

微波处理对高粱理化性质及蛋白质结构特性的影响研究

李 忍, 姜 鹏, 戴凌燕, 阮长青, 张东杰, 王长远, 李志江

Effects of Microwave Treatment on Physicochemical Properties and Protein Structure Characteristics of Sorghum

LI Ren, JIANG Peng, DAI Lingyan, RUAN Changqing, ZHANG Dongjie, WANG Changyuan, and LI Zhijiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010203>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[冷冻南极磷虾\(Euphausia superba\)肌肉的理化性质及蛋白的加工特性](#)

Physicochemical properties and processing characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) muscle

食品工业科技. 2017(21): 56–64

[白灵菇蛋白质的理化及功能特性](#)

Physicochemical and Functional Properties of Protein from *Pleurotus nebrodensis*

食品工业科技. 2018, 39(16): 37–41

[乙醇诱导改性对乳清分离蛋白结构及乳化特性的影响](#)

Effects of Ethanol-induced Modification on the Structural and Emulsifying Properties of Whey Protein Isolates

食品工业科技. 2020, 41(23): 1–7

[豌豆蛋白对猪肉盐溶蛋白理化性质的影响](#)

Effect of Pea Protein on Physicochemical Properties of Salt-soluble Protein of Pork

食品工业科技. 2019, 40(8): 31–36

[挤压对淀粉微观结构和理化性质影响的研究进展](#)

Research Progress of the Effects of Extrusion on Microstructure and Physicochemical Properties of Starch

食品工业科技. 2020, 41(5): 305–310

[磷脂与食品中蛋白质相互作用机制及对蛋白质特性的影响研究进展](#)

Interaction Mechanism between Phospholipids and Food Proteins and Effect on Protein Properties: A Review

食品工业科技. 2020, 41(17): 345–351



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李忍, 姜鹏, 戴凌燕, 等. 微波处理对高粱理化性质及蛋白质结构特性的影响研究 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 27–33. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010203

LI Ren, JIANG Peng, DAI Lingyan, et al. Effects of Microwave Treatment on Physicochemical Properties and Protein Structure Characteristics of Sorghum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 27–33. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010203

微波处理对高粱理化性质及蛋白质结构特性的影响研究

李 忍^{1,2,3}, 姜 鹏^{1,2}, 戴凌燕⁴, 阮长青¹, 张东杰^{1,2,3,*}, 王长远¹, 李志江^{1,2,3,*}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;
2. 黑龙江省杂粮加工及质量安全工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;
3. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;
4. 黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 为改善高粱蛋白质理化性质, 采用微波技术对三种高粱进行处理, 结合扫描电镜和傅里叶变换红外光谱仪等方法, 测定微波处理对高粱理化性质及蛋白质结构特性影响。结果表明, 微波处理对高粱蛋白质等理化性质具有显著影响。微波处理减小了高粱蛋白粒径, 蛋白表面出现缝隙, 但处理前后的红外光谱具有相似的结构特征, 属于物理变性。微波处理显著提高了三种高粱的总蛋白质含量约 0.6% ($P<0.05$), 降低可溶性蛋白质含量 0.97~1.87 mg/g, 且显著降低体外消化率 15.55%~43.63% ($P<0.05$)。此外, 微波处理后, 高粱粉的持水力显著提高 0.32~0.40 g/g ($P<0.05$), 持油力显著降低 0.08~0.18 g/g ($P<0.05$), 表面菌落总数和霉菌数分别显著降低了 98.75% 和 98.94% ($P<0.05$), 色度变暗。本文可为高粱食品的开发及应用提供一定的参考。

关键词: 高粱, 蛋白质, 结构特性, 理化性质

中图分类号: TS213.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)23-0027-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010203

本文网刊:



Effects of Microwave Treatment on Physicochemical Properties and Protein Structure Characteristics of Sorghum

LI Ren^{1,2,3}, JIANG Peng^{1,2}, DAI Lingyan⁴, RUAN Changqing¹, ZHANG Dongjie^{1,2,3,*},
WANG Changyuan¹, LI Zhijiang^{1,2,3,*}

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
2. Heilongjiang Engineering Research Center for Coarse Cereals Processing and Quality Safety, Daqing 163319, China;
3. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China;
4. College of Science and Biotechnology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to improve the physicochemical properties of sorghum protein, three kinds of sorghum were treated with microwave technology, and the changes of physicochemical properties and protein structural properties of sorghums before and after microwave treatment were measured by scanning electron microscopy and Fourier transform infrared spectrometer. The results showed that microwave treatment had significant effects on the physicochemical and protein structural properties of sorghum. Microwave treatment reduced the grain size of sorghum protein and caused cracks on the protein surface. However, the infrared spectra of sorghum protein before and after treatment had the similar structural characteristics and belonged to physical denaturation. Microwave treatment significantly increased the total protein contents

