

# 预酶解-挤压膨化工艺改善玉米全粉冲调分散性

刘磊<sup>1</sup>, 邱婷婷<sup>2</sup>, 赵志浩<sup>1</sup>, 朱雪梅<sup>2</sup>, 韩雅盟<sup>1</sup>, 张名位<sup>1</sup>

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业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)(2. 南昌大学食品学院, 江西南昌 330047)

**摘要:** 本文研究了玉米全粉在高温条件下经过 $\alpha$ -淀粉酶进行固态预酶解后再进行挤压膨化(预酶解-挤压膨化)加工处理后的品质特性变化规律。结果表明:与直接挤压膨化玉米全粉相比,预酶解-挤压膨化玉米全粉的水溶性指数增加了12.26%,吸水性指数降低了26.40%,分散时间减小了24.14%,结块率增加了75.32%,黏度降低,冲调分散性得到显著改善;Carr指数、Hausner比值分别增加了8.39%、3.60%,休止角、滑角分别增加了24.59%、6.49%,容积密度增加;L\*值、b\*值显著增加,a\*值降低,产生了一定色差;淀粉含量下降5.86%,还原糖含量、脂肪含量及可溶性蛋白含量分别增加了139.43%、7.87%、243.52%。本研究表明预酶解-挤压膨化处理改善了玉米全粉的冲调分散性,增加了还原糖、脂肪及可溶性蛋白的含量,提高了食用品质。本研究克服了挤压膨化工艺过程中由于物料水分含量低,加工温度高,作用时间短等因素导致酶解作用有限的技术难题,为预酶解-挤压膨化技术在以谷物为基质的营养方便食品的加工应用中提供指导。

**关键词:** 玉米全粉; 预酶解-挤压膨化; 冲调分散性; 品质特性

文章编号: 1673-9078(2018)10-141-146

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.10.020

## Extrusion with Enzyme Pretreatment Improves Dispersibility of Whole Corn Flour

LIU Lei<sup>1</sup>, QIU Ting-ting<sup>2</sup>, ZHAO Zhi-hao<sup>1</sup>, ZHU Xue-mei<sup>2</sup>, HAN Ya-meng<sup>1</sup>, ZHANG Ming-wei<sup>1</sup>

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)(2. Food College, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** The changes in physicochemical properties of whole corn flour extruded with  $\alpha$ -amylase pretreatment under solid state at high temperature were investigated. The result showed that compared with the extruded corn samples, the water solubility index of samples extruded with enzyme pretreatment increased 12.26%, and the water absorption index decreased 26.40%. The dispersion time reduced 24.14%, while the agglomerate rate increased 75.32%, and the viscosity decreased, and the dispersibility increased significantly. Carr index and Hausner ratio of samples increased 8.39% and 3.60%, respectively. Angle of repose and slio angle increased 24.59% and 6.49%, respectively; while bulk density increased. In addition, L\* value and b\* value of samples increased significantly, a\* value and  $\Delta E$  value decreased, compared to extruded samples. In addition, extrusion with enzyme pretreatment decreased starch content by 5.85%, and increased the content of reducing sugar, fat and soluble protein by 139.43%, 7.87% and 243.52%, respectively. This research overcome the technical problems of limited enzymolysis, which is caused by the low water content, high processing temperature and short time during extrusion process, and provide guidance for application of extrusion with enzymatic pretreatment techniques in processing of grain-based nutrient instant food.

**Key words:** whole corn powder; extrusion with enzyme pretreatment; dispersibility; physicochemical properties

玉米是世界总产量最高的农作物,其富含淀粉、蛋白质、脂肪、维生素及矿物质等营养成分<sup>[1,2]</sup>。现代

收稿日期: 2018-05-26

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFD0400700;2016YFD0400702);农业技术试验示范(农产品加工)项目(161821301064071003);广东省科技计划项目(2016B020203004;2015A020209072;2017B090907022)

