粉中的淀粉在直条米粉制作过程中形成更有序的结构,提高糙米直条米粉的硬度和咀嚼性。

关键词:糙米;粒径;淀粉结构;直条米粉;质构

The effect of brown rice flour particle size on the quality of brown rice noodles

XIONG Shaobai[1] *YANG Xiaoli*[2] *CHEN Tingting*[1,3] *LUO Shunjing*[1,3] *LIU Chengmei*[1,3]

（1. *State Key Laboratory of Food Science and Resources*, *Nanchang University, Nanchang*, *Jiangxi* 330047, *China*; 2. *Jiangxi Jinnong Rice Industry Group Co., Ltd., Yichun*, *Jiangxi* 336400, *China*; 3. *International Institute of Food Innovation Co., Ltd.*, *Nanchang University*, *Nanchang*, *Jiangxi* 330200, *China*）

Abstract: [**Objective**] This study aimed to investigate the effect of brown rice particle size on the quality of brown rice noodles. [**Methods**] Brown rice flours with average particle sizes ($D_{[4,3]}$) of 370, 86, 62, 47, and 30 μm were prepared using low-temperature impact milling. Noodles were made from each flour, and their starch short-range ordered structure, crystalline structure, cooking quality, and texture properties were analyzed. [**Results**] Both the short-range order and relative crystallinity of starch in brown rice noodles first increased and then decreased with decreasing particle size. Hardness and chewiness also followed this trend. Noodles prepared from flour with a moderate particle size ($D_{[4,3]}$ of 86 μm) showed the highest starch order, crystallinity, hardness and chewiness, indicating optimal quality. [**Conclusion**] Moderate milling produces brown rice flour with an ordered structure, enhancing the hardness, chewiness and overall quality of brown rice noodles.

Keywords: brown rice; particle size; starch structure; rice noodles; texture

糙米直条米粉富含的膳食纤维和多酚可减缓淀粉的消化速率从而减缓餐后血糖的升高[1-2]。然而,采用传统方法制备的糙米直条米粉质构松散,品质较差[3],因为米糠韧性较强,传统的湿法粉碎方式难以粉碎米糠[4],而大粒径米糠的存在破坏了淀粉凝胶网络结构的连续性。Liu等[5]研究表明,随着米糠添加量的增加,精米粉的硬度和咀嚼性下降。

为提高糙米米粉的品质,Wu等[6]通过挤压膨化米糠再回添至精米粉末中以提升糙米米粉的硬度;Geng等[7]通过超声辅助纤维酶处理糙米粉提升糙米米粉的硬度和

基金项目:江西省重点研发计划(编号:20232BBF60023);江西省“双千计划”科技创新高端人才项目—自然科学类(编号:jxsq2023201042);全国重点实验室项目(编号:20232BCD44005);江西省中央引导地方科技发展资金项目(编号:20221ZDD02001)

通信作者:罗舜菁(1969—),女,南昌大学教授,硕士。E-mail:shunjingluo@ncu.edu.cn

陈婷婷(1987—),女,南昌大学副研究员,博士。E-mail:tingtingchen@ncu.edu.cn

收稿日期:2024-04-29 **改回日期:**2024-09-02

咀嚼性,但二者均未研究糙米粉粒径对糙米直条米粉质构的影响。Chen等[8]发现减小粒径可提高全麦面条的硬度和咀嚼性;Sozer等[9]发现减小粒径可提高全麦饼干的硬度;Luo等[10]研究表明,适当减小糙米粉碎粒径可提高糙米面包的内聚性。Heinio等[11]也认为谷物粉粒径是影响全谷物食品质构的关键因素之一。Yan等[4]研制了一种新型低温冲击磨并用于粉碎糙米,该设备能够有效粉碎米糠,粉末粒径达到微米级,远小于传统粉碎方式,且对淀粉的损伤较小。目前,有关糙米粉碎粒径对糙米直条米粉品质的影响尚未见报道。研究拟通过新型低温冲击磨在不同分级机频率下粉碎糙米得到不同粒径的糙米粉,并制作直条米粉,探究糙米粉粒径对糙米直条米粉品质的影响,旨在为全谷物糙米制品的适度加工提供理论指导。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

