

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

阮蕴莹^{1,2}, 邓媛元², 张雁², 魏振承², 唐小俊², 李萍², 张元², 王智明², 刘光², 张名位^{1,2,*}

(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: 采用预酶解-挤压膨化技术, 以衡量糊精水解度的葡萄糖当量 (dextrose equivalent, DE) 值为指标, 制备出不同DE值预消化大米膨化粉, 并对其糊化特性、理化性质以及结构特性等指标进行分析。结果表明, 相比于大米膨化粉, 预消化大米膨化粉随DE值增大, 其水溶性指数最大提高了约1.5倍, 吸水性指数最大降低76%, 滑角降低, Carr指数和Hausner比值升高, 粉体冲调性和流动性明显提高; 随DE值增大, 预消化大米膨化粉最终黏度和回生值逐渐降低, 降低幅度最大分别为37.79%和94.87%。经预酶解-挤压膨化后, 预消化大米膨化粉中可溶性蛋白含量降低, 而快消化淀粉含量则明显提高, 但蛋白质二级结构和淀粉结晶结构无明显变化。研究结果为不同DE值预消化大米膨化粉替代麦芽糊精在特医食品中的应用提供一定理论基础。

关键词: 大米膨化粉; 预酶解; 挤压膨化; 理化性质; 结构特性

Physicochemical and Structural Properties of Pre-digested Puffed Rice Flours with Different Dextrose Equivalent Values

RUAN Yunying^{1,2}, DENG Yuanyuan², ZHANG Yan², WEI Zhencheng², TANG Xiaojun², LI Ping²,

ZHANG Yuan², WANG Zhiming², LIU Guang², ZHANG Mingwei^{1,2,*}

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

2. Sericultural & Agri-food Research Institute, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In the present study, pre-digested puffed rice flours with different dextrose equivalent (DE) values were prepared by using enzymatic pretreatment and extrusion, and their gelatinization characteristics, physicochemical and structural properties were analyzed. The results showed that compared with puffed rice flour, the water solubility index of pre-digested puffed rice flour increased by up to about 1.5 times with an increase in DE value, the water absorption index decreased by up to 76%, the slip angle decreased, the Carr index and Hausner ratio increased, and the reconstitutability and fluidity improved obviously. Moreover, the final viscosity and setback value of pre-digested puffed rice flour decreased with increasing DE value, decreasing by up to 37.79% and 94.87%, respectively. Moreover, after enzymatic pretreatment and extrusion, the soluble protein content of pre-digested puffed rice flour decreased, and the content of rapidly digestible starch increased significantly, while the secondary structure of protein and the crystalline structure of starch did not change significantly. The results provide a theoretical basis for the application of pre-digested puffed rice flour instead of maltodextrin in foods for special medical purpose.

Keywords: puffed rice flour; enzymatic pretreatment; extrusion; physicochemical properties; structural properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221022-222

中图分类号: TS213.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)14-0029-08

收稿日期: 2022-10-22

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2019B020213002); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2022KJ117);

广东省现代农业产业技术体系水稻创新团队项目(2022KJ105);

广东省农业科学院农业优势产业学科团队建设项目(202108TD); 广东省财政厅专项(粤财农〔2022〕167号);

广东省农业科学院科技创新战略专项资金项目(高水平农科院建设)(R2020PY-JX009);

广东特支计划项目(2019BT02N112); 广州市科技计划项目(202201011834)

第一作者简介: 阮蕴莹(1997—)(ORCID: 0000-0001-7059-309X), 女, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工。

E-mail: winnie-ruan@qq.com

*通信作者简介: 张名位(1966—)(ORCID: 0000-0003-3464-8994), 男, 研究员, 博士, 研究方向为功能食品。

E-mail: mwzhh@vip.tom.com

引用格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221022-222. <http://www.spkx.net.cn>

RUAN Yuning, DENG Yuanyuan, ZHANG Yan, et al. Physicochemical and structural properties of pre-digested puffed rice flours with different dextrose equivalent values[J]. Food Science, 2023, 44(14): 29-36. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221022-222. <http://www.spkx.net.cn>