收稿日期: 2021-01-25

基金项目: 国家重点研发计划项目“杂粮食品精细化加工关键技术合作研究及应用示范”(2018YFE0206300); 黑龙江省杂粮产业技术创新体系杂粮食品加工技术创新岗、优势特色学科资助项目(黑教联[2018]4号); 黑龙江八一农垦大学“三纵三横”科研团队支撑计划——杂粮营养与质量安全创新团队(TDJH201806)。

作者简介: 李忍(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 2215067588@qq.com。

* 通信作者: 张东杰(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: byndzjd@126.com。

李志江(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: lizhijiang@126.com。

of the three sorghums species by 0.6% ($P<0.05$), decreased soluble protein contents by 0.97~1.87 mg/g, and significantly decreased *in vitro* digestibility by 15.55%~43.63% ($P<0.05$). In addition, after microwave treatment, the water holding capacity of sorghum powder was significantly increased by 0.32~0.40 g/g ($P<0.05$), the oil holding capacity was significantly decreased by 0.08~0.18 g/g ($P<0.05$), the total number of bacterial colonies and the number of molds on the surface were significantly decreased by 98.75% and 98.94% ($P<0.05$), respectively. And the color darkened. The present research can present reference for the development and application of sorghum food.

Key words: sorghum; protein; structural properties; physicochemical properties

根据现代流行病学研究报道,经常食用全谷物可降低人体患肥胖、心血管疾病和 2 型糖尿病等慢性疾病风险^[1]。高粱(*Sorghum bicolor* L. Moench)属禾本科,是世界上种植最早和最广泛的农作物之一,也是亚洲和非洲等非半干旱地区主要的主食来源^[2]。高粱富含维生素 B、赖氨酸、膳食纤维、多酚、矿物质和蛋白质等多种营养成分,是一种重要的粮食原料^[3]。

蛋白质作为一种人类生命活动中基本的营养物质,在日常膳食结构中具有重要作用,蛋白质的理化性质对食品的食用品质具有显著影响。近年来,人们研究了各种物理和化学方法来改善蛋白质的溶解性、起泡性及吸油性等性质,以提高食品食用品质^[4]。由于高粱蛋白中醇溶蛋白含量较高,因此高粱蛋白具有消化率低、不易溶于水和加工性能差等特点^[5]。目前,国内外对高粱蛋白的研究主要集中在提高蛋白提取率、改善蛋白消化率、制备功能性蛋白抑制肽和调控蛋白基因表达等方面^[6]。微波技术作为一种新型的热加工技术,具有操作简单、安全和绿色环保等优点,在食品加工领域具有良好的应用前景。研究表明,微波处理可提高青稞蛋白质的提取率^[7]。刘海波等^[8]研究发现,微波处理可导致小麦面筋蛋白中的巯基和二硫键含量减少,面筋蛋白的网状结构变得疏松。胡方洋等^[9]研究发现,微波处理可降低苦荞蛋白的起泡性和乳化性。此外,王娜等^[10]研究发现,微波处理可降低小麦醇溶蛋白的抗原性,具有良好的脱敏效果。然而,微波处理对高粱蛋白质的结构特性及其理化性质的研究相对较少。本研究利用扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)和傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)等方法来探讨微波处理前后高粱理化性质及蛋白质结构的变化情况,旨在为高粱食品的开发和利用提供数据依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

龙米粮 1 号、龙杂 13 号和红糯高粱 均由黑龙江省农业科学院提供;考马斯亮蓝试剂盒 南京建成生物工程研究所;光谱级溴化钾 天津市福晨化学试剂厂;胃蛋白酶(活力 250 U/mg) 北京博奥拓达科技有限公司;金龙鱼食用大豆油 北京华联超市;平板计数琼脂培养基、马铃薯葡萄糖琼脂培养基 北京博星生物技术有限责任公司;其他试剂 无特殊说明均为分析纯。

755B 型紫外可见分光光度计 上海精密科学仪器有限公司;DELTA320 型 pH 计 上海珂淮仪器有限公司;S-4800N 扫描电子显微镜 日本 Hitachi 公司;Nicolet 6700 型红外光谱仪 美国 Thermo Fisher Scientific 公司;TDZ5-WS 台式低速离心机 上海精若科学仪器有限公司;Beta2-8LD plus 冷冻干燥机 德国 Christ 公司;SL-100 型高速多功能粉碎机 浙江省永康市松青五金厂;NH310 色差仪 深圳三恩时科技有限公司;M1-211A 微波炉 美的集团有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 微波处理 参考姜鹏等^[11]方法并稍作改动。取 500 g 高粱清洗除杂后在室温下浸泡 3 h 后取出备用,待表面水分自然风干后,在微波 600 W 的条件下处理 6 min,冷却至室温,45 ℃ 热风干燥,冷却至室温后用组织粉碎机粉碎并过 60 目筛,置于 4 ℃ 保存;除未经微波处理外,未处理组的前处理步骤均与处理组相同。