1.1.1　材料与试剂

籼糙米:市售;

总淀粉试剂盒、总膳食纤维试剂盒:爱尔兰Megazyme公司;

所用试剂均为国产分析纯。

1.1.2　主要仪器设备

低温冲击磨:自研定制,北京协同创新研究院;

双螺杆挤压机:FMHE36-24型,湖南富马科食品工程技术有限公司;

恒温恒湿培养箱:LRHS-250B型,上海博泰实验设备有限公司;

粒度分析仪:Mastersizer 3000型,英国Malvern公司;

傅里叶变换红外光谱仪:Nicolet iS10型,美国ThermoFisher公司;

X射线衍射仪:Bede D1 HR型,英国Bede公司;

质构分析仪:TA-XT Plus型,英国Stable公司。

1.2　方法

1.2.1　不同粒径糙米粉的制备　采用新型低温冲击磨粉碎糙米[4]。该设备可通过引风机引入冷空气确保粉碎过程全程低温,粒径达到要求的颗粒由旋风分离器及时收集,避免过度粉碎,能够有效粉碎米糠,同时获得的糙米粉粒径分布均匀且对淀粉的损伤较低。将7.5 kg糙米加至低温冲击磨中,选择分级机频率(5,10,15,20,30 Hz),并固定主机频率和引风机频率为30 Hz,获得对应的糙米粉,粉碎腔的温度控制在16.7~17.0 ℃,糙米粉从旋风分离器的出口处收集,按照分级机频率分别命名为BR5、BR10、BR15、BR20、BR30。

1.2.2　糙米粉的平均粒径测定　参考黄素君等[12]的方法略作修改。将样品用2 300 r/min的转速分散于蒸馏水中,折射率设置为1.53,遮光率为10%~20%。数据以D_{10}、D_{50}、D_{90}和$D_{[4,3]}$表示,分别对应累积频率10%、50%、90%的体积直径以及平均体积直径。

1.2.3　糙米直条米粉的制备　向糙米粉中加水至水分含量为30%,搅拌均匀,根据计算,BR5、BR10、BR15、BR20、BR30糙米粉的水分含量分别为9.84%,10.23%,10.41%,10.56%,10.64%。将糙米粉装入自封袋中,4 ℃静置12 h,使用双螺杆挤压机将糙米粉挤出成直径为2.0 mm、长度为80 cm的直条,并牵引悬挂于米粉杆上,直条之间保持一定间距防止粘连,挤压机的糙米粉进料量设定为5 kg/h,进水量为0.75 kg/h,螺杆转速为150 r/min,各段温度均为105 ℃。将挤出的直条放入恒温恒湿培养箱中,于40 ℃、相对湿度为95%条件下老化12 h,将直条从培养箱中取出,风干以获得糙米直条米粉。

1.2.4　糙米直条米粉的淀粉和膳食纤维含量　分别使用总膳食纤维试剂盒和总淀粉试剂盒进行测定。

1.2.5　糙米直条米粉的短程有序结构　根据谭心等[13]的方法,使用傅立叶红外光谱仪(FT-IR)获得糙米直条米粉的红外光谱。以溴化钾片为背景,样品扫描范围为4 000~400 cm^{-1},以4 cm^{-1}的分辨率扫描64次。将1 200~800 cm^{-1}的光谱进行自动基线校正、归一化和去卷积,峰宽为40 cm^{-1},增强因子为1.9,并对解卷积光谱进行峰拟合,计算1 047,1 022 cm^{-1}处峰强度的比值。

1.2.6　糙米直条米粉的晶体结构　根据朱洁等[14]的方法,采用X射线衍射仪(XRD)分析糙米米粉的晶体结构。扫描范围为0~60°,扫描速度为1.2 (°)/min。

