

蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺改善速食米粉冲调分散性和预消化性

戴晓慧^{1,2}, 张名位², 马永轩², 池建伟², 刘磊², 黄菲², 贾栩超², 马勤², 张瑞芬²

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 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, 广东广州 510610)

摘要: 为建立具有良好冲调分散性和消化特性的速食米粉加工技术, 本研究以大米为原料, 分析了蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺对速食米粉冲调分散性、淀粉糊化度、体外消化特性、以及可溶性蛋白和还原糖含量等的影响。结果表明, 与直接挤压膨化相比, 蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉的水溶性指数提高了 96.60%, 吸水性指数、结块率及分散时间分别降低了 72.68%、51.39%及 38.27%, 米糊的粘度也显著降低, 且该速食米粉在低剪切速率下具有较低粘度, 其粘度曲线趋于平直; 其休止角及滑角均显著降低, 说明蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺显著改善了速食米粉的冲调分散性及其粉体流动性。此外, 蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉的亮度和总色度显著低于直接挤压膨化, 产生了肉眼可见的色差。蒸汽酶解调质-挤压膨化处理还显著增加了速食米粉的可溶性蛋白和还原糖含量, 其快消化淀粉比例也较直接挤压膨化明显提高。总之, 蒸汽酶解调质-挤压膨化较直接挤压膨化进一步改善了速食米粉的冲调特性及其预消化性。

关键词: 速食米粉; 蒸汽酶解调质; 挤压膨化; 冲调分散性; 预消化性

文章编号: 1673-9078(2020)10-200-209

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.10.0327

Extrusion Pretreated by Steam Conditioning Accompanying Starch Enzymolysis Improved the Dispersibility and Predigestion of Instant Rice Flour

DAI Xiao-hui^{1,2}, ZHANG Ming-wei², MA Yong-xuan², CHI Jian-wei², LIU Lei², HUANG Fei², JIA Xu-chao², MA Qin², ZHANG Rui-fen²

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Sericultural & Agri-Food Research 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)

Abstract: To establish preparation technique of instant rice flour with desirable dispersibility and digestive characteristics, the effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on the dispersibility and predigestion of extrusion-cooked instant rice

引文格式:

戴晓慧, 张名位, 马永轩, 等. 蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺改善速食米粉冲调分散性和预消化性[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 200-209

DAI Xiao-hui, ZHANG Ming-wei, MA Yong-xuan, et al. Extrusion pretreated by steam conditioning accompanying starch enzymolysis improved the dispersibility and predigestion of instant rice flour [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 200-209

收稿日期: 2020-04-09

基金项目: 广东省重点研发计划项目 (2019B020213002); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400502); 广州市科技计划 (201807010061; 201903010033); 广东省科技计划 (2018A050506049); 广东省级乡村振兴战略专项 (2019KJ105); 广东省农业科学院十三五学科团队建设项目 (201602TD)

作者简介: 戴晓慧 (1995-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 食品工程

通讯作者: 张瑞芬 (1976-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 营养健康食品

flour were analyzed in this work. The dispersibility, gelatinization properties and *in vitro* digestion properties of starch, the contents of soluble protein and reducing sugar were determined in the instant rice flour samples cooked by extrusion with or without pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis. The results showed that compared with simple extrusion, the technology of extrusion pretreated by steam conditioning accompanying starch enzymolysis increased the water solubility index of the instant rice flour by 96.60 %, decreased the water absorption index, agglomerate rate, dispersion time by 72.68%, 51.39%, and 38.27%, respectively, while the viscosity of the rice paste was significantly decreased. The instant rice flour was prepared by the new technology had lower viscosity at low shear rate, and its viscosity curve tended to be straight. Besides, the pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis decreased the angle of repose and slio angle of the rice flour, indicating that the dispersibility and fluidity of the instant rice flour were significantly improved by the technology of extrusion pretreated by steam conditioning accompanying starch enzymolysis. In addition, the brightness and total chroma of instant rice flour prepared by the new technology were significantly lower than those prepared by simple extrusion, resulting in visible chroma difference. The contents of reducing sugar and soluble protein in the instant rice flour were significantly increased after the pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis. Besides, the proportion of rapidly digestible starch was also increased after the pretreatment of steaming conditioning accompanying starch enzymolysis. In conclusion, compared with simple extrusion, the technology of extrusion pretreated by steam conditioning accompanying starch enzymolysis could improve the dispersibility and the predigestion of instant rice flour.

Key words: instant rice flour; steam conditioning accompanying starch enzymolysis; extrusion; dispersibility; predigestion

大米是最重要的谷类作物之一，也是世界上半以上人口的主食。作为我国第一粮食作物，大米为全世界人口提供了 40% 的热量^[1,2]。然而，大米的传统食用方式主要是蒸、煮，产品形式单一，无法满足现代人对食品多样化的需求^[3]。随着生活节奏加快，糊粉类营养方便食品愈来愈受到消费者的青睐^[4]。速食米粉口感腻滑，食用方便，既可以直接冲调食用，也是芝麻糊、麦片等许多糊粉类营养方便食品的重要基质成分。

挤压膨化是一种重要的谷物熟化加工方式。除生产效率之外，挤压膨化过程中，谷物中一定比例的淀粉、蛋白质、脂肪等大分子物质在高温、高压、高剪切力的作用下被切断成小分子物质^[5]，能够改善产品的消化特性，并延长其储存时间，因此该技术成为生产速食米粉的一项重要的加工技术^[6]。然而，由于大米淀粉含量高，挤压膨化工艺制备的速食米粉一直存在产品粘度高、冲调分散性差等问题，产品品质不能很好地满足消费者需求。近年来，许多研究者开展了优化挤压膨化制备速食米粉的加工工艺的系列研究。

前期研究发现，将高温 α -淀粉酶酶液与谷物粉均匀混合后进行挤压膨化可以降低膨化谷物粉的结块率和粘度，提高其水溶性等^[7,8]。尽管该工艺能够在一定程度上改善速食米粉的冲调特性，但是由于挤压膨化工艺存在温度高、时间短等特点，导致淀粉酶与底物的有效作用时间过短，酶解作用有限。因此，赵志浩等^[9]将加入高温 α -淀粉酶液的糙米粉用高压蒸汽灭菌处理后，再进行挤压膨化，显著提高了糙米粉的冲调分散性和淀粉消化性能。然而，该工艺存在过程繁琐、