1.2.2 高粱蛋白质的提取 根据周剑敏等^[12]方法稍作修改。称取 500 g 过筛后的高粱粉放置于 3500 mL 石油醚中,在室温下脱脂 6 h 后,除去石油醚,脱脂后的高粱粉在 40 ℃ 条件下烘干。取 200 g 的脱脂后的高粱粉于烧杯中,并加入 1 mol/L 的 NaOH 溶液($\text{pH}=14$),搅拌 4 h 后在 4000 r/min 条件下离心 30 min,取上清液并调节 pH 至 5.0,静置 2 h,在 4000 r/min 条件下离心 30 min 后取出沉淀,用去离子水清洗并在 4000 r/min 条件下离心 3 次,收集沉淀,冷冻干燥后备用。

1.2.3 高粱总蛋白质含量及可溶性蛋白质含量的测定 总蛋白质含量根据 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》。

可溶性蛋白质含量的测定参考方赵志浩等^[13]方法并稍作修改。称取高粱粉 1.0 g 与 9 mL 生理盐水混匀,在冰浴条件下机械均质 2 min 后取出,均质液在 4000 r/min 条件下离心 10 min,分离上清液并定容至 25 mL。取 50 μ L 定容后的液体于试管中,加入 3.0 mL 考马斯亮蓝显色液,混匀后静置 5 min,在 595 nm 波长的条件下测定吸光度为 A_1 ,用去离子水做空白对照,记录吸光度为 A_2 ,以牛血清白蛋白标准品(0.563 g/L)作为标准对照,测得吸光度 A_3 。计算公式如式(1):

$$\text{可溶性蛋白含量}(\text{mg/g}) = \left(\frac{A_1 - A_2}{A_3 - A_2} \right) \times 0.563 \times 0.025 \times 1000 \quad \text{式 (1)}$$

1.2.4 SEM 分析 在 SEM 的载物台上贴上一定数量的导电双面胶带, 取冷冻干燥后的高粱蛋白质均匀至于双面胶上, 用吸耳球吹去多余蛋白质, 载物台在镀金仪中镀金 120 s 后放入 SEM 中, 在电子枪加速电压为 10 kV 的条件下观察蛋白质形态。

1.2.5 FT-IR 分析 在干燥的条件下称取 3 mg 干燥至恒重后的高粱蛋白质样品和 300 mg 的溴化钾粉末混合后研磨 15 min 后过筛, 将过筛后的混合粉末压成片后备用, 并以溴化钾片作空白, 在波数为 400~4000 cm⁻¹ 的条件下进行扫描。

1.2.6 蛋白质体外消化率的测定 采用 Mertz 等^[14]方法测定蛋白质的体外消化率。取高粱粉 200.0 mg 置于离心管中, 加入相当活力为 250 U/mg 的胃蛋白酶溶液 35 mL。溶液在 37 °C 水浴中振荡 2 h, 然后加入 2 mL NaOH 溶液(2 mol/L)并调节 pH 至 14 终止反应。离心后弃上清液, 用 20 mL 磷酸盐缓冲液(pH=7)洗涤沉淀两次, 在相同条件下离心后, 取出沉淀干燥, 测定沉淀中的蛋白质含量。蛋白质体外消化率的计算公式如式(2):

$$\text{蛋白质体外消化率}(\%) = \frac{M - m}{M} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: M 为样品消化前的总蛋白含量; m 为样品消化后的总蛋白含量。

1.2.7 持水力和持油力的测定 采用 Liu 等^[15]方法并稍作修改。称 4.0 g 高粱粉与 20 mL 水或大豆油混合, 放入 50 mL 离心管中, 30 °C 条件下放置 30 min, 每 5 min 搅拌一次, 在 3500 r/min 条件下离心 15 min 后, 弃去上清液称重, 计算公式如(3):

$$\text{持水(油)力}(\text{g/g}) = \frac{\text{样品被水(油)饱和后湿重} - \text{样品干粉重}}{\text{样品干粉重}} \quad \text{式 (3)}$$

1.2.8 色度的测定 采用色度计测定微波处理前后高粱的 L*、a*、b* 和 ΔE 值。并按公式(4)计算 ΔE 值:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad \text{式 (4)}$$

式中: ΔE 表示色差; L* 表示黑白值; a* 表示红绿值; b* 表示黄蓝值。

1.2.9 高粱表面微生物的测定 菌落总数根据 GB4789.2-2016《菌落总数测定》; 霉菌和酵母菌计数根据 GB4789.15-2016《霉菌和酵母总数测定》。