1.2.7　糙米直条米粉的蒸煮品质分析

(1) 蒸煮时间:将直条米粉剪成10 cm的小段,放入沸水中开始计时,每30 s取出一根观察,煮至无硬芯后停止计时,所用时间即为直条米粉的最佳蒸煮时间。

(2) 蒸煮损失:根据Chen等[15]的方法,并按式(1)计算蒸煮损失。

$$C=\frac{M_1(1-W)(M_2-M_0)}{M_1(1-W)},\qquad(1)$$

式中:

C——蒸煮损失,%;

M_0——玻璃皿烘干恒重后的质量,g;

M_1——蒸煮前米粉的质量,g;

M_2——蒸煮后米粉与玻璃皿烘干恒重后的质量,g;

W——蒸煮前米粉的水分含量,%。

(3) 水分含量:按GB 5009.3—2016执行。

1.2.8　糙米直条米粉的质构　参照黄丽等[16]的方法略作修改。采用质构分析仪测定糙米直条米粉的质构,使用P/36R探头,测试条件:应变75%;测前、中、后速度均为0.8 mm/s;间隔时间2 s。米粉被剪成10 cm的小段,并煮至最佳蒸煮时间,然后迅速浸泡在冷水中,冷却至室温后

进行测定。

1.2.9　数据统计与分析　所有试验重复3次，结果以平均值±标准差表示。使用SPSS Statistics 26.0软件进行统计分析，使用Graph Pad Prism 9.0和Origin 2019软件作图。

2　结果与分析

2.1　糙米粉的平均粒径

由表1可知，BR5、BR10、BR15、BR20、BR30各组糙米粉的平均粒径（$D_{[4,3]}$）分别为370，86，62，47，30 μm，即低温冲击磨分级机频率越高，糙米粉的平均粒径越小。稻米胚乳中的平均细胞大小约为90 μm×50 μm[17−18]，BR10的平均粒径为86 μm，与细胞大小接近，细胞壁容易破裂，细胞壁的破裂可以释放淀粉颗粒，提高糙米粉的糊化性能[19]，从而提高糙米直条米粉的品质。随着粉碎粒径的继续减小，淀粉颗粒直接暴露在热能和机械能下，淀粉损伤增加[20]，同时纤维中水结合位点增加，加剧其对水分的竞争，减少了淀粉糊化的可用水[21−22]，从而降低糙米粉的糊化性能，可能会对糙米直条米粉的品质产生不利影响。

表1　糙米粉的平均粒径†

Table 1　Average particle size of brown rice flour　μm

样品	$D_{[4,3]}$	D_{10}	D_{50}	D_{90}
BR5	370.00±28.98^{a}	64.93±11.16^{a}	343.33±27.20^{a}	718.11±49.00^{a}
BR10	85.86±0.97^{b}	16.51±0.46^{b}	80.04±0.81^{b}	168.33±2.12^{b}
BR15	61.82±3.73^{c}	10.61±0.66^{c}	56.52±5.90^{c}	121.89±3.79^{c}
BR20	46.60±1.05^{d}	8.83±0.59^{c}	41.52±1.32^{d}	92.81±1.70^{d}
BR30	30.46±1.32^{e}	6.74±0.18^{c}	26.48±0.78^{e}	59.01±2.36^{e}

†　同列字母不同表示组间差异显著（$P<0.05$）。

2.2　糙米直条米粉的淀粉和膳食纤维含量

由表2可知，各组糙米直条米粉的淀粉含量和总膳食纤维（TDF）含量无显著差异，说明糙米粉碎过程中组分收集完全，未造成基本组成的变化。各组米粉的不溶性膳食纤维（IDF）含量和可溶性膳食纤维（SDF）含量无显著差异，说明纤维可溶性无差异，与普遍认为的粒径减小会导致一些不溶性纤维转化为可溶性纤维的结果不一致[23]。这可能是因为挤压作用引起的纤维可溶性转变消除了各组间由糙米粉碎粒径减小引起的纤维可溶性的差异。Ma等[24]对荞麦麸进行了挤压、蒸汽爆破、微波、焙烤、过热蒸气、超声和酶解等处理，发现具有高温、高压和高剪切力作用的挤压处理可显著改变纤维可溶性，其改善效果最好。