作者简介:刘磊,男,博士,副研究员,研究方向:粮油加工研究

通讯作者:张名位,男,研究员,博士生导师,研究方向:粮油加工研究

研究表明玉米中的酚类物质可以预防糖尿病等慢性疾病的发生;玉米中含有大量的纤维素,其对肠胃蠕动有益,在预防胃肠道疾病、高血压和肥胖症的发生方面有重要作用<sup>[1,3]</sup>。目前国内外玉米食品的种类繁多,包括玉米汁、馒头、面条、饼干、玉米粥以及玉米酒等。

随着现代人的生活节奏加快,营养方便食品愈来愈受到消费者的青睐。挤压膨化技术是营养方便食品

的重要加工方式,其清洁高效、低能耗、多功能,集搅拌、混合、挤压和灭菌多个过程于一体。挤压膨化工艺中物料经过混匀、压缩、加热,在机械力的作用下曲折前进,膛内达到高温高压状态,在喷出瞬间,物料水分迅速蒸发,体积膨胀后冷却,得到挤压膨化产品<sup>[4]</sup>。高维等<sup>[5]</sup>采用挤压膨化技术研发了即食玉米粉,改善了玉米粉的口感。Zhang 等<sup>[3]</sup>研究发现挤压膨化处理后的玉米淀粉的黏度显著降低,溶解度增加。然而经挤压膨化加工技术制备的糊粉类营养方便食品存在冲调分散性差等缺陷。许亚翠等人<sup>[6]</sup>研究发现添加高温型 $\alpha$ -淀粉酶进行挤压膨化可以降低米粉的结块率和黏度。Xu 等人<sup>[7]</sup>的研究发现高温 $\alpha$ -淀粉酶辅助挤压膨化可以增加糙米粉的水溶性系数,降低其吸水性指数。Myat 等人<sup>[8]</sup>的研究发现在挤压膨化过程中加入高温 $\alpha$ -淀粉酶后玉米粉的水溶性系数显著增加,吸水性指数显著降低,L\*值、a\*值显著降低,b\*值显著增加。Likimani 等<sup>[9]</sup>人的研究发现玉米-大豆混合物在高温 $\alpha$ -淀粉酶挤压作用下发生淀粉水解,且水溶性指数增加,吸水性和黏度指数降低。这些研究表明添加高温 $\alpha$ -淀粉酶进行挤压膨化有利于改善产品的冲调分散性,但是由于挤压膨化工艺存在温度高、时间短等特点,导致 $\alpha$ -淀粉酶的酶解作用有限。

针对上述问题,本研究以玉米为原料,在高温下添加 $\alpha$ -淀粉酶先进行固态预酶解后再进行挤压膨化处理,比较研究预酶解-挤压膨化和直接挤压膨化工艺对玉米全粉粉体流动性、黏度、冲调分散性、色度以及淀粉含量、还原糖含量、脂肪含量及可溶性蛋白含量的影响,为预酶解-挤压膨化技术在以玉米谷物为基质的营养方便食品加工中的应用提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

玉米籽粒,市售;高温 $\alpha$ -淀粉酶(Termamyl SC,活力为120 KNU-S/g),购自诺维信(中国)生物技术有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

DS30-II型双螺杆膨化机:山东赛信膨化机械有限公司;UltraScan VIS型色差仪,美国HunterLab公司;AR-1500ex型流变仪,美国TA公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 三种玉米全粉样品的制备

使用粉碎机粉碎玉米粒,过60目筛,得到未挤压

玉米全粉样品。玉米粉按1500 U/g添加高温 $\alpha$ -淀粉酶,控制水分含量为22%,100℃下进行预酶解0.5 h,挤压前温度60℃、中端温度98℃、末端温度134℃,螺杆转速为29.6 Hz,此条件下对预酶解后的玉米全粉进行挤压膨化,挤出物粉碎后过60目筛,得到预酶解-挤压膨化玉米全粉样品。挤压膨化玉米全粉样品除不进行预酶解处理外其余条件与预酶解挤压膨化样品一致。所得样品均低温密封保存。

