

不同加工方式山药粉的品质特性比较

耿可赞^{1,2}, 段映羽^{2,3}, 张瑞芬², 马勤^{2*}

(1. 武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 湖北武汉 430205) (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)

(3. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434001)

摘要: 该文探究了热风干燥、麸炒、挤压膨化和喷雾干燥四种加工方式制备的山药粉的冲调特性、消化特性和活性成分含量的差异。结果表明, 在冲调特性方面, 热风干燥和麸炒山药粉结块率低但其冲调性、分散稳定性较差, 其 WSI 和 TSI 分别为 5.33%、6.67% 和 9.67%、6.09%; 挤压膨化和喷雾干燥可以显著改善山药粉的冲调性和分散稳定性, 其 WSI 分别为 23.6%、15.33%, TSI 分别为 2.89%、3.32%。消化特性方面, 热风干燥山药粉 RDS 和 RS 含量分别为 18.16% 和 75.49%, 蛋白体外消化率为 57.99%; 相较于热风干燥, 挤压膨化和喷雾干燥均可以提高山药粉的淀粉和蛋白质的消化特性, 其中挤压膨化山药粉的消化特性最佳, 其 RDS 含量、RS 含量、蛋白体外消化率分别为 47.37%、50.35% 和 74.42%。活性成分含量方面, 挤压膨化山药粉多糖含量最高为 4.53%, 喷雾干燥山药粉尿囊素含量最高为 5.89 mg/g。这些结果表明, 挤压膨化山药粉和喷雾干燥山药粉具有良好的冲调特性和消化特性, 并能较好的保留活性成分。该研究可为开发山药营养健康食品提供重要的技术支持。

关键词: 山药粉; 挤压膨化; 喷雾干燥; 冲调特性; 消化特性; 活性成分

文章编号: 1673-9078(2024)10-239-249

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.1233

Comparison of the Quality Characteristics of Yam Powder Processed using Different Methods

GENG Kezan^{1,2}, DUAN Yingyu^{2,3}, ZHANG Ruifen², MA Qin^{2*}

(1. School of Environmental Ecology and Biological Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, 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) (3. College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434001, China)

Abstract: Here, differences in the blending and digestion characteristics and active ingredient contents of yam powder prepared using four processing methods, i.e., hot air drying, stir-frying with bran, extrusion, and spray drying, were investigated. Results revealed that in terms of blending characteristics, yam powders processed using hot air drying and stir-frying showed lower agglomeration rates but poorer blending and dispersibility characteristics, with WSI and TSI values of 5.33%, 6.67%, and 9.67%, 6.09%, respectively. Extrusion and spray drying significantly improved the blending and dispersibility characteristics of yam powder, with WSI values of 23.6% and 15.33%, and TSI values of 2.89% and 3.32%, respectively. In terms of digestion characteristics, hot air dried yam powder had RDS and RS contents of 18.16% and 75.49%, and an in vitro protein digestibility of 57.99%. Compared with hot air drying, extrusion and spray drying both improved the starch and protein digestion characteristics of yam powder, with extrusion showing the best digestion characteristics, with RDS content, RS content, and in vitro protein digestibility of 47.37%, 50.35%, and 74.42%, respectively. In terms of active ingredient content, the polysaccharide content of extruded yam powder was the highest at 4.53%, and the uronic acid content of spray-dried yam powder was the highest at 5.89 mg/g. These results indicate that extruded yam powder and spray-dried yam powder have good blending and digestion characteristics and can better preserve active ingredients. This study provides important technical support for the development of yam nutritional health products.

引文格式:

耿可赞, 段映羽, 张瑞芬, 等. 不同加工方式山药粉的品质特性比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(10): 239-249.

GENG Kezan, DUAN Yingyu, ZHANG Ruifen, et al. Comparison of the quality characteristics of yam powder processed using different methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 239-249.

收稿日期: 2023-10-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600103); 广东特支计划本土创新团队项目(2019BT02N112); 广东省农业科学院人才引进项目(R2019YJ-YB1003; R2020PY-JG011)

作者简介: 耿可赞(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能食品, E-mail: 1194717394@qq.com; 共同第一作者: 段映羽(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 503730692@qq.com

通讯作者: 马勤(1990-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: qinma_gaas@163.com

frying with bran had low caking rates but relatively poor blending and dispersion stability, with the water solubility index (WSI) being 5.33% and 6.67% and thermal stability index (TSI) being 9.67% and 6.09%, respectively. Extrusion and spray drying significantly improved the blending and dispersion stability of yam powder, with WSI of 23.6% and 15.33% and TSI of 2.89% and 3.32%, respectively. In terms of digestive characteristics, the RDS and RS contents of hot air-dried yam powder were 18.16% and 75.49%, respectively, and the *in vitro* digestibility of yam proteins was 57.99%. Compared with hot air drying, both extrusion and spray drying improved the digestibility of the starches and proteins present in yam powder. The digestion characteristics of the extruded yam powder were the best, with the RDS content, RS content, and *in vitro* digestibility of yam proteins being 47.37%, 50.35%, and 74.42%, respectively. In terms of the active ingredient content, the polysaccharide content was the highest (4.53%) in extruded yam powder, and the allantoin content was the highest (5.89 mg/g) in spray-dried yam powder. These results showed that extruded and spray-dried yam powders had good blending and digesting characteristics, and active ingredients could be well retained. This study can provide substantial technical support for the development of healthy and nutritional foods based on yam.

Key words: yam powder; extrusion; spray drying; blending characteristics; digestive characteristics; active ingredients

山药 (*Dioscorea opposita* Thumb.) 是一种薯蓣科植物块茎, 富含淀粉和蛋白质等营养成分, 还含有丰富的多糖、多酚、皂苷和尿囊素等活性成分^[1]。《本草纲目》记载山药具有益肾气、健脾胃等功效, 现代药理学研究表明其具有调节免疫、改善胃肠屏障和调节糖脂代谢的作用^[2]。然而鲜山药季节性强, 水分含量高, 容易腐烂, 不耐储藏, 降低了经济效益。山药粉含水量低, 易于储藏和运输, 且可作为原料添加到其他食品当中, 丰富山药食品种类。因此, 将鲜山药加工成山药粉既可以有效解决山药不耐储藏的问题, 又可以增加山药的产品种类, 为山药市场的开拓提供新思路。

目前常见的山药粉制备方式主要有热风干燥、麸炒等^[3-6]。热风干燥是食品行业中广泛应用的干燥技术, 其操作简便, 成本较低, 但由于其耗时较长且稳定高, 存在营养成分流失多、粉体颜色深的问题。Okunola 等^[3]曾将山药作为原料, 探究找到了适合山药对流热风干燥含水率预测的动力学模型—Midilli 模型。Meng 等^[4]曾探究出山药经麸炒后发生美拉德反应, 药用成分含量增加。挤压膨化技术是利用高温、高压、高剪切将谷物原料膨化成型, 具有高效低耗、生产成本低、产品营养损失小等优点, 目前已广泛应用于食品加工行业。焦昆鹏等^[5]研究表明挤压膨化可显著增加山药全粉的快消化淀粉含量, 提高其消化特性。任广跃等^[6]比较了热风干燥、喷雾干燥、真空冷冻干燥、喷雾冷冻干燥和微波真空冷冻干燥对山药全粉品质的影响, 发现综合溶解度、多糖含量、干燥耗能和吸湿性等特性, 喷雾干燥法制得的山药粉品质最优。山药中富含淀粉类成