表2　糙米直条米粉的淀粉含量和膳食纤维含量

Table 2　Dietary fiber content and starch content of brown rice noodles　g/100 g

样品	淀粉	IDF	SDF	TDF
BR5	78.30±3.37	2.66±0.04	1.59±0.04	4.25±0.04
BR10	78.50±1.07	2.64±0.01	1.66±0.04	4.30±0.05
BR15	78.07±3.06	2.68±0.04	1.62±0.07	4.30±0.10
BR20	78.53±0.75	2.62±0.02	1.65±0.09	4.27±0.06
BR30	78.56±3.38	2.62±0.05	1.62±0.05	4.24±0.02

2.3　糙米直条米粉的短程有序结构

1 200~800 cm^{-1}的FT-IR光谱对淀粉分子构象敏感，1 047，1 022 cm^{-1}处的峰强度分别与淀粉分子的短程有序和无定形结构有关[13]。1 047 cm^{-1}与1 022 cm^{-1}处的峰强度比$R_{1\,047\,cm^{-1}/1\,022\,cm^{-1}}$越高，表明糙米直条米粉的淀粉短程有序度越高。由图1可知，随着糙米粉粒径的减小，$R_{1\,047\,cm^{-1}/1\,022\,cm^{-1}}$呈先升高后降低的趋势，说明糙米粉碎粒径的变化影响了淀粉短程有序结构的形成，适当减小糙米粉碎粒径有利于淀粉在直条米粉制作过程中形成短程有序结构，而过度粉碎则不利于短程有序结构的形成。徐丽等[25]将大豆分离蛋白与籼米粉混合制作米粉，发现米粉品质的提升可能与淀粉短程有序度升高相关。综上，糙米粉碎粒径引起的直条米粉淀粉有序度的变化可能最终影响直条米粉的品质。

2.4　糙米直条米粉的晶体结构

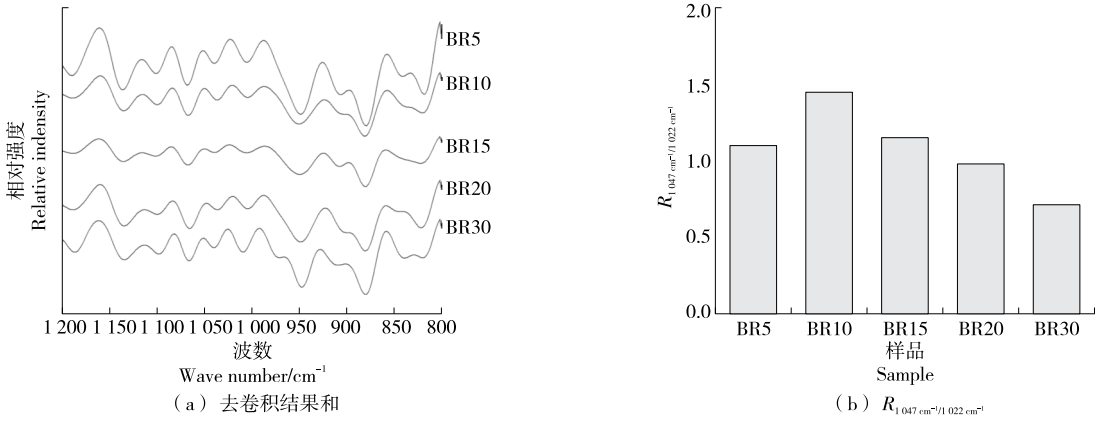
由图2可知，糙米直条米粉在13°，15°，17°，18°，20°，23°处有较强的衍射峰，在7.5°处有弱衍射峰，其中15°，17°，18°，23°处的衍射峰属于淀粉A型晶体，7.5°，13°，20°处的衍射峰属于淀粉V型晶体，说明糙米直条米粉的淀粉晶体结构为A＋V型，与Yan等[26]的研究结果一致。从BR5到BR10，糙米直条米粉的相对结晶度从26.20%增加到26.35%，从BR10到BR30，相对结晶度从26.35%减少到24.28%，与短程有序结构的变化趋势相似，说明适当减小糙米粉碎粒径有利于淀粉在直条米粉制作过程中形成晶体结构，而过度粉碎则不利于晶体结构的形成。Geng等[7]通过超声辅助酶处理将糙米粉的粒径（D_{90}）从140 μm降低至123 μm，制成的糙米米粉相对结晶度降低，与试验结果相似。