#### 1.3.2 水溶性指数(WSI)和吸水性指数(WAI)的测定

参考Majumdar 等<sup>[10]</sup>的方法并略加修改。准确称取3 g样品于50 mL离心管中,然后加入35 mL去离子水(水温28℃)混匀,275 r/min振荡30 min,4000 r/min离心10 min,上清液倒入已烘干至恒重的称量瓶中,于105℃干燥箱中烘干至恒重。重复测定5次。

$$WSI(\%) = \frac{\text{上清液烘干后称量瓶质量} - \text{空称量瓶质量}}{\text{样品干重}} \times 100$$

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

#### 1.3.3 结块率的测定

参考丁琳等<sup>[11]</sup>的方法并略加修改。准确称取15 g样品于500 mL烧杯,加入150 mL预热至80℃去离子水,搅拌30 s,静置10 min,用20目筛网过滤,清水漂洗一次,于105℃干燥箱烘干至恒重。重复测定5次。

$$\text{结块率}(\%) = \frac{\text{结块物质量}}{\text{样品干重}} \times 100$$

#### 1.3.4 分散时间的测定

参考张艳<sup>[12]</sup>的方法并略作修改。准确称取2 g样品,使用漏斗将样品加入到盛有100 mL水的200 mL烧杯中,水温70℃,同时使用磁力搅拌器以60 r/min的速度搅拌。记录从开始加入至粉块完全分散所需时间,重复测定5次。

#### 1.3.5 黏度的测定

称取20 g样品分散于100 mL 80℃热水中,得到20%质量分数的米糊。使用配有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℃,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。重复测定5次。

#### 1.3.6 休止角和容积密度的测定

参考Taser 等<sup>[13]</sup>的方法并略作修改。休止角的测定:在25 mL量筒中加入样品至刻度线20 mL处,用纸板挡住量筒口,将量筒倒置至高于水平面8 cm,迅

速抽离纸板。样品在水平面堆积成一个圆锥体。测量圆锥体的高度 (h) 和直径 (d)。重复测定 5 次。

$$\text{休止角}(\text{°}) = \arctan\left(\frac{2h}{d}\right)$$

容积密度的测定: 于 100 mL 量筒中准确称取 20 g 样品, 于桌面上轻轻敲击 10 次, 记录敲击后的刻度值。重复测定 5 次。

$$\text{容积密度}(\text{g/mL}) = \frac{20}{V}$$

### 1.3.7 滑角的测定

参考 Ijeleji 等<sup>[14]</sup>的方法并略作修改。准确称取 3 g 样品, 置于玻璃板上, 玻璃板一端固定, 另一端匀速缓慢抬升至大部分样品滑落, 测量样品滑落初端与底端的距离即玻璃板的长度 L 和样品滑落时的垂直高度 h, 重复测定 5 次。

$$\text{滑角}(\text{°}) = \arcsin\left(\frac{h}{L}\right)$$

### 1.3.8 Carr 指数和 Hausner 比值的测定

参考陈盛君等<sup>[15]</sup>的方法并略作修改。准确称取 10 g 样品, 装入 25 mL 量筒后读取初体积  $V_1$ , 轻敲至粉体达最紧实状态至粉体无明显体积变化, 读取最终体积  $V_2$ 。重复测定 5 次。

$$\text{CI}(\%) = \frac{\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}}{\frac{1}{V_2}} \times 100$$

$$\text{HR} = \frac{V_1}{V_2}$$

### 1.3.9 色度的测定

色差仪使用 UltraScanVIS 型, 选用 CIELab 色彩空间进行色度测定, 并计算色差值  $\Delta E^*$ 。重复测定 5 次。

### 1.3.10 还原糖含量的测定

参考文伟等<sup>[16]</sup>的方法并略作修改。准确称取 2 g 样品, 加入 30 mL 去离子水, 室温下振荡 30 min, 4000 r/min 离心 10 min, 取上清液定容至 50 mL, 使用 DNS 比色法测定其还原糖含量, 结果以每克干基中的葡萄糖含量(mg/g DW)表示。重复测定 3 次。