分, 其粉体存在粘度大, 冲调性不佳, 淀粉消化性差的问题, 且加工过程中易造成营养活性成分的损失。目前研究大多关注山药加工方式的建立以及其对山药粉外观、口感等品质特性的影响, 对其营养活性成分的变化关注较少, 且不同加工方式对山药粉品质特性的影响差异也报道较少。

本研究将采用热风干燥、麸炒、挤压膨化、喷雾干燥四种加工方式制备山药粉, 比较不同加工方式对山药粉的冲调特性、消化特性和活性成分含量的影响, 研究结果将为山药在营养健康食品的开发利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜山药, 广东高州; 猪胰 α -淀粉酶, 美国 Sigma 公司; 糖化酶 (100 U/mg), 上海瑞永生物科技有限公司; 胃蛋白酶、胰蛋白酶、中温 α -淀粉酶 (10 U/mg), 广州齐云生物技术有限公司; 甲醇、3,5-二硝基水杨酸、酒石酸钾钠、丙酮、乙酸乙酯、正己烷、苯酚均为分析纯。

1.2 仪器与设备

FMHE36-24 双螺杆挤压膨化机, 湖北富马科食品工程技术有限公司; ADL311S 喷雾干燥器, 日本雅马拓公司; Turbiscan Lab 稳定性分析仪, 北京朗迪森科技有限公司; Agilent 1200 高效液相色谱仪, 美国 Agilent 公司; LEO1530VP 扫描电子显微镜, 德国 Zeiss 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 四种不同加工方式制备山药粉方法

热风干燥：挑选、清洗、削皮→切片(2~3 mm)→热烫90 s→护色剂(0.5 wt.% 柠檬酸, 0.5 wt.% 氯化钠, 0.125 wt.% 氯化钙)中浸泡60 min→热风干燥(温度40 ℃、湿度5%)20 h→打粉过80目筛网

麸炒：热风干燥后的山药片→以100 g 山药混合10 g 麦麸片中火翻炒→炒至山药表面焦黄, 麦麸炒黑, 起锅→打粉过80目筛网

挤压膨化：热风干燥后的山药片→粉碎至80目→挤压膨化(水分含量20%, 喂料量35 kg/h, 螺杆转速300 r/min, 温区: II 60 ℃, III 120 ℃, IV 130 ℃, V 140 ℃, VI 60 ℃)→烘干(45 ℃、60 min)→打粉过80目筛网

喷雾干燥：挑选、清洗→削皮→切片(2~3 mm)→热烫90 s→护色剂中浸泡60 min→打浆机打浆120 s(料液比1:3)→均质10 min→喷雾干燥(进风温度170 ℃, 排风温度90 ℃, 入料流量15 mL/min)



图1 样品制备流程图

Fig.1 Sample preparation flow chart

1.3.2 分析与测定

1.3.2.1 山药粉色度的测定基本营养成分的测定

淀粉含量的测定：酸水解法，参照 GB/T 5009.9-2016。

总蛋白质含量的测定：凯氏定氮法，参照 GB/T 5009.5-2016。

粗脂肪含量的测定：索氏提取法，参照 GB/T 14772-2008。

灰分含量的测定：GB/T 5009.4-2016。

1.3.2.2 山药粉色度的测定

使用 UltraScanVIS 色度仪测量山药粉的颜色, 得到 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值, 并计算总色度值 E^*ab 和色差值 ΔE^* 。其中 L^* 值表示黑白亮度, 值越大则表示越白亮; a^* 值表示绿红色, 值越大则表示样品越红; b^* 值表示蓝黄色, 值越大则表示样品越黄。

1.3.2.3 山药粉冲调特性的测定

1) 糊化特性

参照阮蕴莹等^[7]的方法。准确称量3.0 g 山药粉加入含25 mL 蒸馏水至快速粘度仪(Rapid Visco Analyzer, RVA)配套的样品筒中, 用配套的浆型搅拌器混合均匀, 避免样品和液体溅出筒外。RVA的测定程序设置为: 起始温度38 ℃保持1 min, 以12 ℃/min 的速率升温至95 ℃, 保温5 min, 再以12 ℃/min 的速率降温至38 ℃, 并保温1 min; 浆型搅拌器在开始10 s 内转速上升到960 r/min, 之后保持在160 r/min。

利用TCW (Thermal Cycle for Windows) 配套软件进行分析并绘制RVA 曲线, 分析得到RVA 特征值包括峰值粘度、最低粘度、最终粘度、衰减值和回生值。

2) 水溶性指数、吸水性指数

参考Sahu 等^[8]的方法并稍加改进。准确称取2.5 g 样品至50 mL 离心管中, 加入30 mL 去离子水, 275 r/min 振荡30 min, 随后3 000×g 离心15 min, 取上清液倒入恒重的称量瓶中, 放入烘箱105 ℃直至质量恒定。水溶性指数(Water Solubility Index, WSI) 和吸水性指数(Water Absorbability Index, WAI) 的计算公式如下:

$$B_1 = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{m_2}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B_1 ——水溶性指数(WSI), %;

B_2 ——吸水性指数(WAI), %;

m_1 ——上清液残余物干重, g;

m_2 ——倾出上清液后凝胶干重, g;

m ——样品干重, g。

3) 结块率

参考刘静波等^[9]的方法并稍加改进。准确称取20 g 样品于事先加入180 mL 80 ℃去离子水的500 mL 烧杯中, 静置10 min 后用预先干燥至恒重的20目筛对山药粉过滤, 清水漂洗筛上物, 连带筛网放入105 ℃干燥至恒重。结块率的计算公式如下:

$$G = \frac{m_3 - m_4}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

G ——结块率, %;

m_3 ——筛网及结块的质量, g;

m_4 ——筛网质量, g;

m —样品干重, g。

4) 分散稳定性

参照白洁等^[10]的方法并稍加改进。制备 10 wt.% 的山药粉溶液, 搅拌均匀, 待样品冷却至 37 °C 左右时, 倒入 20 mL 的测量池内备用, 采用 Turbiscan 稳定性分析仪测定其分散稳定性。参数设置为: 测量探头从样品池底部到顶部每 40 μm 扫描一次, 扫描时间 10 min, 扫描间隔 30 s, 扫描温度 37 °C, 选取背散射光对样品进行分析, 并通过计算样品中部 (10~30 mm) 的稳定性动力学指数 (Turbiscan Stability Index, TSI) 来表征样品的分散稳定性。