2.5　糙米直条米粉的蒸煮品质

由图3可知，糙米米粉的最佳蒸煮时间和蒸煮损失均随糙米粉粒径的减小呈先降后升再降的趋势，说明糙米米粉最佳蒸煮时间的长短影响了其蒸煮损失，而最佳蒸煮时间发生变化的原因尚不清楚，有待进一步研究。当平均粉碎粒径为86 μm时，最佳蒸煮时间最短，蒸煮损失最小。

2.6　糙米直条米粉的质构

由表3可知，当糙米粉平均粒径（$D_{[4,3]}$）从370 μm减小到86 μm时，糙米直条米粉的硬度和咀嚼性上升，当平均粒径从86 μm继续减小到30 μm时，糙米直条米粉的硬度



（a）去卷积结果和　　（b）$R_{1\,047\ cm^{-1}/1\,022\ cm^{-1}}$

图 1　糙米直条米粉的红外光谱图

Figure 1　Infrared spectra of brown rice straight vermicelli

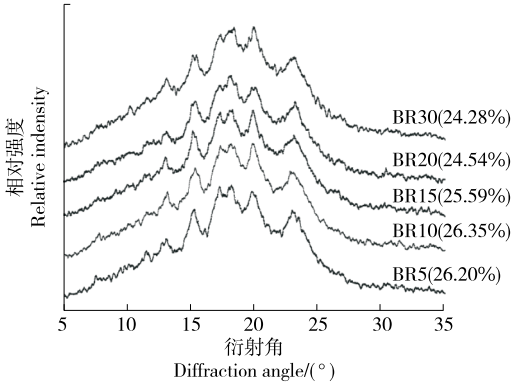


图 2　糙米直条米粉的 XRD 谱图

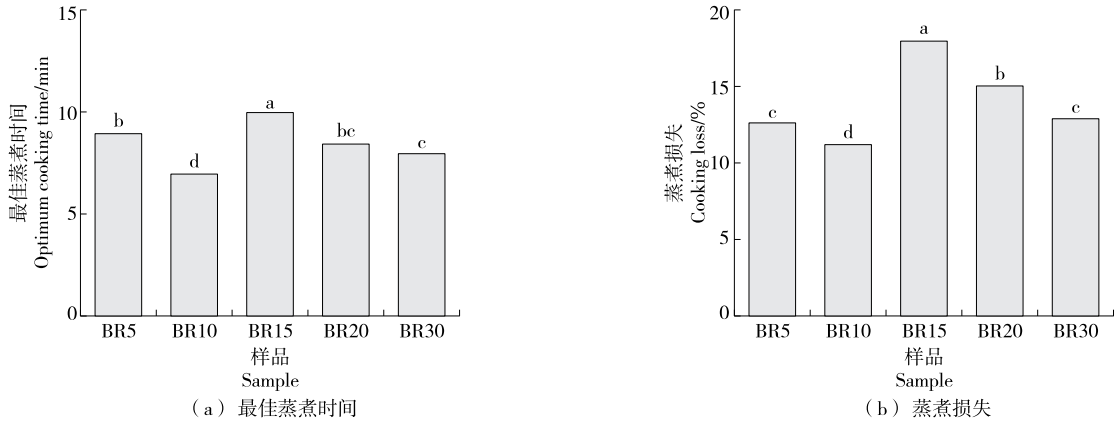
Figure 2　The XRD patterns of brown rice noodles