1.3 数据处理

所得数据均测定三次, 用平均值±标准差来表示。利用统计学软件 SPSS 25.0、Graphpad Prism 8.0 和 Origin 8.0 进行分析作图, 采用单因素方差分析比较各组间数据, t 检验法分析组间差异显著性,

P<0.05 表示有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 微波处理影响高粱蛋白质含量结果

蛋白质是高粱中重要的营养物质, 常与淀粉等结合的形式存在。微波处理后, 龙米粮 1 号、龙杂 13 号和红糯高粱的总蛋白质含量分别显著(P<0.05)提高了 0.60%、0.58% 和 0.61%(如图 1)。这与刘佳男等^[16]的研究结果相一致, 微波处理后白高粱的总蛋白质含量提高了 0.60%, 原因可能是由于微波处理破坏了高粱中的蛋白质复合物, 使蛋白质充分释放。如图 1 所示, 微波处理前, 龙米粮 1 号、龙杂 13 号和红糯高粱的可溶性蛋白质含量存在显著差异(P<0.05), 分别为 2.74、3.90 和 1.97 mg/g。微波处理后, 三种高粱的可溶性蛋白质含量显著降低(P<0.05), 分别降低至 1.56、2.03 和 1.00 mg/g。这与赵颖等^[17]研究的结果相类似, 微波处理可使萌芽糙米中的可溶性含量蛋白质降低 59.01%。也有研究表明, 随着微波比功率(1.4~2.2 W/g)的增加, 萌芽糙米中的可溶性蛋白质含量逐渐降低^[18]。微波处理导致高粱中可溶性蛋白质含量降低的原因一方面可能与处理过程中蛋白质发生热降解有关, 另一方面也有可能是因为微波处理使高粱蛋白质结构遭到破坏, 大量的疏水基团外露, 蛋白质溶解度降低^[19]。

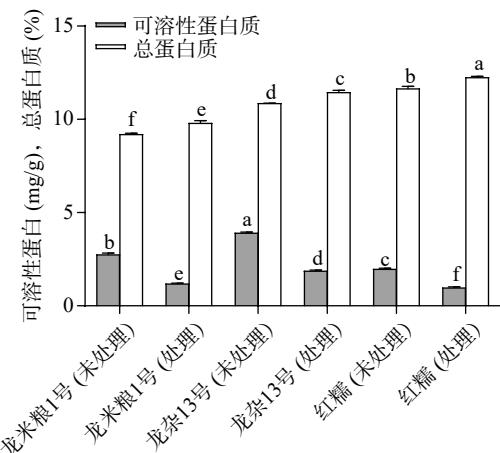


图 1 微波处理对高粱总蛋白质和可溶性蛋白质含量的影响
Fig.1 Effects of microwave treatment on protein and soluble protein contents in sorghum

注: 不同小写字母表示不同品种间有显著性差异(P<0.05);
图 4、图 5 同。

2.2 微波处理改变高粱蛋白质微观结构结果

微波处理前后, 高粱蛋白质扫描电镜结果如图 2 所示。微波处理前, 龙米粮 1 号、龙杂 13 号和红糯高粱等 3 种高粱的蛋白质均呈块状, 表面粗糙, 凹凸不平, 且粒径较大, 但没有孔状结构。微波处理后, 3 种高粱的蛋白质也均呈块状, 粗糙无序, 不平整; 但与未处理组相比, 处理后的高粱蛋白质粒径明显减小, 且表面出现明显裂纹。这可能是由于微波处理产生了强烈的热能, 从而促进了高粱蛋白质的分解, 进而使其粒径减小, 表面产生裂纹^[20]。因此, 微波