耗时长、操作不便等缺陷，有待进一步改进和完善。

蒸汽调质是物料在挤压膨化前通过蒸汽处理达到调温调湿目的的预处理过程，具有杀灭有害微生物、促进淀粉糊化、提高淀粉消化率等效果^[10]。杨景焄^[11]等研究发现在蒸汽加工处理过程中，淀粉颗粒会发生凝胶化，其颗粒间有序的排列被破坏，使其更容易被淀粉酶分解成可溶性小分子糖类。上述研究发现提示，在原料蒸汽调质的过程中，加入一定量的高温 α -淀粉酶可能会提高淀粉的酶解效果，从而进一步改善挤压膨化速食米粉的冲调特性。

基于此，本研究以大米为原料，比较了施加蒸汽酶解调质预处理对挤压膨化制备的速食米粉的冲调性、粉体流动性、淀粉糊化度和体外消化特性以及可溶性蛋白、还原糖含量等的影响，旨在为速食米粉的加工技术创新提供依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

大米（粳米），广州市增城泰稷发展有限公司；高温 α -淀粉酶，诺维信（中国）生物技术有限公司，酶活 44000 U/mL。

1.2 主要仪器设备

XMD-700W 型双螺杆膨化机，牧羊集团；SCTZ10 型调质器，牧羊集团；SY-2200 型磨粉机，广州善友机械设备有限公司；Heraeus Multifuge X1 型离心机，美国 Thermo 公司；AR-1500ex 型流变仪，美国 TA 公司；DHG-9425 型电热恒温鼓风干燥箱，上海一恒科

学仪器有限公司; MV-1000WX 型振荡器, 日本东京理化 EYELA; SQP224 型电子天平, 北京市赛多利斯科学仪器有限公司; UltraScan VIS 型色差仪, 美国 HunterLab 公司; UV-1240 型紫外可见分光光度计, 日本岛津分析仪器公司; DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器, 巩义市予华仪器有限责任公司; StarchMaster2 型 RVA 快速粘度仪, Perten 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 蒸汽酶解调质-挤压膨化速食米粉的制备方法

大米粉碎至 20~30 目, 按 500 U/g (以大米粉质量计) 添加高温 α -淀粉酶并混合均匀, 调节水分含量至 16%, 将混合均匀后的大米粉置于调质器中进行蒸汽酶解调质处理 2 min, 再送入双螺杆挤压膨化机进行挤压膨化。其中, 蒸汽调质处理的蒸汽温度为 95 °C, 蒸汽压力为 0.5 MPa; 挤压膨化机前段、中段和末段温度分别为 55 °C、100 °C 和 138 °C, 螺杆转速 240 r/min, 螺杆直径为 56 mm。待挤压膨化机出料稳定后收集挤出物, 挤出物粉碎至全部过 60 目筛, 得到蒸汽酶解调质-挤压膨化速食米粉样品。所得样品在 4 °C 密封保存备用。

1.3.2 挤压膨化速食米粉的制备方法

大米粉碎至 20~30 目, 调节水分含量至 16%, 进入双螺杆挤压膨化机进行挤压膨化。其中, 挤压膨化条件与 1.3.1 保持一致。待挤压膨化机出料稳定后收集挤出样品, 挤出物粉碎至全部过 60 目筛, 得到直接挤压膨化的速食米粉样品。所得样品在 4 °C 密封保存备用。

1.3.3 水溶性指数 (WSI) 和吸水性指数 (WAI) 的测定

参考 Anderson^[12]的方法略加修改。准确称取不同工艺制得的速食米粉 2.50 g 于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 去离子水, 以 230 r/min 的速率振摇 30 min, 然后 4000 r/min 离心 15 min, 分离上清液和沉淀物。上清液倾倒入恒重的称量盒中, 在 105 °C 下的烘箱中蒸发至恒重。WSI 和 WAI 按下式计算:

$$WSI / \% = \frac{\text{上清液蒸发干后残余物质量}}{\text{样品干重}} \times 100\%$$

$$WAI = \frac{\text{离心后沉淀物质量}}{\text{样品干重}}$$

1.3.4 结块率的测定

参考刘静波^[13]的方法并略作修改。准确称取不同工艺制得的速食米粉 20.00 g 于 500 mL 烧杯中, 加入 80 °C 去离子水 180 mL, 单向搅拌 30 s, 静置 10 min

后, 倒入干燥至恒重的 20 目筛对米糊进行过滤, 筛上物用清水漂洗一次后, 连同筛网置于 105 °C 恒温干燥箱内烘干至恒重。结块率计算公式如下:

$$\text{结块率} / \% = \frac{\text{筛网及结块的质量} - \text{筛网质量}}{\text{样品干重}} \times 100\%$$

1.3.5 分散时间的测定

参考张艳^[14]的方法并略作修改。准确称取不同工艺制得的速食米粉 2.50 g, 加入温度保持在 70 °C 的 100 mL 水中, 用恒温磁力搅拌器以 30 r/min 的速率搅拌, 记录从开始加入粉体到完全分散所需的时间, 每个样品重复测定 5 次。

1.3.6 休止角的测定

参考 Shittu^[15]的方法。取适量速食米粉置于 250 mL 量筒中, 使之达到 200 mL 刻度线处, 用棉花塞住量筒口, 将量筒倒置固定, 保持量筒口与水平面距离为 20 cm, 迅速抽出棉花, 样品受重力作用而在水平面堆积成圆锥体。测量所堆积成圆锥体的底面直径 (d) 和高 (h), 每个样品重复测定 5 次。休止角计算公式如下:

$$\text{休止角} / ^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{2h}{d} \right)$$