5) 冻融稳定性

根据 Yadav 等^[11]使用的方法测定冻融稳定性, 并进行一些修改。1.5 g 山药粉溶解在 25 mL 水中, 配制成乳液 (6%, m/m) 在沸水浴中糊化持续 30 min, 然后冷却至室温, 并 -18 °C 中储存 24 h, 在 60 °C 解冻 1 h, 以 4 000 r/min 离心 20 min, 弃去上清液, 称重。根据公式计算析水率。

$$A = \left(1 - \frac{m_5}{m_6}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中:

A —析水率, %;

m_5 —离心后沉淀物质量, g;

m_6 —离心前样品质量, g。

1.3.2.4 山药粉消化特性的测定

1) 糊化度

参考戴晓慧等^[12]的条件及方法。准确称取 0.1 g 样品均匀分散在 49 mL 去离子水中, 加入 1 mL 浓度为 10 mol/L 的 KOH 溶液, 以 750 r/min 速率搅拌 10 min, 4 500 r/min 离心 10 min 后取上清 1.0 mL, 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 后加 0.1 mL 碘液 (0.25 g 碘和 1.0 g 碘化钾定容至 25 mL), 于 600 nm 波长下测定吸光值 A_1 。上述操作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 溶液的体积替换为 1.0 mL, 其他操作相同, 所测得吸光值为 A_2 。糊化度计算公式如下:

$$H = \frac{A_1}{A_2} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

H —糊化度, %;

A_1 —第一次处理吸光值;

A_2 —第二次处理吸光值。

2) 快、慢、抗消化淀粉

参考戴晓慧等^[12]的方法并稍加改进。准确称取 0.3 g 山药粉样品, 加入 10 mL 浓度为 0.2 mol/L, pH 值为 5.2 的醋酸缓冲液后, 煮沸 10 min 完全糊化后加入 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), 于 37 °C 下水浴振荡。反应 0、20、120 min 后取 1 mL 酶解液, 加入少量去离子水稀释, 立即沸水浴灭酶 5 min, 随后 6 000 r/min 离心 10 min, 取上清液定容。通过测定快消化淀粉 (Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉 (Slowly Digestible Starch, SDS) 和抗性淀粉 (Resistant Starch, RS) 的含量分析山药粉的淀粉消化特性。

$$D_1 = \frac{G_{20} - E_1}{E_2} \times 0.9 \times 100\% \quad (6)$$

$$D_2 = \frac{G_{120}}{G_{20}} \times 0.9 \times 100\% \quad (7)$$

$$D_3 = 100\% - D_1 - D_2 \quad (8)$$

式中:

D_1 —快消化淀粉含量 (RDS), %;

D_2 —慢消化淀粉含量 (SDS), %;

D_3 —抗性淀粉含量 (RS), %;

G_{20} 和 G_{120} —消化 20 min 和 120 min 后酶解液中还原糖的量, mg;

E_1 —酶水解处理前淀粉中的还原糖的量 (FG), mg;

E_2 —样品总淀粉的量 (TS), mg。

3) 还原糖

参考文伟等^[13]的方法并稍加改进。准确称取 2.0 g 样品加去离子水 30 mL, 275 r/min 震荡 90 min, 随后 4 000 r/min 离心 10 min, 取上清定容至 50 mL, DNS 比色法测定其还原糖含量。

4) 蛋白体外消化率

参考甄红敏等^[14]的方法并做出适当改进。事先准备 5 mL 预热至 37 °C, 浓度为 0.1 mol/L 的 HCl, 准确称取 1.0 g 样品加入其中, 随后加入 50 μg 胃蛋白酶 (酶: 底物为 1:100, m/m), 37 °C 搅拌消化 2 h, 用浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 值至 7.0 终止反应。随后加 50 μg 胰蛋白酶 (酶: 底物为 1:100, m/m), 37 °C 搅拌消化 2 h。取 5 mL 酶解液沸水浴 5 min 灭酶, 冷却后加入 5 mL 的 10% (m/m) 三氯乙酸 (TCA), 混合均匀后 8 000×g 离心 20 min, 弃去上清, 向沉淀中加入 5 mL 10% (m/V) TCA 洗涤, 8 000×g 再次离心 20 min。转移沉淀, 采用凯式定氮法测定其含氮量。蛋白质体外消化率 (*In Vitro*

Protein Digestibility, IVPD) 计算公式如下:

$$E = \frac{N_0 - N_t}{N_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中:

E —蛋白质体外消化率 (IVPD), %;

N_0 —消化前样品 TCA 不溶性氮含量, mg;

N_t —消化 t min 后样品 TCA 不溶性含氮, mg。

1.3.2.5 山药粉活性成分的测定

1) 多糖

参考关倩倩等^[15]的方法并稍加改进。酶解提取法: 称取预处理山药粉 2.5 g, 加入 50 mL 水和 6.4 U 中温 α -淀粉酶, 60 °C 恒温浸提 1 h, 再加入 3 U 糖化酶, 60 °C 恒温浸提 1.5 h 后, 以 8 000 r/min 速度离心 10 min 取上清, 加入 8 U 中温 α -淀粉酶, 60 °C 恒温浸提 45 min, 加入 1.25 U 糖化酶, 60 °C 浸提 45 min, 取 5 mL 样品加入 4 倍体积的无水乙醇静置过夜, 以 3 500 r/min 的速度离心 5 min, 用无水乙醇洗涤 2 次, 定容至 20 mL, 采用硫酸苯酚法测定。

2) 尿囊素

参考明鹤等^[16]的测定方法并做一定的修改。尿囊素供试品溶液的制备: 精准称定山药粉末 500 mg, 置于 25 mL 量瓶中, 加入 20 mL 20% (V/V) 乙醇使其充分浸润, 超声 30 min (350 W, 30 °C), 放凉后用 20% (V/V) 乙醇定容至刻度线, 震荡 10 min, 8 000 r/min 离心 10 min, 0.45 μ m 微孔滤膜过滤, 滤液即为供试品溶液。

尿囊素对照品溶液的制备: 精密称定尿囊素对照品约 5.0 mg, 于 25 mL 量瓶中, 加入 20 mL 20% (V/V) 乙醇, 超声使其充分溶解, 放凉后加入 20% (V/V) 乙醇定容至刻度, 摇匀作为母液。

色谱条件: 色谱柱: NH2P-50-4E; 流动相: 乙腈-水 (50:50); 流速: 1.0 mL/min; 检测波长: 210 nm; 柱温: 30 °C; 进样量: 10 μ L/次。

1.3.2.6 山药粉形态结构的测定

用 Merlin 高分辨率场发射扫描电子显微镜系统检查样品的微观结构。通过双面胶带将样品粘附扫描电镜铝短柱上, 然后使用溅射涂布机涂覆薄金层。在高真空条件下以 5.0 kV 的低加速电压拍摄涂覆的样品, 图片扫描倍数为 1 000 \times 。