处理后高粱蛋白质的微观结构发生改变,故其所表现的理化性质也会随之改变。

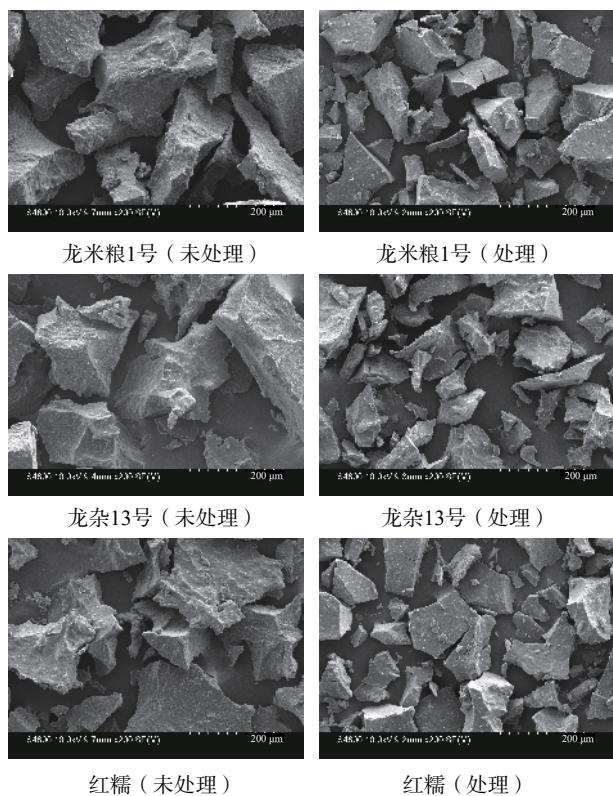


图 2 未处理和微波处理高粱蛋白质的 SEM 图

Fig.2 SEM images of natural and microwave treated sorghum proteins

2.3 高粱蛋白质 FT-IR 分析结果

高粱蛋白质的 FTIR 结果如图 3 所示。微波处理前后,龙米粮 1 号、龙杂 13 号和红糯高粱等 3 种高粱的蛋白质红外光谱上的吸收峰波数没有发生明显的蓝移或者红移,未发现新的吸收峰,这表明微波处理并未改变高粱蛋白质分子的化学键组成,且未产生新的化学物质,属于物理变性。但高粱蛋白质的吸收峰强度有所不同,与未处理相比,处理组的吸收峰强度明显强于未处理组。

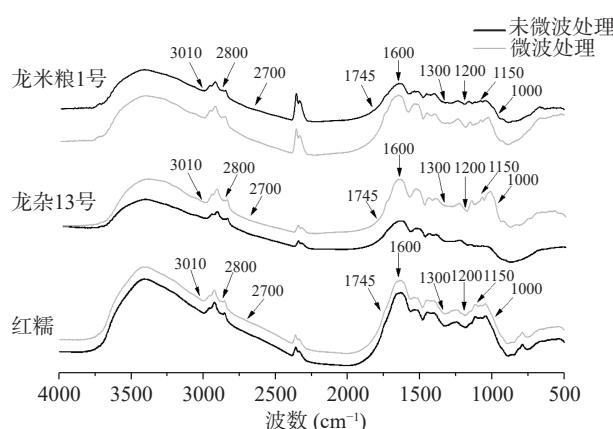


图 3 未处理和微波处理高粱蛋白质的 FT-IR 图谱
Fig.3 FT-IR profiles of sorghum proteins treated with natural and microwave

图 3 表明,高粱蛋白质在 $3010\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ 内有明显的吸收峰,这主要是烃类的氢键或碳碳键伸缩振动峰,在 2800 cm^{-1} 附近出现的吸收峰主要是-NH 和-OH 的伸缩振动峰^[21],而在 1745 cm^{-1} 附近出现的伸缩振动峰主要是 C=O 键的特征峰^[22]。在 1600 cm^{-1} 附近的吸收峰是蛋白质典型的肽键(O=C-N-H)伸缩振动峰^[23]。在 $1300\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ 范围内的伸缩振动峰主要是由 O-H 和 C-O 引起的,而在 $1150\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ 范围内的伸缩振动峰则是由碳水化合物产生的^[24]。

2.4 微波处理降低高粱蛋白质体外消化率结果

如图 4 所示,微波处理前,龙米粮 1 号、龙杂 13 号和红糯高粱等 3 种高粱的蛋白质消化率为 60%~70%。龙杂 13 号高粱的蛋白质消化率显著($P<0.05$)高于其他 2 种高粱。Awika 等^[25]研究发现,高粱中蛋白质的结合形式及脂类、多酚、膳食纤维、细胞壁等成分均可导致抗酶解复合物的形成,从而影响高粱蛋白质的消化率。因此,本研究中,3 种高粱蛋白质的消化率存在差异的原因可能与其自身组成成分有关。微波处理后,3 种高粱的蛋白质消化率分别显著降低 17.40%、15.55% 和 43.63%($P<0.05$)。这与 Duodu 等^[26]研究结果相类似,高粱在热处理后其蛋白质消化率降低约 30%,由于在热处理过程中高粱内部形成大量的含有二硫键的低聚蛋白质,导致其消化率降低。

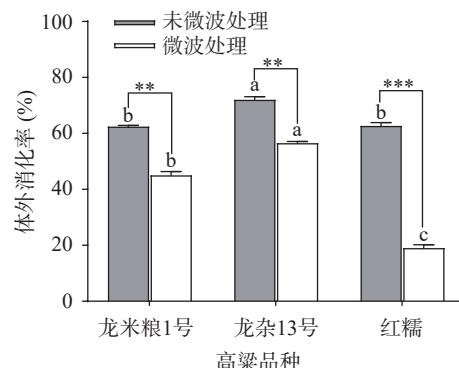


图 4 微波处理对高粱蛋白质体外消化率的影响

Fig.4 Effects of microwave treatment on *in vitro* digestibility of sorghum protein