1.3.7 滑角的测定

参考 Ileleji^[16]的方法。准确称取不同工艺制得的速食米粉 3.00 g 于玻璃板上, 将玻璃板一端置于水平面上, 另一端缓缓抬升至约 90% 样品发生移动, 测定玻璃板长度 L 和玻璃板上端与水平面的垂直距离 h , 每个样品重复测定 5 次。滑角计算公式如下:

$$\text{滑角} / ^\circ = \sin^{-1} \left(\frac{h}{L} \right)$$

1.3.8 流变特性的测定

参考赵志浩^[9]的方法并略作修改。称取 20.00 g 速食米粉分散于 80 mL 80 °C 热水中。使用装配有 40 mm 直径铝平板夹具的 AR-1500ex 流变仪, 夹具与样品台的间距设为 1 mm, 温度 25 °C, 角频率范围 0.01~200 rad/s。将适量米糊样品置于流变仪样品台上, 保持 10 min 以消除残余应力; 操作流变仪夹具平板下移, 移除夹具边缘溢出的样品, 启动程序进行测定。

1.3.9 色度的测定

使用 UltraScan VIS 色度仪测量产品的颜色, 将一定量的速食米粉置于石英皿中, 置于样品架上测定, 其中光圈的直径为 19 mm。使用国际照明委员会 (CIE) 颜色色度标度, 得到 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值, 并计算总色度值 E^*ab 和色差值 ΔE^* 。

$$\text{总色度 } E^*ab = \left(L^{*2} + a^{*2} + b^{*2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{色差}\Delta E^* = \left[(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

1.3.10 还原糖含量的测定

参考文伟等^[17]的方法并稍加改进。准确称取 2.00 g 速食米粉, 置于 100 mL 离心管中, 加去离子水 30 mL, 室温下震荡 30 min, 4000 r/min 离心 10 min, 取上清定容至 50 mL, 采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定其还原糖含量。

1.3.11 可溶性蛋白含量的测定

使用考马斯亮蓝试剂盒对可溶性蛋白质含量进行测定。准确称取速食米粉 1.00 g, 加入 9 mL 的生理盐水混匀制成悬浊液, 2500 r/min 离心 10 min 后, 取上清定容至 25 mL。取定容后的上清液 50 μ L, 加入 3.0 mL 考马斯亮蓝显色剂, 混匀并静置 10 min, 595 nm 波长下测定吸光值 A_1 。50 μ L 去离子水代替样液做空白对照, 测得吸光值为 A_0 , 50 μ L 蛋白标准品 (浓度为 0.524 g/L 的牛血清白蛋白) 做标准对照, 测得吸光值为 A_2 。

$$\text{可溶性蛋白含量} / (\text{g} / \text{L}) = \frac{A_1 - A_0}{A_2 - A_0} \times 0.524$$

1.3.12 淀粉糊化度的测定

参考赵志浩^[9]的方法。准确称取 0.1000 g 样品, 加入 49 mL 去离子水使其溶解, 加入 10 mol/L 的 KOH 溶液 1 mL, 缓慢磁力搅拌 5 min, 4500 r/min 离心 10 min, 取 1.0 mL 上清液, 加入 0.4 mL 浓度为 0.5 mol/L 的 HCl 溶液, 用去离子水定容至 10 mL, 再加 0.1 mL 碘液 (0.5 g 碘和 2 g 碘化钾定容至 50 mL), 混合均匀后 600 nm 波长下测定吸光值 A_1 ; 在测定过程中, 将去离子水体积替换为 47.5 mL, KOH 溶液体积替换为 2.5 mL, HCl 溶液体积替换为 1.0 mL, 其他操作相同, 所测得吸光值为 A_2 。

$$\text{糊化度} / \% = \frac{A_1}{A_2} \times 100\%$$

1.3.13 淀粉体外消化特性的测定

参考 Englyst 等^[18]的方法, 并稍加改进。准确称取 0.30 g 速食米粉, 使样品均匀分散于 10 mL 醋酸缓冲液 (浓度为 0.2 mol/L, pH 为 5.2), 加入 10 mL 混合酶液 (猪胰 α -淀粉酶和糖化酶浓度分别为 290 U/mL 和 15 U/mL), 37 $^{\circ}\text{C}$ 、120 r/min 下水浴振荡。反应 0 min、20 min、120 min 后取 1 mL 酶解液, 加入 4 mL 去离子水稀释, 立即沸水浴灭酶 5 min, 流水冷却, 6000 r/min 离心 10 min, 取上清液定容至 10 mL。DNS 法测定定容后样液的还原糖含量。淀粉体外消化特性通过测定快消化淀粉 (RDS)、慢消化淀粉 (SDS) 和抗性淀粉 (RS) 的百分含量来表征, 其中, G_{20} 和 G_{120}

为消化 20 min 和 120 min 后酶解液中还原糖的量; FG 为反应消化前酶解液中还原糖的量; TS 为样品总淀粉的量。

$$\text{快消化淀粉RDS} / \% = \frac{G_{20} - FG}{TS} \times 0.9 \times 100\%$$

$$\text{慢消化淀粉SDS} / \% = \frac{G_{120} - G_{20}}{TS} \times 0.9 \times 100\%$$

$$\text{抗性淀粉RS} / \% = 100 - \text{RDS} - \text{SDS}$$

1.3.14 糊化特性的测定

参考 GB/T 24852-2010 的快速粘度仪法测定速食米粉的糊化特性。

1.3.15 数据统计与分析

使用 Microsoft Excel 2013 软件处理数据, 除特殊说明, 试验数据为 3 次平行测定结果, 表示为平均值 $\pm$ 标准差, 使用 SPSS Statistics 22.0 统计软件进行独立样本 T 检验分析; 使用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉冲调性和流动性的影响

吸水性指数 (WAI) 主要反映淀粉吸水膨胀形成凝胶的能力, 与淀粉糊化程度有关; 水溶性指数 (WSI) 主要是衡量挤压物中淀粉的降解程度, 与淀粉释放可溶性小分子的量有关^[19]; 结块率表明粉体溶于水后的结块情况; 分散时间则表明粉体溶于水的速度; 以上四个指标可以用来衡量粉体的冲调性。休止角和滑角主要用于反映粉体在重力作用下的流动性, 保证生产过程中具有足够的流动性则需要粉体的休止角 $< 45^{\circ}$ 。

蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉冲调性和流动性的影响如表 1 所示。由表可知, 与直接挤压膨化相比, 经蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺得到的速食米粉的 WAI、结块率及分散时间分别显著降低了 72.68%、51.39% 及 38.27%, WSI 显著提高了 96.60% ($p < 0.01$), 说明蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺能够显著改善速食米粉的冲调分散性。Xu 等^[20]研究发现挤压膨化时加入高温 α -淀粉酶处理后, 精米和糙米粉的 WAI 均有所下降, WSI 均有所升高, 与本研究结果一致; 本研究用蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺制得的速食米粉的 WSI 达到 70.01%, 高于 Xu 等^[20]高温 α -淀粉酶辅助挤压膨化处理的 67.93% 和许亚翠等^[21]在挤压膨化过程中加入高温 α -淀粉酶处理的 10.91%; 而米粉的 WAI 值 (1.18) 低于 Xu 等^[20]挤压膨化过程中加入高温 α -淀粉酶处理的 1.68, 表明蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺

对速食米粉的冲调分散性有更显著的改善作用。许亚翠等^[21]研究发现大米在挤压膨化过程中添加高温 α -淀粉酶能够显著降低米粉的结块率,与本研究有相似的结果。在蒸汽调质和挤压膨化过程中,高温 α -淀粉酶催化降解淀粉生成可溶性糖类物质,导致淀粉含量减少;同时,在淀粉酶、高温、蒸汽等的作用下,淀粉颗粒的晶体结构被破坏。上述两方面的原因均造成速食米粉的 WAI 值下降、WSI 值提高。

由表可知,与直接挤压膨化相比,蒸汽酶解调质

预处理后的速食米粉的休止角和滑角分别降低了 5.88%及 6.56% ($p<0.01$),说明蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺能够显著改善速食米粉的流动性。经蒸汽酶解调质预处理后,由于高温 α -淀粉酶对淀粉的酶解作用,导致膨化过程中淀粉分子糊化伸展并相互搭接成网状结构的能力降低,表现为挤出物的膨化率低于直接挤压膨化,粉体颗粒堆积密度大,分子间的作用力减弱,摩擦和粘附力降低,进而表现为粉体流动性改善^[22]。

表 1 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉冲调性和流动性的影响

Table 1 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on the dispersibility and fluidity of extrusion-cooked instant rice flour						
	WAI	WSI/%	结块率/%	分散时间/s	休止角/°	滑角/°
挤压膨化	4.32±0.16	35.61±1.04	41.74±1.41	38.67±2.03	39.11±1.03	40.53±1.46
蒸汽酶解调质-挤压膨化	1.18±0.04**	70.01±1.84**	20.29±1.50**	15.37±1.36**	36.81±1.15**	37.87±1.27**

注: **表示与挤压膨化制备样品比较差异达极显著 ($p<0.01$) 水平。

2.2 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉流变特性的影响

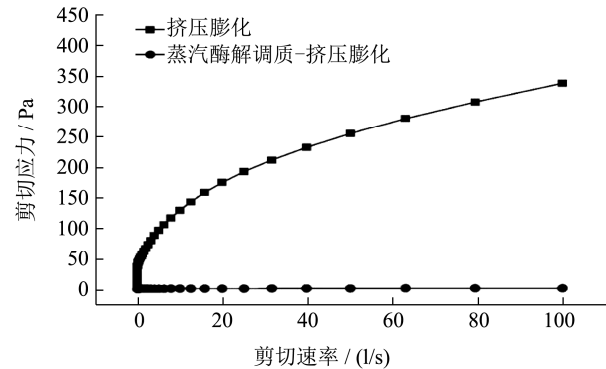


图 1 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉剪切应力的影响

Fig.1 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on the shear stress of extrusion-cooked instant rice flour

挤压膨化和蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉米糊的剪切应力与剪切速率之间的关系分别如图 1 所示。由图可知,两种速食米粉米糊的流变曲线不同程度的凸向剪切应力轴,属于非牛顿流体,故采用 Herschel-Bulkley 模型对流变曲线进行拟合分析,结果如表 2 所示。由表得知,拟合方程的相关系数 R^2 在

0.99 以上,表明拟合方程与流变曲线相关性良好。两种速食米粉米糊的流动特征指数 n 值分别为 0.4669 及 0.1732,且 n 值小于 1,表明两种米糊均为假塑性流体。此外,经蒸汽酶解调质-挤压膨化处理得到的速食米粉的屈服应力 τ_0 及稠度系数 k 分别为 0.0022 Pa 及 0.9189 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$,明显低于直接挤压膨化得到的 20.7435 Pa 及 37.3995 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$,表明蒸汽酶解调质预处理后挤压膨化速食米粉更易搅拌,启动流变仪只需要做更少的功即可使其开始流动^[23],且蒸汽酶解调质处理对淀粉糊体系起到了稀化作用,降低其粘稠性。由图可知,在相同剪切速率下,经蒸汽酶解调质-挤压膨化处理得到的速食米粉米糊的剪切应力明显小于直接挤压膨化(当剪切速率达到 100/s 时,直接挤压膨化得到速食米粉米糊的剪切应力为 338.28 Pa,而蒸汽酶解调质-挤压膨化处理得到的为 2.12 Pa)。淀粉是大米的主要成分,速食米粉米糊的流动性主要受淀粉分子的影响,其分子量越大,对流体流动产生的阻力越大^[24]。蒸汽酶解调质预处理使淀粉分子降解成相对小分子量的糊精等可溶性糖类物质,导致淀粉分子间的缠结点减少,流体流动阻力降低,从而导致在相同的剪切速率下,蒸汽酶解调质-挤压膨化处理后的速食米粉的剪切应力明显低于直接挤压膨化。

表 2 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉糊化特性的影响

Table 1 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on the pasting properties of extrusion-cooked instant rice flour				
	屈服应力 τ_0 / (Pa)	稠度系数 k / ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	流动指数 n	相关系数 R^2
挤压膨化	20.743	37.399	0.467	0.997
蒸汽酶解调质-挤压膨化	0.002	0.919	0.173	0.989