1.3.3 实验数据的处理与分析

实验结果以平均值 \pm 标准差表示, 采用 Origin 9.1 软件作图。采用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析, Duncan 检验进行组间差异显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同加工方式山药粉基本营养成分比较

由表 1 可知, 干山药中主要成分是淀粉、蛋白质, 脂肪含量较低。热风干燥山药粉中淀粉和蛋白质的含量分别为 79.74% 和 7.46%, 经麸炒、挤压膨化加工后山药粉的淀粉含量显著降低, 分别为 77.22%、77.49%, 而粗蛋白的含量无显著变化。喷雾干燥山药粉的淀粉含量为 77.09%, 蛋白质含量为 10.33%。挤压膨化的高温高剪切力及喷雾干燥的高温使淀粉分子内的 α -1,4 糖苷键断裂, 淀粉发生水解, 大分子物质转变成小分子糖类。同时高温会使部分脂类物质蒸发, 原料中的脂肪能够与其他营养物质反应生成复合物。

表 1 不同加工工艺山药粉的基本营养成分比较

Table 1 Comparison of basic nutritional components of Chinese yam powder under different processing technologies

加工方式	淀粉/(%, 干基)	蛋白质/(%, 干基)	脂肪/(%, 干基)	灰分/%
热风干燥	79.74 \pm 0.36 ^a	7.46 \pm 0.03 ^b	0.33 \pm 0.09 ^a	3.84 \pm 0.28 ^a
麸炒	77.22 \pm 0.12 ^b	7.27 \pm 0.02 ^b	0.21 \pm 0.07 ^{ab}	2.58 \pm 0.04 ^b
挤压膨化	77.49 \pm 0.72 ^b	7.34 \pm 0.11 ^b	0.10 \pm 0.015 ^b	3.93 \pm 0.21 ^a
喷雾干燥	77.09 \pm 0.11 ^b	10.33 \pm 0.42 ^a	0.09 \pm 0.03 ^b	4.97 \pm 0.52 ^a

注: 同列不同小写字母表示该指标数值间差异显著 ($P < 0.05$)。下表同。

表 2 不同加工方式山药粉的色度比较

Table 2 Comparison of chroma of Chinese yam powder with different processing technology

加工方式	L^* (亮度)	a^* (红/绿)	b^* (黄/蓝)	ΔE^* (色差)
热风干燥	83.61 \pm 0.01 ^b	-1.01 \pm 0.05 ^c	7.37 \pm 0.02 ^d	
麸炒	82.13 \pm 0.04 ^c	0.07 \pm 0.06 ^b	10.82 \pm 0.08 ^a	3.91 \pm 0.06 ^c
挤压膨化	79.87 \pm 0.03 ^d	-0.43 \pm 0.07 ^d	8.59 \pm 0.09 ^c	3.97 \pm 0.01 ^c
喷雾干燥	86.97 \pm 0.03 ^a	-0.13 \pm 0.04 ^c	3.69 \pm 0.03 ^c	5.04 \pm 0.01 ^b

表3 不同加工方式处理山药粉的糊化特性比较 (cp)

Table 3 Comparison of gelatinization characteristics of Chinese yam powder treated by different processing methods

加工方式	峰值粘度	最低粘度	最终粘度	衰减值	回生值
热风干燥	830.50 ± 4.50 ^a	805.50 ± 0.50 ^a	1 049.50 ± 2.50 ^a	24.50 ± 0.50 ^c	244 ± 3.00 ^a
麸炒	340.00 ± 4.00 ^b	293.00 ± 5.00 ^b	515.00 ± 4.00 ^b	47.00 ± 1.00 ^b	222 ± 1.00 ^b
挤压膨化	98.50 ± 3.50 ^c	31.50 ± 0.50 ^d	64.00 ± 4.00 ^d	67.00 ± 3.00 ^a	32.5 ± 3.50 ^d
喷雾干燥	63.00 ± 2.50 ^d	46.50 ± 1.50 ^c	112.00 ± 5.00 ^c	26.00 ± 2.00 ^c	70.5 ± 1.50 ^c

2.2 不同加工方式山药粉的色泽比较

不同加工方式山药粉的色度如表2和图2所示。如图2所示,不同加工方式对山药粉的颜色影响具有一定差异,热风干燥、麸炒和挤压膨化山药粉表现颜色均呈现浅褐色,且含有深褐色颗粒,而喷雾干燥山药粉颜色白暂均一。色度如表2所示。与热风干燥山药粉相比,麸炒山药粉亮度显著降低,红/绿值 a^* 和黄/蓝值 b^* 显著升高,说明麸炒后粉体色泽的红度及黄度增加;挤压膨化山药粉的亮度显著降低,红/绿值 a^* 和黄/蓝值 b^* 显著升高,粉体颜色分布较均一,无明显杂质颗粒;喷雾干燥处理的山药粉具有最高的亮度,红/绿值 a^* 显著升高,黄/蓝值 b^* 显著降低,颜色白暂均一。



图2 不同加工方式山药粉的色度比较

Fig.2 Comparison of chroma of Chinese yam powder with different processing technology

2.3 不同加工方式山药粉冲调特性的比较

2.3.1 糊化特性

四种加工方式处理山药粉的糊化特性如表3所示,峰值粘度和最终粘度分别代表最大粘度和冷糊粘度,峰值粘度越高,意味着淀粉的增稠能力越强;最低粘度是加热阶段结束时膨胀的淀粉颗粒破裂造成的,峰值粘度和最低粘度的差值为衰减值。热风干燥山药粉具有最高的峰值粘度、最低粘度、最终粘度,分别为830、805和1 049 cp;其次分别为麸炒山药粉、喷雾干燥山药粉和挤压膨化山药粉,其最终粘度值分别为515、112和64 cp。挤压膨化山药粉具有最高的衰减值67 cp,是热风干燥山药粉的2.73倍。热风干燥和麸炒山药粉的分子排列紧密,增大了单位体积内直链淀粉和支链淀粉的数量,而

挤压膨化、喷雾干燥山药粉内部分子排列更加疏松,且经历过一次高温糊化,当发生二次高温糊化冷却后淀粉分子链减短和变小,使其粘滞阻力减小^[17]。挤压膨化山药粉衰减值最高,说明淀粉颗粒在加热中容易破裂,内部淀粉分子被释放出来,具有更好的食味^[18]。回生值为最终粘度与最低粘度的差值,回生的本质是淀粉分子在分子势能的作用下从高能态的无序化逐步趋于低能态的有序化过程^[19]。热风干燥山药粉具有最高的回生值为244 cp,挤压膨化山药粉的回生值为32.5 cp,较热风干燥山药粉下降了86.7%,较喷雾干燥山药粉下降了53.9%。Santos等^[17]发现挤压膨化甘薯淀粉的最终粘度较喷雾干燥甘薯淀粉下降了97.8%,回生值较喷雾干燥甘薯淀粉下降了95.8%,这可能与挤压膨化的剪切力使支链淀粉组分分散,分子量下降有关。这与本实验探究得到挤压膨化山药粉的最终粘度和回生值较低的结果一致。