### 1.3.11 淀粉含量的测定

参照 GB/T 5009.9-2008 中的酶水解法测定淀粉含量。重复测定 3 次。

### 1.3.12 脂肪含量的测定

使用脂肪测定仪进行粗脂肪的测定。准确称取 5.0 g ( $m_0$ ) 样品, 置于样品杯中, 在其上方加入脱脂棉。

在每个脂肪玻璃杯 (已于 105 °C 烘干至恒重, 恒重后空杯质量为  $m_1$ ) 中加入 150 mL 低沸程石油醚, 将样品杯置于脂肪杯中, 使用脂肪测定仪准确上机测定。机器停止后取下脂肪测定玻璃杯, 于 105 °C 干燥箱烘干至恒重, 称重 ( $m_2$ )。重复测定 3 次。

$$\text{脂肪含量}(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\%$$

### 1.3.13 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 1.0 g 样品, 按重量 (g): 体积 (mL) = 1:9 比例加入 9 倍生理盐水, 混匀, 2500 r/min 离心 10 min, 取上清液定容至 25 mL。取双蒸水、0.563 g/L 蛋白质标准品和样液各 50  $\mu$ L, 分别加入 3.0 mL 考马斯亮蓝显色剂, 混匀后静置 10 min, 波长 595 nm 处测定吸光值。重复测定 3 次。计算见公式 (1)。

### 1.3.14 实验数据处理

实验重复 3 次, 实验数据采用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析, 显著性水平为 0.05, 数据以均值  $\pm$  标准差 (Means  $\pm$  SD) 表示; 使用 Origin 8.0 进行作图; 数据处理时某种物质的含量以样品干重计。

## 2 结果与分析

### 2.1 预酶解-挤压膨化对玉米全粉冲调分散性的影响

预酶解-挤压膨化对玉米全粉冲调分散性的影响见表 1。与未挤压玉米全粉样品相比, 挤压膨化玉米全粉样品与预酶解-挤压膨化玉米全粉样品水溶性指数分别增加了 10.67 倍和 12.10 倍, 吸水性指数分别降低了 23.94%、44.02% ( $p < 0.05$ ); 与挤压膨化玉米全粉样品相比, 预酶解-挤压膨化玉米全粉样品水溶性指数增加了 12.26%, 吸水性指数降低了 26.40%, 结块率增加了 75.32%, 分散时间降低了 24.14%。表 1 结果说明, 与直接挤压膨化处理相比, 预酶解-挤压膨化处理改善了玉米全粉的冲调分散性。

Xu 等<sup>[7]</sup>的研究发现经高温  $\alpha$ -淀粉酶辅助挤压膨化后的糙米和精米相比于不添加高温  $\alpha$ -淀粉酶挤压的样品吸水性指数降低, 水溶性指数升高, 这与本研究的结果相一致。原因是谷物粉体在复水时会发生吸水、下沉、分散、溶解等过程, 这些过程是交叉混合进行<sup>[4]</sup>。吸水性指数表示淀粉吸水溶胀的能力, 水溶性指数反映了大分子的降解程度, 数值大小与淀粉释放可

$$\text{待测样品蛋白质浓度}(\text{g/L}) = \frac{\text{样品OD值} - \text{空白OD值}}{\text{标准品OD值} - \text{空白OD值}} \times \text{标准品浓度}(0.563 \text{ g/L}) \quad (1)$$

溶性小分子物质的量有关。高温  $\alpha$ -淀粉酶酶解处理使淀粉链变短, 淀粉分子被降解, 淀粉结构被破坏, 释放大量可溶性糖类物质, 从而导致了吸水性指数降低, 水溶性指数升高, 分散时间变短。

张冬媛等人<sup>[17]</sup>的研究发现经高温  $\alpha$ -淀粉酶辅助挤压膨化处理后的糙米较直接挤压膨化处理结块率下降, 许亚翠等<sup>[6]</sup>人的研究发现在挤压膨化过程中加入高温  $\alpha$ -淀粉酶处理后的米粉结块率下降, 与本研究得到的结果不一致。原因可能是添加高温  $\alpha$ -淀粉酶辅助挤压膨化过程中由于挤压膨化过程时间太短, 淀粉酶