和咀嚼性反而下降。糙米直条米粉通常质地较软,咀嚼性较差。陈款等[27]通过纤维素酶处理,提高了制成的糙米米粉的硬度和咀嚼性,改善了糙米米粉的食用品质。试验结果表明,适当减小糙米粉碎粒径也可提高制成的米粉硬度和咀嚼性,改善糙米米粉的食用品质。

此外,随着糙米粉粒径的减小,糙米直条米粉的黏附性逐渐上升,可能是由于淀粉损伤的增加提高了蒸煮过程中淀粉的浸出,使直条米粉表面变黏[28]。综合来看,由平均粒径为 86 μm 的糙米粉制成的糙米直条米粉质构品质最佳,是因为其淀粉短程有序度和相对结晶度最高,结构更为有序。

3　结论

研究采用低温冲击磨制备了平均粒径($D_{[4,3]}$)分别为 370,86,62,47,30 μm 的糙米粉,并分别制备了糙米直条米粉。结果表明,糙米直条米粉淀粉短程有序度和相对结晶度、硬度和咀嚼性均随粒径的减小呈先升后降的趋势。粒径为 86 μm 糙米粉制备的糙米直条米粉淀粉短程有序度和相对结晶度最高,硬度和咀嚼性最大,品质最好。当采用合适的粉碎方式有效粉碎米糠后,糙米中主要成分淀粉的结构性质成为影响糙米直条米粉品质的关



（a）最佳蒸煮时间　　（b）蒸煮损失

字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)

图 3　糙米直条米粉的最佳蒸煮时间和蒸煮损失

Figure 3　Optimum cooking time and cooking loss of brown rice noodles

表 3　糙米直条米粉的质构†

Table 3　Texture of brown rice noodles

样品	硬度/N	黏附性/(g·s)	弹性	内聚性	咀嚼性
BR5	4.20±0.08^{b}	1.98±0.20^{c}	0.98±0.01	0.60±0.01^{a}	257.85±11.46^{b}
BR10	6.35±0.22^{a}	2.40±0.10^{bc}	0.99±0.00	0.52±0.01^{b}	341.07±7.18^{a}
BR15	4.29±0.07^{b}	2.73±0.12^{ab}	0.99±0.00	0.54±0.02^{b}	259.24±21.40^{b}
BR20	3.66±0.07^{c}	3.11±0.04^{a}	0.98±0.01	0.50±0.02^{b}	183.12±6.68^{c}
BR30	3.61±0.05^{c}	3.04±0.27^{a}	0.99±0.00	0.52±0.01^{b}	197.57±14.38^{c}

†　同列字母不同表示组间差异显著(P<0.05)。

键因素,当粉碎条件有利于避免淀粉颗粒被包裹或损伤时,可以改善制成的直条米粉品质。糙米直条米粉的最佳蒸煮时间变化较大且显著影响了其蒸煮损失,但目前其具体机制尚不清楚,有待进一步研究。

参考文献

[1] QI X, CHENG L, LI X, et al. Effect of cooking methods on solubility and nutrition quality of brown rice powder[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 444-451.

[2] WU N N, TAN B, LI S S, et al. Quality characteristics of extruded brown rice noodles with different amylose contents[J]. Food Science and Technology Research, 2018, 24(2): 311-319.

[3] 杨玎玲, 范冬雪, 吴继红, 等. 发芽、发酵对米粉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(12): 293-299.
YANG D L, FAN D X, WU J H, et al. The effects of germination and fermentation on rice flour[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17 (12): 293-299.

[4] YAN X, LIU C, HUANG A, et al. The nutritional components and physicochemical properties of brown rice flour ground by a novel low temperature impact mill[J]. J Cereal Sci, 2020, 92: 102927.

[5] LIU T, WANG K, XUE W, et al. In vitro starch digestibility, edible quality and microstructure of instant rice noodles enriched with rice bran insoluble dietary fiber[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 111008.

[6] WU N N, MA Z Q, LI H H, et al. Nutritional and cooking quality improvement of brown rice noodles prepared with extruded rice bran[J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(2): 346-354.