2.3.2 冲调分散性

表4 不同加工方式山药粉的冲调分散性比较 (%)

Table 4 Comparison of the dispersion of different processing technology of Chinese yam powder

加工方式	WAI	WSI	结块率
热风干燥	297.33 ± 1.89 ^c	5.33 ± 1.89 ^c	1.40 ± 0.20 ^c
麸炒	336.00 ± 3.27 ^b	6.67 ± 1.89 ^c	0.53 ± 0.25 ^c
挤压膨化	309.33 ± 3.77 ^c	23.60 ± 0.86 ^a	20.40 ± 1.40 ^a
喷雾干燥	422.67 ± 8.22 ^a	15.33 ± 1.80 ^b	6.60 ± 0.21 ^b

WSI代表粉体溶解于水的能力,WAI代表粉体在水中溶解形成凝胶的能力,而结块率代表粉体在溶解于水中时的结块情况,这3个指标常用来评价粉体的冲调分散特性。不同加工方式处理山药粉的WAI、WSI及结块率比较如表4所示。热风干燥山药粉的WAI、WSI均为最低,分别为297.33%和5.33%,麸炒、挤压膨化和喷雾干燥山药粉的WAI、WSI均较热风干燥山药粉具有一定的升高,WAI分别升高了1.13倍、1.04倍和1.42倍,WSI分别升

高了 1.25 倍、4.43 倍和 2.88 倍热风干燥和麸炒山药粉结块率均较低, 分别为 1.40% 和 0.53%, 而挤压膨化和喷雾干燥山药粉的结块率均升高, 分别为 20.40% 和 6.60%。热风干燥和麸炒山药粉的 WSI 和结块率低的原因主要是粉体表面硬化, 不易溶于水。喷雾干燥粉体细小, 具有良好的水溶性, 但由于其粉体颗粒细小吸水易成团, 故结块率比热风干燥山药粉高。Zapana 等^[20]研究发现挤压膨化后藜麦 WAI 显著提高为 527%, WSI 显著提高为 22.8%, 这与本实验挤压膨化显著提高山药粉 WAI 和 WSI 一致。挤压膨化过程中的高温、高压、高剪切力会破坏淀粉晶体结构, 使直链淀粉和支链淀粉更容易渗出, 同时淀粉分子在挤压过程中会发生降解, 产生可溶性糖或小分子糊精, 增加了山药粉的水溶性^[21]。但淀粉分子经过挤压膨化作用后, 淀粉颗粒膨胀, 支链淀粉分子从淀粉颗粒中脱离而出, 粘度增加, 使结块率增大。这些结果表明挤压膨化和喷雾干燥均可以改善山药粉的冲调性, 但挤压膨化山药粉存在结块率高的问题。

2.3.3 分散稳定性

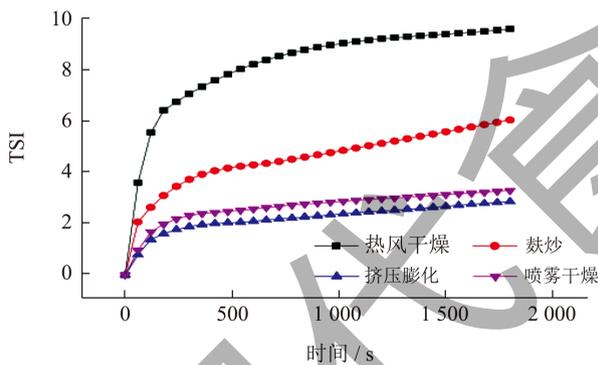


图 3 不同加工方式山药粉的 TSI 比较

Fig.3 Comparison of TSI of Chinese yam powder with different processing technology

不同加工方式制备山药粉的 TSI 值的变化如图 3 所示, 在扫描初期四种加工方式山药粉的 TSI 值变化均较大, 当时间为 600 s 时, 热风干燥山药粉的 TSI 值为 8.28, 经麸炒、挤压膨化和喷雾干燥处理后分别降低为 4.33、2.11 和 2.59。30 min 后趋于稳定, 四种方式所制备的山药粉的 TSI 值分别为 9.67、6.09、2.89、3.32。经过四种加工方式所制备的山药粉在冲调后的 TSI 值都会随时间的延长而增加, 这表明四种方式的山药粉进行冲调后, 随着放置时间的延长, 其稳定性均有所下降。热风干燥山药粉的 TSI 值高于其余三种加工方式, 说明其具有

明显的相分离现象, 稳定性相较于其他三种方式更差。挤压膨化山药粉的 TSI 值最低, 可能是因为挤压膨化可以使直链淀粉含量减少, 使溶液稳定性增强, 减少凝沉。因此这些结果提示挤压膨化可以有效改善热风干燥山药粉在冲调后的稳定性。

2.3.4 冻融稳定性

冻融稳定性的评判指标为析水率, 析水率越小, 说明样品的冻融稳定性越好, 样品在低温处理或贮存时稳定性越好。冻融稳定性主要与样品中的直链淀粉含量有关, 在冻融过程中, 淀粉中的各羟基容易形成氢键, 直链淀粉相互作用形成分子聚合物, 使持水性下降, 析水性增加, 冻融稳定性变差^[22]。如图 4 所示, 经过四种加工方式处理得到的山药粉的析水率分别为 55.42%、51.02%、38.02%、66.77%。喷雾干燥由于其粉体颗粒较小, 淀粉颗粒结构遭到破坏, 导致其持水性不佳, 冻融稳定性不佳。焦昆鹏探究发现, 经挤压膨化后山药粉的析水率下降了 66.28%, 冻融稳定性显著增强, 与本实验结果相符。挤压膨化后直链淀粉含量下降, 物料呈疏松多孔状, 持水能力增强, 析水能力减弱, 冻融稳定性增强^[5]。这些结果表明挤压膨化可以显著提高山药粉的冻融稳定性, 而喷雾干燥山药粉存在稳定性不佳的问题。

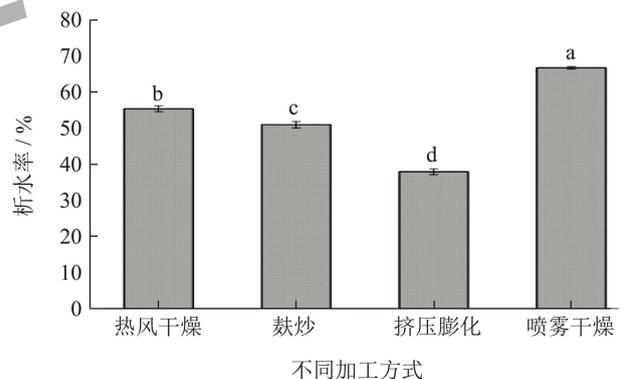


图 4 不同加工方式山药粉的冻融稳定性比较

Fig.4 Comparison of freeze-thaw stability of Chinese yam powder treated by different processing techniques