注: **表示 $P<0.01$, ***表示 $P<0.001$ 。

2.5 微波处理对高粱粉持水力和持油力的影响结果

持水力和持油力是评价谷物食品口感和风味的重要参数。如图 5 所示,微波处理前,龙米粮 1 号、龙杂 13 号和红糯高粱等 3 种高粱粉的持水力和持油力均存在显著差异($P<0.05$),持水力分别为 1.30、1.35 和 1.50 g/g,持油力分别为 1.27、1.35 和 1.20 g/g。微波处理后 3 种高粱的持水力分别提高了 0.34、0.40 和 0.32 g/g,而持油力分别降低了 0.11、0.18 和 0.08 g/g。这与 Sharanagat 等^[27]研究的结果相一致,与对照组相比,随着微波处理时间(5~15 min)的增加,高粱粉的持水力显著提高 0.25 g/g,持油力显著降低 0.10 g/g。研究表明,微波处理可导致谷物表面

出现多孔结构, 谷物内部聚合物减少, 从而增加谷物粉的持水力; 而持油力降低的原因可能与微波处理过程中氨基酸极性的改变有关^[28]。

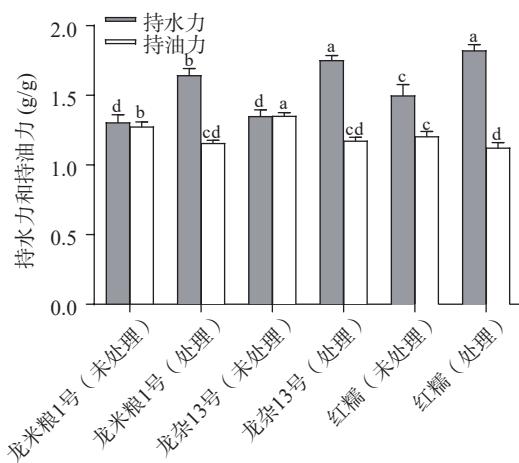


图 5 微波处理对高粱粉的持水力和持油力的影响
Fig.5 Effect of microwave treatment on water - and oil-holding capacity of sorghum powder

2.6 微波处理对高粱粉色度的影响结果

颜色作为谷物食品的一种重要感官品质, 对消费者的接受度有很大的影响。如表 1 所示, 与未处理的高粱相比, 微波处理后, 高粱龙杂 13 号和红糯 L^* 值均显著降低 ($P<0.05$), 高粱龙米粮 1 号和红糯 a^* 值均显著升高 ($P<0.05$), 高粱龙米粮 1 号和龙杂 13 号 b^* 值显著升高 ($P<0.05$), 三种高粱的 ΔE 值均显著升高 ($P<0.05$)。这与 Sharanagat 等^[29] 研究的结果相一致, 微波处理后高粱的 a^* 、 b^* 和 ΔE 增加, 而 L^* 值降低, 原因可能是高粱在微波处理过程中发生了美拉德反应和焦糖化反应。此外, 微波处理后龙米

粮 1 号高粱的 L^* 值变化不显著 ($P>0.05$) 原因可能是龙米粮 1 号是白色高粱, 而微波处理后龙杂 13 号高粱的 a^* 值和红糯高粱的 b^* 值变化不显著 ($P>0.05$), 可能由于这两种高粱的表皮呈红色, 麸皮中含有红色色素, 掩盖了微波处理前后色度的变化。

2.7 微波处理对高粱粉表面微生物的影响结果

微波技术作为一种传统的杀菌技术, 因其具有无污染、杀菌速度快等优点, 近年来在食品加工中得到了广泛的应用。如表 2 所示, 未处理的高粱中菌落总数和霉菌数量最高, 酵母菌数量 <10 CFU/g。微波处理前, 龙杂 13 号高粱中菌落总数和霉菌的数量显著 ($P<0.05$) 高于龙米粮 1 号和红糯高粱。推测原因可能是龙杂 13 号高粱中的含水率高于其他两种高粱, 有助于霉菌等微生物的生长繁殖^[30]。微波处理后, 3 种高粱中的菌落总数和霉菌的数量均显著 ($P<0.05$) 低于对照组, 菌落总数和霉菌的灭菌率分别为 98.75% 和 98.94%。这与 Srisang 等^[31] 研究结果相类似, 与未处理的谷物相比, 微波处理可使谷物表面的微生物数量减少约 90%。研究表明, 在微波的作用下, 微生物会因分子极化而吸收微波能量, 从而使其蛋白质变性, 失去生物活性, 因此微波处理会导致高粱表面微生物数量降低^[32]。

3 结论

采用微波处理高粱, 并对微波处理前后高粱蛋白和高粱粉的理化性质进行比较分析。结果表明, 微波处理后, 高粱蛋白质分子表面粗糙、粒径减小, 体外消化率降低, 然而其化学键及化学基团并未发生改变, 为高粱食品原料处理提供物理数据依据。此外, 微波处理后高粱粉的蛋白质含量和持水力增加, 可溶性蛋白质含量和持油力降低, 表面微生物数量减少,