[7] GENG D H, LIN Z, LIU L, et al. Effects of ultrasound-assisted cellulase enzymatic treatment on the textural properties and in vitro starch digestibility of brown rice noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111543.

[8] CHEN J S, FEI M J, SHI C L, et al. Effect of particle size and addition level of wheat bran on quality of dry white Chinese noodles[J]. J Cereal Sci, 2011, 53(2): 217-224.

[9] SOZER N, CICERELLI L, HEINIO R L, et al. Effect of wheat bran addition on *in vitro* starch digestibility, physico-mechanical and sensory properties of biscuits[J]. J Cereal Sci, 2014, 60(1): 105-113.

[10] LUO S, YAN X, FU Y, et al. The quality of gluten-free bread made of brown rice flour prepared by low temperature impact mill[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129032.

[11] HEINIO R L, NOORT M W J, KATINA K, et al. Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods: a review[J]. Trends Food Sci Technol, 2016, 47: 25-38.

[12] 黄素君, 王月茹, 邓莉萍, 等. 高压射流磨处理对燕麦浆稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 1-6, 240.
HUANG S J , WANG Y R, DENG L P, et al. Effect of the high pressure jet mill treatment on the stability of oat pulp[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 1-6, 240.

[13] 谭心, 梁春艳, 邓松林, 等. 氧化玉米淀粉/明胶复合胶囊壳的制备与表征[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 188-193.
TAN X, LIANG C Y, DENG S L, et al. Preparation and characterization of oxidized corn starch/gelatin composite capsules[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 188-193.

[14] 朱洁, 崔波, 高伟, 等. 挤压吹塑过程中淀粉的粉、母粒、膜三态结构演变规律[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 23-28.
ZHU J, CUI B, GAO W, et al. Evolution of powder, master batch and film structure of starch in the process of extrusion blowing [J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 23-28.

[15] CHEN J, WANG L, XIAO P, et al. Informative title: incorporation of finger millet affects in vitro starch digestion, nutritional, antioxidative and sensory properties of rice noodles [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112145.

[16] 黄丽, 占柳菁, 梁露, 等. 羟丙基二淀粉磷酸酯对鲜湿方便米粉品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 177-180, 213.
HUANG L, ZHAN L J, LIANG L, et al. Effect of hydroxypropyl distarch phosphate on retrogradation and cooking quality of instant fresh rice noodle[J]. Food & Machinery, 2016, 32(7): 177-180, 213.

[17] LI C, HU Y, ZHANG B. Plant cellular architecture and chemical composition as important regulator of starch functionality in whole foods[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106744.

[18] TEPFER M, TAYLOR I E P. The permeability of plant-cell walls as measured by gel-filtration chromatography[J]. Science, 1981, 213(4 509): 761-763.

[19] HASJIM J, LI E, DHITAL S. Milling of rice grains: effects of starch/flour structures on gelatinization and pasting properties [J]. Carbohydr Polym, 2013, 92(1): 682-690.

（下转第 199 页）

[30] 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 M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Effects of ultrafine crushing on microstructure and functional properties of highland barley bran powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 278-286.

[31] 张增明. 绣球菌干燥、超微粉制备及其应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014: 31.
ZHANG Z M. The drying characteristics of *Sparassis crispa*, preparation and applications of its ultrafine powder[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014: 31.

[32] 梁晓君, 廖才学, 黄振勇, 等. 不同干燥和粉碎方式对玉木耳粉粉体特性和营养成分的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 96-100, 109.
LIANG X J, LIAO C X, HUANG Z Y, et al. Effects of different drying and grinding methods on the powder characteristics and nutritional components of *Auricularia nigricans* powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 96-100, 109.

[33] 刘丽娜, 王安建, 李顺峰, 等. 香菇柄热风干燥特性及微粉性质研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 126-131.
LIU L N, WANG A J, LI S F. et al. Study on hot air drying characteristics of mushroom stem and its properties of micro-powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(5): 126-131.