注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。图 5、6 同。

2.4 不同加工方式山药粉消化特性的比较

2.4.1 糊化度

糊化是淀粉的基本特性之一, 是指当有水分存在的条件下对淀粉进行加热, 其将经历一个不可逆的无序化转变^[23]。四种不同加工方式山药粉的糊化度比较如图 5a 所示, 热风干燥山药粉的糊化度最

低, 为 64.27%, 麸炒山药粉的糊化度为 76.60%, 经过挤压膨化后, 山药粉的糊化度显著升高, 高达 90.94%, 是热风干燥山药粉的 1.41 倍, 喷雾干燥山药粉的糊化度为 85.99%。Chien 等^[24]研究发现, 挤压膨化后的糙米、玉米和荞麦糊化度可显著提高至 104%、103% 和 103%, 这与本实验挤压膨化山药粉的糊化度显著升高的结果一致。天然淀粉吸水性小, 口感较硬, 不易受淀粉酶作用, 进入人体后不易被消化, 而淀粉经过糊化后, 其吸水性增大, 糖化酶能对其进行的更好作用, 将其转化成可发酵性糖^[25], 进入人体后更加利于被消化。挤压膨化过程中, 在挤压机的高温高压的环境下, 使得淀粉发生二次糊化, 糊化度显著升高。

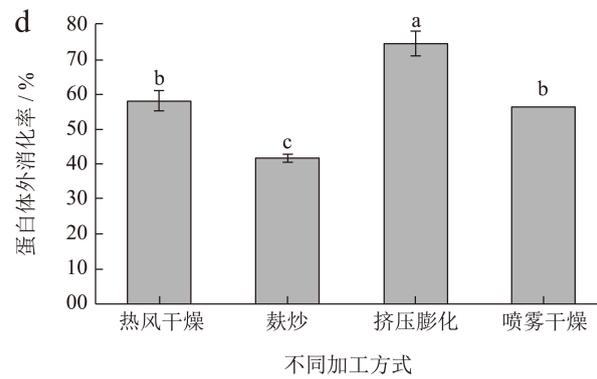
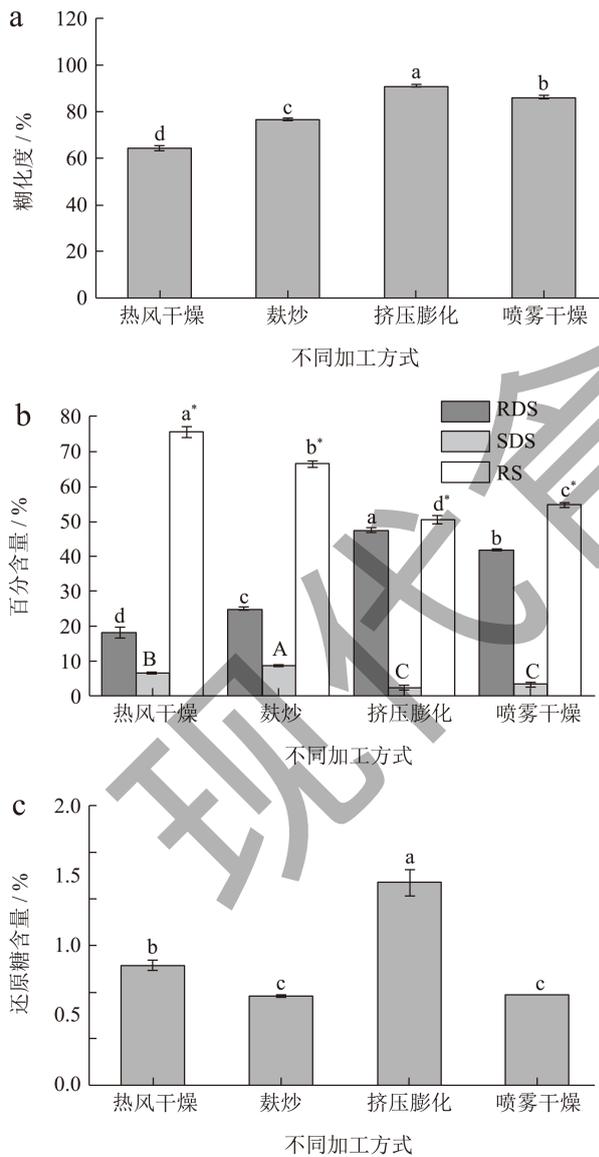


图 5 不同加工方式山药粉的消化特性比较

Fig.5 Comparison of digestion characteristics of Chinese yam powder by different processing techniques

2.4.2 淀粉的消化特性

淀粉的消化特性是指淀粉在消化酶的作用下水解成麦芽糖或葡萄糖的过程^[26]。不同加工方式山药粉的 RDS、SDS 和 RS 如图 5b 所示, 由图可知, 四种加工方式中挤压膨化山药粉具有最高含量的 RDS 与最低含量的 SDS 和 RS, 与热风干燥山药粉相比, 挤压膨化山药粉的 RDS 由 18.16% 提升至 47.37%, 比例提高了 160.85%; SDS 由 6.36% 降低至 2.27%, 比例下降了 64.25%; RS 由 75.49% 下降至 50.35%, 比例下降了 33.30%。李学琴^[27]将茯苓分别与红米、薏米和苦荞复配并进行挤压膨化处理, 发现挤压膨化后复配粉的 RDS 含量增加了 12.90%~24.12%, SDS 含量下降了 27.94%~41.44%, 这与本实验挤压膨化山药粉 RDS 含量最高, SDS 含量最低的结果一致。这主要是由于在挤压膨化机的高温高压高剪切力作用下, 淀粉颗粒结构被破坏, 形成疏松多孔结构, 有利于消化酶的水解作用, 使得 RDS 含量增加^[28]。上述结果表明挤压膨化可以一定程度提高山药淀粉的消化特性。

2.4.3 还原糖

四种加工方式处理的山药粉还原糖含量比较如图 5c 所示。挤压膨化山药粉的还原糖含量显著高于其他三种加工方式, 热风干燥山药粉的还原糖含量为 0.86%, 挤压膨化山药粉的还原糖含量为 1.46%, 是热风干燥的 1.70 倍。挤压膨化中山药粉的淀粉在高温高压作用下发生了降解, 部分淀粉生成了小分子的葡萄糖、麦芽糖、糊精等, 使得还原糖含量显著升高 ($P < 0.05$)。