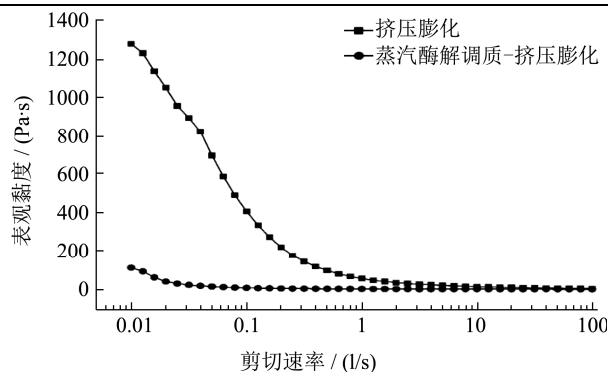


图2 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉表观粘度的影响

Fig.2 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on the viscosity of extrusion-cooked instant rice flour

挤压膨化和蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉米糊的表观粘度与剪切速率之间的关系如图2所示。由图可知,当剪切速率由0.1/s逐渐增加至100/s时,两种挤压膨化速食米粉米糊的表观粘度均呈现出明显的先降低后趋于平缓的变化趋势,呈现剪切稀释现象^[25],这是由于在挤压膨化和蒸汽酶解调质过程中,相互缠绕的淀粉分子链断裂,空间结构遭到破坏,使其粘性阻力降低,从而导致表观粘度下降;当剪切速率达到一定值时,分散的淀粉分子来不及取向或已经充分取向,使得表观粘度趋于稳定^[26]。经蒸汽酶解调质后制得的挤压膨化速食米粉米糊在较低的剪切速率下即呈现较低的粘度,其粘度曲线趋于平直,没有呈现出明显的剪切稀释现象;这与马永轩等^[27]关于高温 α -淀粉酶-挤压膨化耦合处理后糙米粉的粘度曲线图有相似结果。由图可知,蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉其米糊的粘度显著低于挤压膨化。该结果与2.1中两种速食米粉WSI、WAI、结块率及分散时间的测定结果一致,均表明蒸汽酶解调质预处理可

表3 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉色度的影响

Table 3 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on chroma of extrusion-cooked instant rice flour

	L^* (亮度)	a^* (红/绿)	b^* (黄/蓝)	E^*ab (总色度)	ΔE^* (色差)
挤压膨化	86.09±0.06	-1.04±0.04	7.27±0.06	86.40±0.05	-
蒸汽酶解调质-挤压膨化	83.47±0.09**	-0.40±0.02**	12.55±0.03**	84.41±0.09**	5.93

注: **表示与挤压膨化制备样品比较差异达极显著 ($p<0.01$) 水平。

2.4 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉可溶性蛋白、还原糖含量和糊化度的影响

蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉可溶性蛋白、还原糖含量和糊化度的影响如表4所示。由表可知,与直接挤压膨化相比,蒸汽酶解调质-挤压膨化处理后

以显著改善挤压膨化速食米粉的冲调特性。

2.3 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉色度的影响

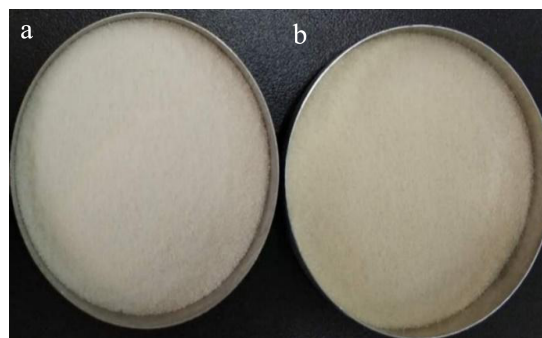


图3 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉色度的影响

Fig.3 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on chroma of extrusion-cooked instant rice flour

注: a: 挤压膨化; b: 蒸汽酶解调质-挤压膨化

蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉色度的影响如图3及表3所示。与直接挤压膨化相比,蒸汽酶解调质-挤压膨化处理后,速食米粉的亮度 L^* 、总色度 E^*ab 分别由86.09、86.40显著降低至83.47和84.41,红/绿值 a^* 及黄/蓝值 b^* 分别由-1.04、7.27显著提高至-0.40、12.55 ($p<0.01$);由产品图片可以看出,蒸汽酶解调质预处理与直接挤压膨化制备的速食米粉存在肉眼可分辨的色差,其色差值为5.93。在蒸汽酶解调质过程中,米粉中淀粉部分降解为还原糖,促进了美拉德反应和焦糖化反应,导致粉体的亮度及总色度显著降低^[28]。与本研究结果相类似,张冬媛^[29]等研究发现经高温 α -淀粉酶处理后膨化糙米粉的亮度显著降低。

速食米粉的可溶性蛋白和还原糖含量分别由0.4%和3.2%增加至1.23%及25.61%,分别增加了2.07倍和7倍。蒸汽酶解调质过程中,在蒸汽的作用下,淀粉分子从原来紧密有序排列的结构变为无序状态,有利于高温 α -淀粉将其水解成糊精等可溶性糖类,导致还原糖含量大幅度增加。Razzaghi等^[30]发现玉米在添加蒸汽处理后挤压膨化,其蛋白质的降解程度较直接挤压

膨化有所增加。大米中的蛋白质与淀粉颗粒包络紧密^[31], 淀粉水解导致与其紧密结合的蛋白质暴露、分离^[32], 进而在挤压膨化的高温 and 剪切力的作用下, 分子间氢键、二硫键断裂, 造成蛋白质的降解破坏, 从而使其可溶性蛋白含量增加。这与刘磊等^[4]采用加酶挤压处理玉米全粉显著提高其可溶性蛋白及还原糖含量的发现相一致。

由表可知, 与直接挤压膨化相比, 蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺得到的速食米粉的糊化度由 90.79% 降低至 83.32%, 降低了 8.23%。研究表明挤压膨化过程

表 4 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉可溶性蛋白、还原糖含量和糊化度的影响 (以干基计)

Table 4 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on the contents of soluble protein and reducing sugar, and gelatinization degree of extrusion-cooked instant rice flour (In dry basis)

	可溶性蛋白质/%	还原糖/%	糊化度/%
挤压膨化	0.40±0.04	3.20±0.14	90.79±1.37
蒸汽酶解调质-挤压膨化	1.23±0.05**	25.61±0.34**	83.32±1.54**