表 1 微波处理对高粱粉色度的影响
Table 1 Effect of microwave treatment on sorghum powder chroma

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
龙米粮1号(未处理)	62.98±2.51 ^a	2.63±0.23 ^c	13.05±1.88 ^b	34.13±1.35 ^b
龙米粮1号(处理)	61.22±1.50 ^a	3.50±0.41 ^d	19.21±0.58 ^a	36.60±0.23 ^a
龙杂13号(未处理)	61.37±0.85 ^a	4.38±0.24 ^c	11.01±0.55 ^c	31.26±0.07 ^d
龙杂13号(处理)	53.98±0.81 ^b	4.84±0.10 ^b ^c	14.60±0.12 ^b	32.57±0.07 ^c
红糯(未处理)	52.75±0.49 ^b	5.35±0.36 ^b	8.25±0.93 ^d	29.11±0.21 ^e
红糯(处理)	40.42±0.74 ^c	8.73±0.55 ^a	8.87±0.37 ^d	30.85±0.18 ^d

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 表 2 同。

表 2 微波处理对高粱粉表面微生物的影响
Table 2 Effects of microwave treatment on surface microorganism of sorghum powder

样品	菌落总数(CFU/g)	霉菌数量(CFU/g)	酵母菌数量(CFU/g)
龙米粮1号(未处理)	16200±748 ^c	4200±535 ^b	<10
龙米粮1号(处理)	73±12 ^d	45±6 ^d	<10
龙杂13号(未处理)	17667±984 ^a	11533±704 ^a	<10
龙杂13号(处理)	130±29 ^d	117±13 ^d	<10
红糯(未处理)	17331±137 ^b	1413±368 ^c	<10
红糯(处理)	37±12 ^d	17±3 ^d	<10