2.4.4 蛋白体外消化率

四种不同加工方式对山药粉蛋白体外消化率的比较如图 5d 所示, 结果表明, 热风干燥、麸炒、挤压膨化和喷雾干燥的蛋白体外消化率分别为 57.99%、41.50%、74.42%、56.30%; 麸炒山药粉较热风干燥山药粉的蛋白消化率降低了 28.44%, 挤压膨化加工处理后的山药粉较热风干燥山药粉的蛋白消化率增加了 28.33%。这说明不同的加工方式会对蛋白体外消化率造成影响。Dilruksh 等^[28]在探究挤压对无麸质零食蛋白质消化率的影响时发现与未挤压膨化零食相比, 挤压零食的蛋白体外消化率增加了 101.96%。挤压膨化过程中的机械剪切作用破坏蛋白质的三四级结构, 分子间的二硫键数量减少, 疏水的表面氨基酸残基被破坏, 使原来被包裹住易被酶解的位点暴露出来, 进而提高蛋白质的消化率。

2.5 不同加工方式山药粉活性成分的比较

2.5.1 多糖

山药多糖是山药中的主要活性成份, 具有增强免疫力、抗氧化、抗肿瘤、调节肠道菌群的作用。本实验采用淀粉酶和糖化酶进行酶解水提法, 可有效排除淀粉的干扰。不同加工方式处理的山药粉多糖含量比较如图 6a 所示。热风干燥山药粉的多糖含量为 4.40%, 麸炒山药粉的多糖含量为 3.70%, 挤压膨化山药粉多糖含量为 4.53%, 喷雾干燥山药粉的多糖含量为 2.94%。麸炒山药粉较热风干燥山药粉多糖含量降低了 15.90%, 这可能是由于麸炒高温处理时间更长, 加速多糖中糖苷键的断裂, 使多糖含量显著降低。喷雾干燥山药粉多糖含量最低, 可能是因为部分粘液挂壁造成损失, 导致多糖含量的减少^[29]。闫征^[30]的研究表明, 挤压膨化后灵芝多糖的提取率提高了 92.7%, 这可能于挤压膨化破坏了细胞壁, 有利于多糖的提取有关, 因而挤压膨化后多糖含量并未因为高温作用而显著下降。

2.5.2 尿囊素

尿囊素 (Allantoin) 是山药特有的成分之一, 具有镇痛消炎、修复上皮组织、治疗胃溃疡等^[31]功效。不同加工方式处理的山药粉尿囊素含量如图 6b 所示, 喷雾干燥制备的山药粉的尿囊素含量最高, 为 5.89 mg/g, 其次为热风干燥山药粉, 其尿囊素含量为 4.19 mg/g; 麸炒和挤压膨化处理后的山药粉的尿囊素含量最低, 分别为 3.26 mg/g 和 3.61 mg/g。

这是由于尿囊素容易受温度影响, 高温会使其大量损失, 喷雾干燥处理的山药粉未经过长时间的烘干处理, 且喷雾干燥是一种瞬时高温的干燥方式, 能更好地保留山药中的尿囊素。

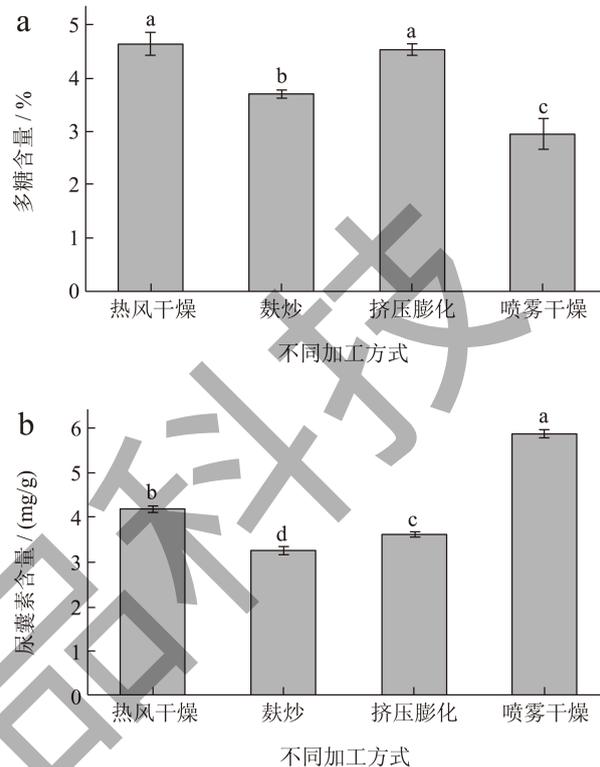


图 6 不同加工方式山药粉的活性成分比较

Fig.6 Comparison of digestion characteristics of Chinese yam powder by different processing techniques

2.6 不同加工方式山药粉形态结构比较

四种加工方式制备得到的山药粉的电镜扫描图比较如图 7 所示, 由图可知, 热风干燥的山药粉颗粒呈较完整的椭圆状, 表面较光滑, 麸炒山药粉的颗粒形态与热风干燥山药粉颗粒形态基本一致; 挤压膨化的山药粉颗粒原有的规则椭圆形态的团粒结构已经完全被破坏, 团聚而相互粘连形成表面较平整, 有些许不规则鳞片状, 棱角分明, 较大体积的的无规则块状结构。肖香等^[32]研究发现挤压膨化大麦全粉淀粉颗粒破碎, 团聚且相互粘连呈片状结构。山药粉在挤压机高温高压高剪切力的作用下发生糊化, 各种物质均匀地混合到一起, 使得挤压膨化粉山药的内部结构呈现出相互粘连的无规则块状结构, 喷雾干燥山药粉颗粒的粒径较其他方式更小, 表面较光滑, 但有明显的缩皱塌陷现象, 无裂缝和折痕。喷雾干燥山药粉的缩皱塌陷是由于水在喷雾干燥过程中被快速蒸发, 颗粒表面从而形成皱

缩现象。这些结果表明挤压膨化和喷雾干燥对山药粉的形态结构影响较大。

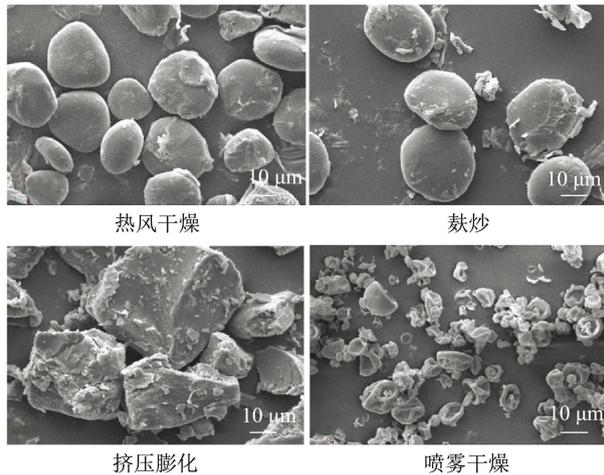


图7 不同加工方式山药粉的电镜扫描图

Fig.7 Comparison of scanning electron microscopy of Chinese yam powder under different processing techniques