注: **表示与挤压膨化制备样品比较差异达极显著 ($p<0.01$) 水平。

2.5 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉淀粉

体外消化特性的影响

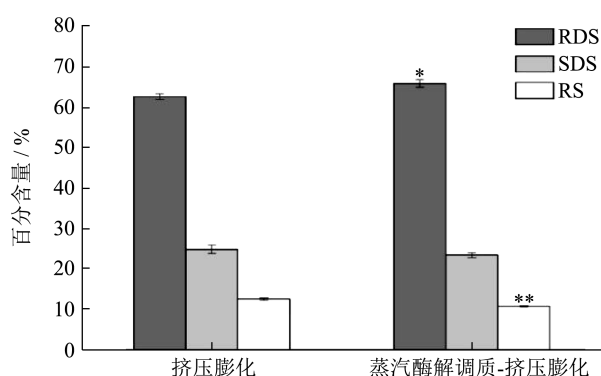


图 4 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉淀粉体外消化特性的影响

Fig.4 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on starch in vitro digestibility of extrusion-cooked instant rice flour

注: *和**表示与挤压膨化制备样品比较差异达显著 ($p<0.05$) 或极显著 ($p<0.01$) 水平。

蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉淀粉体外消化特性的影响如图 4 所示。结果表明, 与直接挤压膨化相比, 蒸汽酶解调质-挤压膨化处理得到的速食米粉的快消化淀粉 (RDS) 含量由 62.62% 显著提高至 65.84% ($p<0.05$), 提高了 5.14%; 慢消化淀粉 (SDS) 含量由 24.78% 降低至 23.40% ($p>0.05$); 抗性淀粉 (RS) 含量由 12.41% 显著降低至 10.65%, 降低了 14.18% ($p<0.01$), 说明蒸汽酶解调质处理进一步改善了挤压

中淀粉的糊化度与原料的含水量有密切关系^[22]。在蒸汽酶解调质过程中, 由于高压蒸汽的作用使得原料中水分含量较高, 水分的润滑剂作用使得物料挤压膨化时受到的剪切力、摩擦力急剧下降, 物料在机筒内停留时间缩短, 导致淀粉糊化度降低。同时, 淀粉酶作用造成淀粉水解使得膨化机腔体内熔融状态下的物料粘度降低, 也是导致其糊化度降低的原因^[33]。这与赵志浩^[9]等采用预酶解-挤压膨化处理全谷物糙米粉显著降低其淀粉糊化度的结果相一致。

膨化速食米粉的消化特性, 使其更容易被人体消化。已有的研究结果表明蒸汽调质预处理^[34]和淀粉酶酶解^[35]均有利于提高淀粉的消化率, 与本研究的结果相一致。高温蒸汽的糊化和淀粉酶的作用下, 淀粉颗粒结构破坏程度更高, 有利于消化酶的水解作用^[36], 可能是蒸汽酶解调质预处理较直接挤压膨化提高 RDS 比例的主要原因。如前所述, 蒸汽酶解调质处理导致挤压膨化速食米粉中还原糖含量大幅升高, 有研究表明, 还原糖有降低糊化淀粉重结晶程度的作用^[37]。因此, 蒸汽酶解调质导致还原糖增加抑制 RS 的形成可能是造成速食米粉中 RS 比例降低的重要原因。

2.6 蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉糊化特性的影响

蒸汽酶解调质对挤压膨化速食米粉糊化特性的影响如图 5 及表 5 所示。由图可知, 两种速食米粉的糊化特性差异显著。其中直接挤压膨化制得的速食米粉随着温度的升高, 其淀粉颗粒在水中受热发生膨胀, 导致米糊粘度增大, 当米糊粘度增加至峰值粘度 407.67 cp 后, 淀粉颗粒因过度吸水而发生破裂, 会导致米糊粘度逐渐降低至最低粘度 120.33 cp, 随后温度降低, 部分淀粉分子在氢键的作用下老化结晶, 使得米糊粘度再次升高^[38]; 对比直接挤压膨化, 蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉米糊的粘度显著降低且不随温度的变化而发生改变, 其糊化特征曲线基本呈现一条直线, 说明蒸汽酶解调质预处理后可使挤压膨化速食米粉在较低的温度下即可达到较高的糊化

度,这与 Govindasamy 等^[39]在挤压过程中添加高温 α -淀粉酶能提高西米淀粉糊化效率的结果相似。

由表可知,与直接挤压膨化相比,蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉的峰值粘度、最低粘度、最终粘度、衰减值及回生值均呈现大幅度的降低,分别降低至 25.67 cp、14 cp、15.33 cp、11.67 cp 及 1.33 cp ($p<0.01$),说明该工艺能够显著降低其粘度。蒸汽酶解调质-挤压膨化作用下,高温 α -淀粉酶水解了部分淀粉侧链,使得淀粉分子链之间的作用力减弱^[40],从而使其粘度降低,该试验结果与 2.2 中流变特性的结果相符。此外,与直接挤压膨化相比,蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉糊衰减、回生值均显著降低。在高温 α -淀粉酶的作用下,淀粉长链分子被降解为短链小分子,导致直链淀粉与支链淀粉之间的相互作用力减弱^[41],因此回生值降低。上述结果表明蒸汽酶解调质预处理能够提高挤压膨化速食米粉的热稳

定性,且不易发生老化回生的现象,这与潘小卫^[42]关于加酶挤压对高粱糊化特性影响的研究结果相一致。

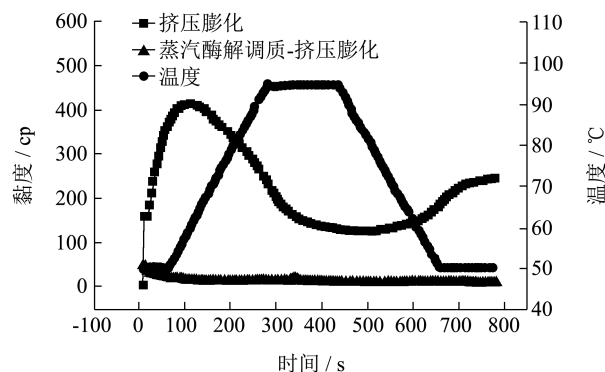


图5 蒸汽酶解调质-挤压膨化对速食米粉糊化特性的影响

Fig.5 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on the gelatinization properties of extrusion-cooked instant rice flour