作用有限, 而预酶解-挤压膨化处理在挤压膨化前将物料先进行预酶解, 淀粉酶酶解作用时间相对更长, 故挤压后的玉米全粉中小分子糖类、糊精物质含量更高, 亲水性增强。导致玉米全粉在冲调过程中表层粉体迅速吸水, 附着在物料表面形成内部包裹干粉的团块结构, 阻碍了内部粉体吸收水分, 故结块率增加。而在分散时间的测定过程中, 冲调时加入的粉体量较少且进行了适当的搅拌, 所以冲调时间较短并未结块。总体而言, 预酶解-挤压膨化处理改善了玉米全粉的冲调分散性。

表 1 预酶解-挤压膨化对玉米全粉样品冲调分散性的影响

Table 1 Effects of extrusion with enzyme pretreatment on the solubility of whole corn powder

处理	WSI/%	WAI	结块率/%	分散时间/s
未挤压膨化	5.44±0.28 <sup>a</sup>	2.59±0.05 <sup>c</sup>		
挤压膨化	63.46±0.49 <sup>b</sup>	1.97±0.02 <sup>b</sup>	4.66±0.56	10.73±0.90
预酶解-挤压膨化	71.24±1.17 <sup>c</sup>	1.45±0.05 <sup>a</sup>	8.17±0.74 <sup>**</sup>	8.14±0.52 <sup>**</sup>

注: 数值表示为平均值±标准偏差; 同列中不同字母表示有显著性差异 ( $p<0.05$ ); \*\*表示有极显著差异。

## 2.2 预酶解-挤压膨化对玉米全粉黏度的影响

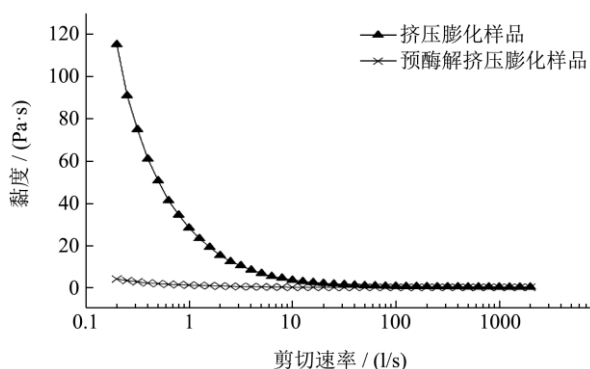


图 1 预酶解-挤压膨化对玉米全粉黏度的影响

Fig.1 Effects of extrusion with enzyme pretreatment on the viscosity of whole corn powder

预酶解-挤压膨化对玉米全粉黏度的影响如图 1 所示。经预酶解-挤压膨化处理后的玉米全粉样品黏度显著降低。在检测范围内, 随着剪切速率的提高, 两种玉米全粉的黏度都逐渐降低, 说明这两种玉米全粉样品都具有剪切变稀的性质。

## 2.3 预酶解-挤压膨化对玉米全粉粉体流动性的影响

预酶解-挤压膨化对玉米全粉粉体流动性的影响见表 2。与未挤压膨化玉米全粉相比, 挤压膨化玉米

全粉样品与预酶解-挤压膨化玉米全粉样品的 Carr 指数分别减小了 16.95%、9.98%, Hausner 比值分别减小了 7.95%、4.64%, 休止角分别减小了 21.26%、1.89%, 滑角分别减小了 6.77%、0.72%, 容积密度分别增加了 18.64%、20.34%, 且存在显著性差异 ( $p<0.05$ ); 与挤压膨化玉米全粉样品相比, 预酶解挤压膨化玉米全粉样品的 Carr 指数分别增加了 8.39%, Hausner 比值分别增加了 3.60%, 休止角分别增加了 24.59%, 容积密度分别增加了 1.43%, 滑角分别增加了 6.49%。三种玉米全粉的休止角均小于 30°, 说明样品的流动性很好。

粉体流动性不仅影响食用时是否容易倒入容器中, 而且还影响粉体的生产、输送、保存和装载过程<sup>[18]</sup>。

滑角和休止角反映了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需要粉体的休止角 $<45^\circ$ ; Carr 指数和 Hausner 比值表示为粉体受压缩时流动的难易, Carr 指数和 Hausner 比值越小, 粉体的流动性越好; 容积密度是反映产品在挤压过程中进料速度和运输成本的一个基本物理指标<sup>[7]</sup>, 在一定程度上反应粉体流动性。本研究的结果中预酶解处理使挤压膨化玉米全粉粉体流动性变差。主要原因可能是高温  $\alpha$ -淀粉酶处理破坏了淀粉的结构, 与淀粉结合的一部分蛋白质被释放, 导致粉体颗粒表面变粗糙, 粉体流动性变差。