[34] 邵家威, 郝征红, 岳凤丽, 等. 振动式超微粉碎处理时间对白毛木耳多糖提取率及体外抗氧化性质的影响[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(3): 34-38.
SHAO J W, HAO Z H, YUE F L, et al. Effect of vibration ultrafine grinding time on extraction rate and antioxidant properties of *Auricularia polytricha* polysaccharide in vitro[J]. Food and Nutrition in China, 2019, 25(3): 34-38.

[35] 卢琪, 薛淑静, 杨德, 等. 不同加工方式对羊肚菌水提液鲜味及抗氧化性能的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 27-33.
LU Q, XUE S J, YANG D, et al. Effects of different processing methods on umami taste and antioxidant capability of water extracts of *Morchella esculenta*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 27-33.

(上接第 178 页)

[20] GUO X, HE X, DAI T, et al. The physicochemical and pasting properties of purple corn flour ground by a novel low temperature impact mill[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102825.

[21] DHITAL S, SHRESTHA A K, GIDLEY M J. Effect of cryo-milling on starches: functionality and digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(2/3): 152-163.

[22] LIU C, LIANG R, DAI T, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57: 55-61.

[23] LU Z, YE F, ZHOU G, et al. Micronized apple pomace as a novel emulsifier for food O/W pickering emulsion[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127325.

[24] MA Q, YU Y, ZHOU Z, et al. Effects of different treatments on composition, physicochemical and biological properties of soluble dietary fiber in buckwheat bran[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102517.

[25] 徐丽, 刘艳兰, 蔡吉祥, 等. 大豆分离蛋白提升鲜湿米粉凝胶品质的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(9): 54-60.
XU L, LIU Y L, CAI J X, et al. Soy protein isolate improving gel quality of fresh rice noodles[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(9): 54-60.

[26] YAN X, WU J, ZHAO C, et al. Chinese rice noodles form the viscoelastic texture by dual high-temperature retrogradation: an insight into the mechanism[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 189: 115496.

[27] 陈款, 周游, 庄坤, 等. 纤维素酶处理改善糙米米线食用品质的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(4): 168-175.
CHEN K, ZHOU Y, ZHUANG K, et al. Improving the edible quality of brown rice noodles by cellulase treatment[J]. Food Technology, 2023, 48(4): 168-175.

[28] HEO S, LEE S M, SHIM J H, et al. Effect of dry- and wet-milled rice flours on the quality attributes of gluten-free dough and noodles[J]. J Food Eng, 2013, 116(1): 213-217.

(上接第 191 页)

[26] 郭锦宁, 刘幼强, 何松贵, 等. 米根霉麸曲提高豉香型白酒中乳酸乙酯的含量[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 84-90.
GUO J N, LIU Y Q, HE S G, et al. Application of *Rhizopus oryzae* Fuqu to increase ethyl lactate content in Chi-flavor Baijiu [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 84-90.

[27] 郑自强, 卫春会, 张立伟, 等. 中高温大曲中霉菌的分离及其麸曲制备[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 165-172.
ZHENG Z Q, WEI C H, ZHANG L W, et al. Isolation of mold from medium high temperature Daqu and preparation of Fuqu[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 165-172.

[28] 夏玮, 谢军, 黄丹, 等. 异常威克汉逊酵母的麸曲制作工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(22): 118-123.
XIA Y, XIE J, HUANG D, et al. Optimization of processing technology of Fuqu with *Wickerhamomyces anomalus*[J]. Food Research and Development, 2018, 39(22): 118-123.

[29] 刘茗铭, 边名鸿, 赵金松, 等. 纯种酒曲强化剂的制备及其工艺优化[J]. 酿酒, 2022, 49(1): 47-52.
LIU M M, BIAN M H, ZHAO J S, et al. Preparation and process optimization of purebred Jiuqu fortifier[J]. Brewing, 2022, 49(1): 47-52.

[30] 刘延波, 张丽婷, 赵志军, 等. 赊店老酒大曲中耐高温霉菌的筛选与产酶条件优化[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5): 268-275.
LIU Y B, ZHANG L T, ZHAO Z J, et al. Screening of molds with high temperature resistance and optimization of enzyme [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(5): 268-275.