表5 蒸汽酶解调质-挤压膨化对速食米粉糊化特性的影响

Table 5 Effects of pretreatment of steam conditioning accompanying starch enzymolysis on the gelatinization properties of extrusion-cooked instant rice flour

	峰值粘度/cp	最低粘度/cp	最终粘度/cp	衰减值/cp	回生值/cp
挤压膨化	407.67±12.10	120.33±4.04	238.00±7.00	287.33±9.86	117.67±3.05
蒸汽酶解调质-挤压膨化	25.67±1.53**	14.00±1.00**	15.33±0.58**	11.67±2.08**	1.33±0.57**

注: **表示与挤压膨化制备样品比较差异达极显著 ($p<0.01$) 水平。

3 结论

本文研究了蒸汽酶解调质-挤压膨化加工技术对速食米粉品质特性的影响,结果表明与直接挤压膨化相比,蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉的水溶性指数提高了 96.60%,吸水性指数、结块率、分散时间、休止角及滑角分别降低了 72.68%、51.39%、38.27%、5.88%及 6.56% ($p<0.05$),且速食米粉米糊的粘度也显著降低;同时,蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉的亮度和总色度显著低于直接挤压膨化,产生了肉眼可见的色差。由流变特性分析结果表明,蒸汽酶解调质处理能够显著降低挤压膨化速食米粉的粘度,与直接挤压膨化制得的速食米粉呈现明显剪切稀释效应的非牛顿流体和假塑性流体特征不同,经蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉在较低的剪切速率下即呈现较低的粘度,没有呈现出明显的剪切稀释现象。此外,与直接挤压膨化相比,经蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉的还原糖及可溶性蛋白含量显著提高,快消化淀粉比例升高且抗性淀粉比例降低。总之,与直接挤压膨化相比,蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺能够明显改善速食米粉的冲调特性及其预消化性。本研究结果可为速食米粉的加工技术

创新提供依据和技术支撑。

参考文献

- [1] 沈宇光,肖志刚,柴媛,等.工程重组米的研究进展[J].农产品加工,2019,2:63-65
SHEN Yu-guang, XIAO Zhi-gang, CHAI Yuan, et al. Research advance of restructuring rice [J]. Farm Products Processing, 2019, 2: 63-65
- [2] Monks J L F, Vanier N L, Casaril J, et al. Effects of milling on proximate composition, folic acid, fatty acids and technological properties of rice [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 30(2): 73-79
- [3] 王庆,张光,杨春华,等.挤压膨化对大米粉糊化度及蛋白质体外消化率的影响[J].食品工业科技,2017,38(7):230-234
WANG Qing, ZHANG Guang, YANG Chun-hua, et al. Effect of extrusion on gelatinization degree and protein digestibility of rice flour [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 230-234
- [4] 刘磊,邱婷婷,赵志浩,等.预酶解-挤压膨化工艺改善玉米全粉冲调分散性[J].现代食品科技,2018,34(10):141-146
LIU Lei, QIU Ting-ting, ZHAO Zhi-hao, et al. Extrusion with enzyme pretreatment improves dispersibility of whole corn

- flour [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(10): 141-146
- [5] DING Qing-bo, Ainsworth P, Tucker G, et al. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(3): 283-289
- [6] 叶琼娟,杨公明,张全凯,等.挤压膨化技术及其最新应用进展[J].食品安全质量检测学报,2013,4(5):1329-1334
- YE Qiong-juan, YANG Gong-ming, ZHANG Quan-kai, et al. The new application and progress of extrusion technology [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2013, 4(5): 1329-1334
- [7] XU En-bo, WU-Zheng-zong, PANXiao-wei, et al. Effect of enzymatic (thermostable α -amylase) treatment on the physicochemical and antioxidant properties of extruded rice incorporated with soybean flour [J]. Food Chemistry, 2016, 197: 114-123
- [8] 张冬媛,张名位,邓媛元,等.发芽-挤压膨化-高温 α 淀粉酶协同处理改善全谷物糙米粉冲调性的工艺优化[J].中国粮油学报,2015,30(6):106-112
- ZHANG Dong-yuan, ZHANG Ming-wei, DENG Yuan-yuan, et al. The collaborative process optimization of germination-extrusion-thermostable α -amylase to improve the solubility of brown rice powder [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(6): 106-112
- [9] 赵志浩,刘磊,张名位,等.预酶解-挤压膨化对全谷物糙米粉品质特性的影响[J].食品科学,2019,40(1):108-116
- ZHAO Zhi-hao, LIU Lei, ZHANG Ming-wei, et al. Combined effect of enzymatic pretreatment and extrusion on quality properties of brown rice flour [J]. Food Science, 2019, 40(1): 108-116
- [10] 任志辉.调质和挤压膨化对不同粒度菜粕理化特性的影响[D].郑州:河南工业大学,2016
- REN Zhi-hui. Effects of conditioning and expansion treatment on the physicochemical properties of different particle size rapeseed meal [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016
- [11] 杨景焘,赵芳,刘振,等. α -淀粉酶体外酶解三种不同加工处理玉米中淀粉消化性的比较研究[J].新疆农业科学,2016,53(4):744-751
- YANG Jing-zhang, ZHAO Fang, LIU Zhen, et al. α -amylase in vitro digestion crushing, vapor pressure, extrusion processing of corn starch digestibility of research [J]. Xinjiang Agricultural Science, 2016, 53(4): 744-751
- [12] Anderson R A, Conway H F, Peplinski A J. Gelatinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming [J]. Starch - Stärke, 1970, 22(4): 130-135
- [13] 刘静波,马爽,刘博群,等.不同干燥方式对全蛋粉冲调性能的影响[J].农业工程学报,2011,27(12):383-388
- LIU Jing-bo, MA Shuang, LIU Bo-qun, et al. Effects of different drying methods on solubility of whole egg powder [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2011, 27(12): 383-388
- [14] 张艳,华欲飞,孔祥珍.低限度酶水解对醇法大豆浓缩蛋白分散性的影响[J].食品工业科技,2008,10:68-70,74
- ZHANG Yan, HUA Yu-fei, KONG Xiang-zhen. Effects of limited enzymatic hydrolysis on dispersion properties of soy protein concentrate [J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 10: 68-70, 74
- [15] Shittu T A, Lawal M O. Factors affecting instant properties of powdered cocoa beverages [J]. Food Chemistry, 2007, 100(1): 91-98
- [16] Ileleji K E, Zhou B. The angle of repose of bulk corn stover particles [J]. Powder Technology, 2008, 187(2): 110-118
- [17] 文伟,张名位,刘磊,等.乳酸菌发酵对脱脂米糠中糖和酚类物质含量的影响[J].现代食品科技,2016,32(2):137-141
- WEN Wei, ZHANG Ming-wei, LIU Lei, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation on the content of sugar and phenols in defatted rice bran [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(2): 137-141
- [18] Englyst H N, Kingman S M, Cummings J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(Suppl 2): S33
- [19] RJ B, RS K, ET C, et al. Functional and digestive characteristics of extruded rice flour [J]. Cereal Chemistry, 2001, 78(2): 131-137
- [20] XU En-bo, WU Zheng-zong, LONG Jie, et al. Improved bioaccessibility of phenolics and antioxidant activity of glutinous rice and its fermented Chinese rice wine by simultaneous extrusion and enzymatic hydrolysis [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 17: 214-226
- [21] 许亚翠,钱海峰,张晖.高温型 α -淀粉酶对膨化米粉冲调性的影响[J].食品与发酵工业,2012,38(8):73-77
- XU Ya-cui, QIAN Hai-feng, ZHANG Hui. Effect of thermo stable α -amylase on solubility of extruded rice powder [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(8): 73-77
- [22] 刘骏.淮山全粉挤压膨化特性的研究[D].福州:福建农林大学,2015
- LIU Jun. A study on the extrusion characteristics of huaishan whole powder [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015
- [23] 张可,修琳,赵城彬,等.预糊化处理对荞麦淀粉理化特性的影