表2 预酶解-挤压膨化对玉米全粉样品粉体流动性的影响

Table 2 Effects of extrusion with enzyme pretreatment on the liquidity of whole corn powder

处理	Carr 指数/%	Hausner 比值	休止角/°	堆积密度/(g/mL)	滑角/°
未挤压膨化	33.87±1.20 <sup>a</sup>	1.51±0.03 <sup>a</sup>	28.04±3.39 <sup>a</sup>	0.59±0.01 <sup>b</sup>	42.83±2.31 <sup>a</sup>
挤压膨化	28.13±0.85 <sup>b</sup>	1.39±0.02 <sup>b</sup>	22.08±2.32 <sup>b</sup>	0.70±0.01 <sup>a</sup>	39.93±1.92 <sup>b</sup>
预酶解-挤压膨化	30.49±3.23 <sup>b</sup>	1.44±0.02 <sup>b</sup>	27.51±3.07 <sup>a</sup>	0.71±0.01 <sup>a</sup>	42.52±1.92 <sup>a</sup>

注: 数值表示为平均值±标准偏差; 同列中不同字母表示有显著性差异 ( $p<0.05$ )。

## 2.4 预酶解-挤压膨化对玉米全粉色度的影响

预酶解-挤压膨化对玉米全粉色度的影响见表3。与挤压膨化玉米全粉样品相比, 预酶解-挤压膨化处理后的玉米全粉样品 L\*值和 b\*值显著增加, a\*值降低, 产生了一定色差。从表3还可以看出, 挤压膨化玉米全粉样品和预酶解-挤压膨化玉米全粉样品的 L\*值较未挤压玉米全粉样品的 L\*值均降低, 因为经过高温处理后的玉米全粉亮度值降低。

表3 预酶解-挤压膨化对玉米全粉样品色度的影响

Table 3 Effects of extrusion with enzyme pretreatment on the chrominance of whole corn powder

处理	L*	a*	b*	ΔE*
未挤压膨化	84.80±0.13 <sup>a</sup>	0.10±0.05 <sup>a</sup>	28.35±0.14 <sup>c</sup>	-
挤压膨化	77.34±0.16 <sup>c</sup>	-0.04±0.03 <sup>b</sup>	29.25±0.19 <sup>b</sup>	7.510
预酶解-挤压膨化	79.48±0.02 <sup>b</sup>	-0.06±0.02 <sup>b</sup>	30.85±0.45 <sup>a</sup>	5.880

注: 数值表示为平均值±标准偏差; 同列中不同字母表示有显著性差异 ( $p<0.05$ )。

## 2.5 预酶解-挤压膨化对玉米全粉淀粉、还原

### 糖、脂肪及可溶性蛋白含量的影响

预酶解-挤压膨化对玉米全粉淀粉、还原糖、脂肪及可溶性蛋白含量的影响见表4。预酶解-挤压膨化样品中的还原糖含量相比于其他两种样品中还原糖含量显著增加, 挤压膨化样品与预酶解-挤压膨化样品中还原糖含量相比于对照样品分别增加了 3.21、9.07 倍 ( $p<0.05$ )。预酶解-挤压膨化样品中的淀粉含量相比于其他两种样品中淀粉含量显著降低, 挤压膨化样品与预酶解-挤压膨化样品中淀粉含量相比于对照样品分别减少了 4.92%、10.50% ( $p<0.05$ )。挤压膨化过程中淀粉降解, 长链淀粉膨化破裂被切割成还原糖和短

玉米全粉样品经过预酶解-挤压膨化处理后, 一方面样品粉质变软, 挤压过程中摩擦力减小, 机腔内压力和温度降低, 对非酶褐变的反应具有抑制作用; 另一方面, 样品的还原糖含量升高, 对美拉德反应、焦糖化反应等非酶褐变具有促进作用。预酶解-挤压膨化后的玉米全粉样品较挤压膨化玉米全粉样品的 L\*值增加, ΔE\*值降低, 说明预酶解处理后的玉米全粉样品亮度值增加, 色差减小。