3 结论

热风干燥、麸炒、挤压膨化和喷雾干燥四种加工方式制备的山药粉的色泽、冲调特性、消化特性和活性成分含量存在差异。在色泽方面，热风干燥、麸炒和挤压膨化山药粉颜色均呈现浅褐色，喷雾干燥山药粉颜色白哲均一且亮度显著提高。冲调分散性方面，热风干燥和麸炒山药粉冲调性、分散稳定性和冻融稳定性较差，挤压膨化和喷雾干燥可以显著改善山药粉的冲调性和分散稳定性，但挤压膨化山药粉和喷雾干燥山药粉分别存在结块率高和冻融稳定性不佳的问题。消化特性方面，热风干燥和麸炒山药粉糊化度较低，快消化淀粉含量较低，抗性淀粉含量较高，蛋白体外消化较差；相较于热风干燥，挤压膨化和喷雾干燥均可以提高山药粉的糊化度、快消化淀粉含量，此外挤压膨化还可以显著提高山药粉的体外蛋白消化率，其中挤压膨化山药粉的消化特性最佳。活性成分含量方面，挤压膨化山药粉多糖含量最高，喷雾干燥山药粉尿囊素含量最高。综上，挤压膨化山药粉和喷雾干燥山药粉具有良好的冲调特性和消化特性，并能较好的保留活性成分。

参考文献

[1] LIU X X, GU L B, ZHANG G J, et al. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides

extrac- ted from Chinese yam by a cellulase-assisted method [J]. Process Biochemistry, 2022, 121: 178-187.

- [2] LI Y, JI S, XU T, et al. Chinese yam (*Dioscorea*): Nutritional value, beneficial effects, and food and pharmaceutical applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 134: 29-40.
- [3] OKUNOLA A A, ADEKANYE T A, OKONKWO C E, et al. Drying characteristics, kinetic modeling, energy and exergy analyses of water yam (*Dioscorea alata*) in a hot airdryer [J]. Energies, 2023, 16(4): 1569.
- [4] MENG X, WANG B, LV C, et al. Quantification of Chinese yam processing methods based on pyrolysis characteristics and its relation to Maillard reaction [J]. Chinese Herbal Medicines, 2020, 12(1): 56-66.
- [5] 焦鲲鹏, 马丽苹, 罗磊, 等. 挤压膨化对山药全粉理化性质、加工特性和淀粉体外消化性的影响 [J]. 食品科技, 2022, 47(1): 159-165.
- [6] 任广跃, 刘亚男, 乔小全, 等. 基于变异系数权重法对怀山药干全粉品质的评价 [J]. 食品科学, 2017, 38(1): 53-59.
- [7] 阮蕴莹, 邓媛元, 张雁, 等. 不同葡萄糖当量值预消化大米膨化粉的理化性质和结构特性 [J]. 食品科学, 2023, 44(14): 29-36.
- [8] SAHU C, PATEL S. Optimization of maize-millet based soy fortified composite flour for preparation of RTE extruded products using D-optimal mixture design [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(7): 2651-2660.
- [9] 刘静波, 马爽, 刘博群, 等. 喷雾干燥条件对高铁蛋白溶解特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 365-371.
- [10] 白洁, 彭义交, 刘丽莎, 等. 薯类原料膨化特性及其膨化粉品质特性 [J]. 食品科学, 2018, 39(15): 48-53.
- [11] YADAV R B, KUMAR N, YADAV B S. Characterization of banana, potato, and rice starch blends for their physicochemical and pasting properties [J]. Cogent Food & Agriculture, 2016, 2(1): 1127873.
- [12] 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, 156.
- [13] 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.
- [14] 甄红敏, 栾广忠, 胡新中, 等. 灭酶方法对燕麦淀粉和蛋白质体外消化特性的影响 [J]. 麦类作物学报, 2011, 31(3): 475-479.
- [15] 关倩倩, 宗爱珍, 祁瑜婷, 等. 基于主成分分析的糖尿病专用山药品种筛选 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 38-43.
- [16] 明鹤, 杨太新, 杜艳华. HPLC分析不同施肥山药中尿囊素及薯蓣皂苷元含量 [J]. 中药材, 2014, 37(4): 558-560.
- [17] DOS SANTOS T P R, FRANCO C M L, DO CARMO E L, et al. Effect of spray-drying and extrusion on physicochemical characteristics of sweet potato starch [J]. Journal of Food

- Science and Technology, 2019, 56: 376-383.
- [18] 谢岩黎,张春雨,王小丽.挤压膨化对婴幼儿颗粒面条中淀粉结构及消化特性的影响[J].中国粮油学报,2018, 33(7):38-42,50.
- [19] LIU X, CHAO C, YU J, et al. Mechanistic studies of starch retrogradation and its effects on starch gel properties [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106914.
- [20] ZAPANA F, DE BRUIJN J, VIDAL L, et al. Physical, chemical and nutritional characteristics of puffed quinoa [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(1): 313-322.
- [21] QI W, MA C M, XING W J, et al. Effects of extrusion on physical properties of glutinous rice and its application in the improvement of quality characteristics of glutinous rice products [J]. Journal of Food Science, 2023, 88(8): 3494-3506.
- [22] LEE J S, KUMAR R N, ROZMAN H D, et al. Pasting, swelling and solubility properties of UV initiated starch-graft-poly (AA) [J]. Food Chemistry, 2005, 91(2): 203-211.
- [23] AI Y, JANE J. Gelatinization and rheological properties of starch [J]. Starch-Stärke, 2015, 67(3-4): 213-224.
- [24] CHIEN H I, TSAI Y H, WANG H M D, et al. Extrusion puffing pretreated cereals for rapid production of high-maltose syrup [J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100445.
- [25] DONMEZ D, PINHO L, PATEL B, et al. Characterization of starch-water interactions and their effects on two key functional properties: Starch gelatinization and retrogradation [J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 39: 103-109.
- [26] NIBA L L. Processing effects on susceptibility of starch to digestion in some dietary starch sources [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2003, 54(1): 97-109.
- [27] 李学琴,秦礼康,张秀军.挤压膨化茯苓复合营养粉冲调性研究及营养评价[J].食品与机械,2018,34(1):192-198.
- [28] DILRUKSHI H N N, TORRICO D D, BRENNAN M A, et al. Effects of extrusion processing on the bioactive constituents, *in vitro* digestibility, amino acid composition, and antioxidant potential of novel gluten-free extruded snacks fortified with cowpea and whey protein concentrate [J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133107.
- [29] WANG Y, LIU Y, HUO J, et al. Effect of different drying methods on chemical composition and bioactivity of tea polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 62: 714-719.
- [30] 闫征,李双石,杨国伟,等.挤压膨化预处理技术对灵芝多糖提取的影响[J].食品工业科技,2017,38(8):280-283,289.
- [31] OJIMELUKWE P, MUOASINAM C, OMODAMIRO R. Current perspectives on the Nutrient composition and health benefits of yams (*Discorea* species) [J]. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences, 2021, 5(2): 179-190.
- [32] 肖香,周玉蓉,杨华平等.挤压膨化对大麦全粉理化特性的影响[J].食品工业科技,2020,41(20):41-45.