- 响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(2):61-68
- ZHANG Ke, XIU Lin, ZHAO Cheng-bin, et al. Effect of pre-gelatinization on physical and chemical properties of buckwheat starch [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 61-68
- [24] Cho M, Han J H, You S. Inhibitory effects of fucan sulfates on enzymatic hydrolysis of starch [J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(4): 1164-1171
- [25] Malumba P, Massaux C, Deroanne C, et al. Influence of drying temperature on functional properties of wet-milled starch granules [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(2): 299-306
- [26] 周睿,曹龙奎,李丽.黄米淀粉的制备及流变学特性的研究[J].食品科技,2011,36(5):242-246
- ZHOU Rui, CAO Long-kui, LI Li. Preparation of yellow rice starch and research on its rheological properties [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(5): 242-246
- [27] 马永轩,张名位,张瑞芬,等.高温 α -淀粉酶-挤压膨化耦合处理对全谷物糙米粉品质的影响[J].食品科学技术学报,2020,38(1):111-116
- MA Yong-xuan, ZHANG Ming-wei, ZHANG Rui-fen, et al. Effect of thermostable α -amylase-extrusion coupling treatment on quality properties of whole brown rice flour [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(1): 111-116
- [28] 马永轩,张名位,魏振承,等.挤压膨化对大米和糙米理化与营养特性的影响[J].食品研究与开发,2017,38(12):9-12
- MA Yong-xuan, ZHANG Ming-wei, WEI Zhen-cheng, et al. Effects of extrusion on physicochemical and nutritional property of rice and brown rice [J]. Food Research and Development, 2017, 38(12): 9-12
- [29] 张冬媛,邓媛元,张名位,等.发芽-挤压-淀粉酶协同处理对速食糙米粉品质特性的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):759-768
- ZHANG Dong-yuan, DENG Yuan-yuan, ZHANG Ming-wei, et al. Effect of germination-extrusion-amylase assisted processing on quality properties of brown rice powder [J]. China Agricultural Science, 2015, 48(4): 759-768
- [30] Razzaghi A, Larsen M, Lund P, et al. Effect of conventional and extrusion pelleting on in situ ruminal degradability of starch, protein, and fibre in cattle [J]. Livestock Science, 2016, 185: 97-105
- [31] 郑丽娜.淀粉酶法提取大米蛋白[J].食品研究与开发,2012,33(6):60-63
- ZHEN Li-na. Amylase extraction of rice protein [J]. Food Research and Development, 2012, 33(6): 60-63
- [32] Mesa-Stonestreet N J D, Alavi S, Gwirtz J. Extrusion-enzyme liquefaction as a method for producing sorghum protein concentrates [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 365-375
- [33] 冯秋娟,肖志刚,郑广钊,等.低温加酶挤压玉米淀粉糊化度的研究[J].食品工业科技,2011,32(8):287-290
- FENG Qiu-juan, XIAO Zhi-gang, ZHENG Guang-zhao, et al. Study on the gelatinization of corn starch by enzyme-added extrusion at low temperature [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(8): 287-290
- [34] Zinn R A, Adam C F, Tamayo M S. Interaction of feed intake level on comparative ruminal and total tract digestion of dry-rolled and steam-flaked corn [J]. Journal of Animal Science, 1995, 73(5): 1235-1249
- [35] 石红.谷基配方营养米粉酶法工艺关键技术及模拟消化分析[D].杭州:浙江工商大学,2017
- SHI Hong. Key technologies and simulated digestion analysis of the enzymatic process of rice-based formula nutrition rice flour [D]. Hangzhou: Zhejiang Technology and Business University, 2017
- [36] Hagenimana A, DING Xiao-lin, FANG Tao. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking [J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(1): 38-46
- [37] Yoshimura M, Takaya T, Nishinari K. Effects of xyloglucan on the gelatinization and retrogradation of corn starch as studied by rheology and differential scanning calorimetry [J]. Food Hydrocolloids, 1999, 13(13): 101-111
- [38] Pierre C I, ZHANG Hai-hua, LI Qin, et al. Impact of the soak and the malt on the physicochemical properties of the sorghum starches [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2010, 11(8): 3002-3015
- [39] Govindasamy S, Campanella O H, Oates C G. The single screw extruder as a bioreactor for sago starch hydrolysis [J]. Food Chemistry, 1997, 60(1): 1-11
- [40] Zavareze E D R, Dias A R G. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 317-328

(下转第156页)