链糊精<sup>[19]</sup>, 高温 α-淀粉酶预酶解处理过程中, 淀粉被水解成糊精和低聚糖等, 故经挤压膨化处理和经高温 α-淀粉酶预酶解挤压膨化处理后玉米全粉的淀粉含量降低, 还原糖含量增加。

未挤压玉米全粉样品中脂肪含量最高, 挤压膨化和预酶解-挤压膨化样品的脂肪含量分别下降了 59.2%、55.8% ( $p<0.05$ )。未挤压玉米全粉样品中可溶性蛋白含量最高, 挤压膨化和预酶解挤压膨化样品的可溶性蛋白质含量分别下降了 88.9%、61.8% ( $p<0.05$ )。玉米粉中的脂肪在挤压膨化过程中会与淀粉和蛋白质形成复合物, 蛋白质在挤压膨化过程中发生变性<sup>[20]</sup>, 高温 α-淀粉酶预酶解处理使淀粉被水解, 之后的挤压膨化过程中形成的淀粉-脂肪-蛋白质复合物含量减少, 故蛋白质和脂肪含量增加。

表4 预酶解-挤压膨化对玉米全粉淀粉、还原糖、脂肪及可溶性蛋白含量的影响

Table 4 Effects of extrusion with enzyme pretreatment on the content of starch, reducing sugar, fat and soluble protein of whole corn powder

处理	淀粉含量/(mg/g DW)	还原糖含量/(mg/g DW)	脂肪含量/(mg/g DW)	可溶性蛋白质含量/(mg/g DW)
未挤压膨化	983.87±10.20 <sup>a</sup>	19.77±0.45 <sup>c</sup>	40.69±2.03 <sup>a</sup>	9.73±0.45 <sup>a</sup>
挤压膨化	935.46±6.08 <sup>b</sup>	83.19±2.91 <sup>b</sup>	16.64±0.26 <sup>b</sup>	1.08±0.19 <sup>c</sup>
预酶解-挤压膨化	880.61±12.43 <sup>c</sup>	199.18±10.62 <sup>a</sup>	17.95±0.26 <sup>b</sup>	3.71±0.44 <sup>b</sup>

### 3 结论

3.1 本文研究了预酶解-挤压膨化加工工艺对玉米全粉品质特性的影响,结果表明:(1)与直接挤压膨化玉米全粉样品相比,预酶解-挤压膨化玉米全粉样品的水溶性系数显著增加了12.26%,吸水性指数显著降低了26.40%,分散时间显著减小了24.14%,结块率显著增加了75.32%,黏度降低,冲调分散性得到显著改善;Carr指数、Hausner比值分别增加了8.39%、3.60%,休止角、滑角显著增加,分别增加了24.59%、6.49%,容积密度增加;L\*值、b\*值显著增加,a\*值降低,产生了一定色差。(2)与直接挤压膨化样品相比,预酶解挤压膨化处理增加了玉米粉样品的还原糖、脂肪和可溶性蛋白质含量,降低了淀粉含量。预酶解挤压膨化样品的淀粉含量下降了6.23%;还原糖含量上升了139.43%;脂肪含量上升了7.87%;可溶性蛋白质含量上升了244.52%。

3.2 本研究表明,预酶解-挤压膨化技术克服了挤压膨化工艺过程中由于物料水分含量低,加工温度高,作用时间短等因素导致酶解作用有限的技术难题,可以改善玉米全粉的冲调分散性及食用品质,为玉米膨化粉的加工提供了指导,为开发谷物营养方便食品提供了新的技术参考。