特殊医学用途配方食品是为特定疾病人群提供营养支持而专门加工配制的配方食品。目前,我国特医食品市场主要被国外特医品牌所垄断,自主知识产权的产品少^[1]。国外品牌产品大多采用蛋白质、碳水化合物和油脂等单体营养素加工而成,色香味食物感差,影响了患者长期食用依从性^[2]。同时,有研究表明,作为特医食品原料中主要碳水化合物营养素之一的麦芽糊精会导致肠道损伤^[3-4]、炎症^[5]和促进有害微生物的增殖和定植^[6]等变化。因此,研发适合国人饮食习惯且无健康隐患的特医食品基料对推动我国特医食品产业发展具有重要作用。

大米是我国居民食用的主要粮食作物之一,其含有特殊的谷物风味,无致敏性,淀粉(碳水化合物)含量占比超80%,故可作为麦芽糊精的替代物应用到特医食品中。大米挤压膨化处理是将大米粉应用到特医食品的主要途径,但膨化大米粉的黏度远高于麦芽糊精,易引起粉剂产品冲调性问题和乳剂产品稳定性问题。

使用生物酶水解结合挤压膨化处理谷物原料可改变原料物理和结构特性。赵志浩等^[7]对糙米粉进行预酶解-挤压膨化处理,发现提高了糙米粉的冲调分散性,降低了米糊黏度,使糙米粉的品质得到明显提升。刘磊等^[8]研究了玉米全粉经过预酶解-挤压膨化处理后的品质特性变化规律,发现预酶解-挤压膨化处理使玉米全粉的冲调分散性得到改善,还原糖、脂肪含量上升,有效提高了玉米全粉的食用品质。此外,也有学者探究了蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺对速食米粉品质特性的影响^[9],发现与直接挤压膨化处理相比,经过蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺制得的速食米粉的冲调特性及预消化性均得到明显改善。但上述研究仅测定了样品中的还原糖含量,无法准确得知样品经过酶解处理后的水解度。葡萄糖当量(dextrose equivalent, DE)值作为衡量麦芽糊精水解程度的指标,指的是淀粉水解物中还原糖含量(以葡萄糖表示)占总固形物含量(干物质含量)的百分比^[10]。DE值越高,代表产品中淀粉水解程度越高。

本研究借鉴前人研发的预酶解-挤压膨化改善大米粉特性技术,参照麦芽糊精DE值指标,制备不同DE值预消化大米基质粉,并进一步评价其吸水性指数(water absorption index, WAI)、水溶性指数(water solubility index, WSI)、粉体流动性、糊化度、糊化特性、可溶性蛋白含量及淀粉体外消化特性,以及采用扫描电子显

微镜、X射线衍射、傅里叶变换红外光谱等对其结构进行分析,以期为大米粉替代麦芽糊精在特医食品中的应用提供一定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大米(丝苗米) 广东海纳农业有限公司; 耐高温 α -淀粉酶(150 000 U/mL) 宁夏夏盛实业集团有限公司; 猪胰 α -淀粉酶(8 U/mg) 美国Sigma-Aldrich有限公司; 淀粉葡萄糖苷酶(262 U/mL) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

FMHE36-24双螺杆挤压机 湖南富马科食品工程技术有限公司; YZM-M60X70BI脉动真空压力蒸汽灭菌器 广州市豪尔生医疗设备有限公司; LG-01高速中药粉碎机 瑞安市百信制药机械有限公司; DHG-9425电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司; StarchMaster2 RVA快速黏度分析仪 瑞典Perten公司; S-3400N-II扫描电子显微镜 日本日立公司; VERTEX33傅里叶变换红外光谱仪、D8 ADVANCE X射线衍射仪 德国Bruker公司。