色泽变暗,有助于指导高粱食品加工中化学指标调整。因此,微波处理对高粱蛋白和高粱粉的理化性质具有明显影响,可为功能性高粱食品的开发及应用提供一定的参考。

参考文献

- [1] KAUR K D, JHA A, SABIKHI L, et al. Significance of coarse cereals in health and nutrition: A review[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2014, 51(8): 1429–1441.
- [2] BELTON P S, DELGADILLO I, HALFORD N G, et al. Kafirin structure and functionality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2006, 44(3): 272–286.
- [3] TAYLOR J R N, BELTON P S, BETA T, et al. Increasing the utilisation of sorghum, millets and pseudocereals: Developments in the science of their phenolic phytochemicals, biofortification and protein functionality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(3): 257–275.
- [4] 王章存, 康艳玲. 国内外谷物蛋白发展概况[J]. *中国食品添加剂*, 2006, 5: 110–113. [WANG Z C, KANG Y L. Status of development on cereal protein[J]. *China Food Additives*, 2006, 5: 110–113.]
- [5] STEPHEN G G, RANIL C, DEAN B, et al. Physicochemical and antimicrobial properties of citral and quercetin incorporated kafirin-based bioactive films[J]. *Food Chemistry*, 2015, 168: 341–347.
- [6] 戴凌燕, 蔡欣月, 陈卓, 等. 高粱醇溶蛋白的研究进展[J]. *食品工业*, 2018, 39(3): 253–257. [DAI L Y, CAI X Y, CHEN Z, et al. Advance research of sorghum kafirin[J]. *Food Industry*, 2018, 39(3): 253–257.]
- [7] 霍金杰, 肖志刚, 王娜, 等. 青稞蛋白质的微波辅助提取工艺及性质研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(21): 145–153. [HUO J J, XIAO Z G, WANG N, et al. Study on the microwave-assisted extraction technology and properties of barley protein[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(21): 145–153.]
- [8] 刘海波, 廖超, 郑万琴, 等. 微波处理小麦面粉对淀粉及蛋白性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 91–97. [LIU H B, LIAO C, ZHENG W Q, et al. Effect of microwave-treated wheat flour on starch and protein properties[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(14): 91–97.]
- [9] 胡方洋, 陈金玉, 王轻, 等. 不同干燥方式对苦荞蛋白功能性质的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(1): 103–108. [HU F Y, CHEN J Y, WANG Q, et al. Effects of different drying methods on functional properties of tartary buckwheat protein[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(1): 103–108.]
- [10] 王娜, 孟利军, 黄忠民, 等. 加工方式对非发酵面团小麦醇溶蛋白致敏性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 292–299. [WANG N, MENG L J, HUANG Z M, et al. Effects of different processing on allergenicity of wheat gliadin in non-fermented dough[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 292–299.]
- [11] 姜鹏, 李忍, 戴凌燕, 等. 浸泡和微波处理对三种高粱熟化的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 70–74. [JIANG P, LI R, DAI L Y, et al. Effects of soaking and microwave treatments on cultivability of three kinds of sorghums[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(8): 70–74.]
- [12] 周剑敏, 尹方平, 于晨, 等. 高粱醇溶蛋白 ACE 抑制肽的制备及其稳定性研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(8): 66–72.
- [13] ZHOU J M, YIN F P, YU C, et al. Preparation and stability of ACE inhibitory peptides derived from sorghum protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(8): 66–72.
- [14] 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 Z H, LIU L, ZHANG M W, et al. Combined effect of enzymatic pretreatment and extrusion on quality properties of brown rice flour[J]. *Food Science*, 2019, 40(1): 108–116.]
- [15] MERTZ E T, HASSEN M M, CAIRNS Whittern C, et al. Pepsin digestibility of proteins in sorghum and other major cereals[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1984, 81(1): 1–2.
- [16] LIU H, FAN H, CAO R, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of sorghum starch altered by high hydrostatic pressure[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 753–760.
- [17] 刘佳男, 于雷, 王婷, 等. 微波处理对白高粱淀粉理化特性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(5): 186–190. [LIU J N, YU L, WANG T, et al. Effect of microwave treatment on physicochemical properties of white sorghum starch[J]. *Food Science*, 2017, 38(5): 186–190.]
- [18] 赵颖, 申莉丽, 姜雯翔, 等. 3 种膨化方式处理对萌芽糙米品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(3): 150–155. [ZHAO Y, SHEN L L, JIANG W X, et al. Effects of three different puffing methods on the quality of germinated brown rice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(3): 150–155.]
- [19] 姜雯翔. 萌芽糙米热风微波干燥与焙炒及膨化加工研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014. [JIANG W X. Study on hot air microwave drying, baking and expansion processing of sprout brown rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.]
- [20] 王振宇, 刘欢, 马俪珍, 等. 热处理下的猪肉蛋白质特性[J]. *食品科学*, 2008, 5: 73–77. [WANG Z Y, LIU H, MA L Z, et al. Characteristics of porcine proteins by heat treatment[J]. *Food Science*, 2008, 5: 73–77.]
- [21] LI Y, HU A, ZHENG J, et al. Comparative studies on structure and physicochemical changes of millet starch under microwave and ultrasound at the same power[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 141: 76–84.
- [22] XU B, YUAN J, WANG L, et al. Effect of multi-frequency power ultrasound (MFPU) treatment on enzyme hydrolysis of casein[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 63: 104930.
- [23] SIANO F, SORRENTINO G, RICCARDI M, et al. Chemical, nutritional, and spectroscopic characterization of typical ecotypes of Mediterranean area beans[J]. *European Food Research and Technology*, 2018, 244(5): 795–804.
- [24] 徐丽. 富含 γ -氨基丁酸的小米发芽条件优化及特性分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019. [XU L. Optimization of germinating conditions and characteristic analysis of millet rich in γ -aminobutyric acid[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.]

- [24] 曾剑华, 孟妍, 刘琳琳, 等. 基于多光谱技术表征汉麻分离蛋白构象并分析 pH 对其构象的影响 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3748–3754. [ZENG J H, MENG Y, LIU L L, et al. Characterization and effects of pH on the conformation of hemp protein isolate based on multi-spectroscopic technique [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(12): 3748–3754.]
- [25] AWIKA J M, ROONEY L W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health [J]. *Phytochemistry*, 2004, 65(9): 1199–1221.
- [26] DUODU K G, NUNES A, DELGADILLO I, et al. Effect of grain structure and cooking on sorghum and maize *in vitro* protein digestibility [J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 35(2): 161–174.
- [27] ADEBIYI J A, OBADINA A O, MULABA Bafubandi A F, et al. Effect of fermentation and malting on the microstructure and selected physicochemical properties of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) flour and biscuit [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 132–139.
- [28] OBASI N E, UNAMMA N C, NWOFIA G E. Effect of dry heat pre-treatment (toasting) on the cooking time of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) [J]. *Nigerian Food Journal*, 2014, 32(2): 16–24.
- [29] HU Z, SHAO Y, LU L, et al. Effect of germination and parboiling treatment on distribution of water molecular, physicochemical profiles and microstructure of rice [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 13(3): 1898–1906.
- [30] AUKSORNSRI T, BORNHORST E R, TANG J, et al. Developing model food systems with rice based products for microwave assisted thermal sterilization [J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2018, 96: 551–559.
- [31] SRISANG N, VARANYANOND W, SOPONRONNARIT S, et al. Effects of heating media and operating conditions on drying kinetics and quality of germinated brown rice [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 107(3): 385–392.
- [32] AUKSORNSRI T, TANG J, TANG Z W, et al. Dielectric properties of rice model food systems relevant to microwave sterilization process [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 45: 98–105.