### 参考文献

- [1] 刘亚年.玉米的营养价值与人体的健康[J].粮食与饲料工业,1993,5:25-26  
LIU Ya-nian. Corn's nutritional value and human health [J]. Cereal & Feed Industry, 1993, 5: 25-26
- [2] Trevisan A J, Arêas J A. Development of corn and flaxseed snacks with high-fibre content using response surface methodology (RSM) [J]. International Journal of Food Sciences & Nutrition, 2012, 63(3): 362-367
- [3] Zhang X, Chen Y, Zhang R, et al. Effects of extrusion treatment on physicochemical properties and *in vitro* digestion of pregelatinized high amylose maize flour [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 68: 108-115
- [4] 宋春芳,毛志怀,王曙光,等.挤压膨化工艺参数对亚麻籽体外消化率的影响[J].农业机械学报,2008,39(3):75-78  
SONG Chun-fang, MAO Zhi-huai, WANG Shu-guang, et al. Effects of extruding technological parameters on *in vitro* protein digestibility of flaxseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 75-78
- [5] 高维,谭念.即食型膨化玉米粉早餐的工艺研究[J].食品科技,2016,4:173-176  
GAO Wei, TAN Nian. Study on the process of expanded corn flour for instant breakfast [J]. Food Science and Technology, 2016, 4: 173-176
- [6] 许亚翠,钱海峰,张晖.高温型 $\alpha$ -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  $\alpha$ -amylase on solubility of extruded rice powder [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(8): 73-77
- [7] Xu E, Wu Z, Long J, et al. Effect of thermostable  $\alpha$ -amylase addition on the physicochemical properties, free/bound phenolics and antioxidant capacities of extruded hulled and whole rice [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(9): 1958-1973
- [8] Myat L, Ryu G H. Effect of thermostable  $\alpha$ -amylase injection on mechanical and physicochemical properties for saccharification of extruded corn starch [J]. 2014, 94(2): 288-295
- [9] Likimani T A, Sofos J N, Maga J A, et al. Extrusion cooking of corn/soybean mix in presence of thermostable alpha-amylase [J]. Journal of Food Science, 1991, 56(1): 99-105
- [10] Majumdar R K, Singh R K. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of fish-based expanded snacks [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(3): 864-879
- [11] 丁琳,王恺,莫松成.谷物早餐粉冲调性的研究[J].粮油加工, 2010,6:83-85  
DING Lin, WANG Kai, MO Song-cheng. Study on the reconstitution of cereal breakfast powder [J]. Cereals and Oils Processing, 2010, 6: 83-85
- [12] 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影响[J].食品工业科技,2008,10:20-23  
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: 20-23
- [13] Taser O F, Altuntas E, Ozgöz E. Physical properties of hungarian and common vetch seeds [J]. Journal of Applied Sciences, 2005, 5(2): 323-326
- [14] Ileleji K E, Zhou B. The angle of repose of bulk corn stover particles [J]. Powder Technology, 2008, 187(2): 110-118
- [15] 陈盛君,朱家壁,祁小乐.粉末直接压片常用辅料的粉体学性质评价[J].中国医药工业杂志,2013,44(10):1010-1013  
CHEN Sheng-jun, ZHU Jia-bi, QI Xiao-le. Evaluation of

- micromeritic properties of excipients for direct compression [J]. *Chinese Journal of Pharmaceuticals*, 2013, 44(10): 1010-1013
- [16] 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*,2016,2:137-141  
WEN Wei, ZHANG Ming-wei, LIU Lei, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on the content of sugars and polyphenols of defatted rice bran [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 2: 137-141
- [17] 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]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 759-768
- [18] Singh N, Kaur L. Morphological, thermal, rheological and retrogradation properties of potato starch fractions varying in granule size [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2004, 84(10): 1241-1252
- [19] 王小飞,高原,蒋楠.奶粉流动性测试方法[J].*食品安全质量检测学报*,2015,9:3360-3366  
WANG Xiao-fei, GAO Yuan, JIANG Nan. Test methods of milk powder flowability [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015, 9: 3360-3366
- [20] 张祥,程秀花,赵国琦,等.挤压膨化工艺对玉米糊化度的影响[J].*饲料工业*,2005,26(19):1-4  
ZHANG Xiang, CHENG Xiu-hua, ZHAO Guo-qi, et al. Effect of extruded technology on gelatinization degree of maize [J]. *Feed Industry*, 2005, 26(19): 1-4