1.3 方法

1.3.1 预酶解-挤压膨化大米粉的制备

取耐高温 α -淀粉酶酶液,加入去离子水分别配制成浓度为0、250、500、750、1 000 U/g的酶液,将酶液均匀喷洒至粉碎成100目的大米粉中,送入脉动真空压力蒸汽灭菌器进行预酶解处理,随后送入双螺杆挤压机进行挤压膨化处理。其中,预酶解处理条件为温度95℃、时间25 min;双螺杆挤压机处理条件为出料口温度160℃、螺杆转速200 r/min、喂料速率16 kg/h、水分质量分数15%。待设备出料稳定后收集挤出物,挤出物在50℃恒温干燥箱中干燥3 h并粉碎至过100目筛,对样品的DE值进行测定,获得不同DE值预酶解-挤压膨化大米粉(以下简称预消化大米膨化粉),密封并在4℃保存备用。

1.3.2 DE值测定

还原糖含量的测定:参考文伟等^[11]的方法并稍作修改。准确称取消化大米膨化粉2.00 g于50 mL离心管中,

加入去离子水30 mL, 室温下200 r/min振荡30 min, 随后4 000 r/min离心10 min, 取上清液定容至50 mL, 采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定其还原糖含量。总固形物含量的测定: 参照GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》的直接干燥法^[12]。按下式计算DE值:

$$DE/\% = \frac{\text{还原糖含量}}{\text{总固形物含量}} \times 100 \quad (1)$$

1.3.3 WAI和WSI测定

参考Anderson等^[13]的方法并稍作修改。准确称取不同DE值预消化大米膨化粉2.50 g于50 mL离心管中, 加入30 mL去离子水, 室温下250 r/min振荡30 min, 随后4 000 r/min离心15 min, 分离上清液和沉淀物。上清液倾倒入已质量恒定的称量盒内, 在105 °C烘箱中烘干至质量恒定。按下式计算WAI和WSI:

$$WAI = \frac{\text{离心后沉淀物质量}}{\text{样品干质量}} \quad (2)$$

$$WSI/\% = \frac{\text{上清液蒸发后残余物质质量}}{\text{样品干质量}} \times 100 \quad (3)$$

1.3.4 粉体流动性测定

1.3.4.1 休止角测定

参照马永轩等^[14]的方法。准确称取不同DE值预消化大米膨化粉3.00 g, 取一块玻璃板平铺在桌面, 将玻璃漏斗置于铁架台上, 使其下端距桌面玻璃板3 cm, 将样品从玻璃漏斗中自由下落, 在玻璃板中央形成圆锥体, 测量圆锥体的底面直径(d)和圆锥体的高度(h)。按下式计算休止角:

$$\text{休止角}/(^\circ) = \arctan \frac{2h}{d} \quad (4)$$

1.3.4.2 滑角测定

参照Ileleji等^[15]的方法。准确称取不同DE值预消化大米膨化粉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%的样品发生移动, 测定玻璃板长度(L)和玻璃板上端与水平面的垂直距离(h)。按下式计算滑角:

$$\text{滑角}/(^\circ) = \arcsin \frac{h}{L} \quad (5)$$

1.3.4.3 Carr指数和Hausner比值测定

参照陈盛君等^[16]的方法。准确称取不同DE值预消化大米膨化粉10.00 g装入25 mL量筒中, 记录最初的松体积(V_1), 于水平台面上轻敲至粉体达到最紧实状态, 记录最终体积(V_2)。按下式计算Carr指数和Hausner比值:

$$\text{Carr指数}/\% = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Hausner比值} = \frac{V_1}{V_2} \quad (7)$$

1.3.5 糊化度测定

参考Birch等^[17]的方法并稍作修改。采用碘分光光度法, 准确称取不同DE值预消化大米膨化粉100 mg于100 mL离心管中, 加入49 mL去离子水使其溶解, 加入1 mL 10 mol/L KOH溶液, 缓慢磁力搅拌5 min, 随后4 500×g离心10 min。取上清液1.0 mL, 加入0.4 mL 0.5 mol/L 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), 混合均匀后在600 nm波长下测定吸光度(A_1)。重复上述操作, 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, 所测吸光度记为 A_2 。按下式计算糊化度:

$$\text{糊化度}/\% = \frac{A_1}{A_2} \times 100 \quad (8)$$

1.3.6 糊化特性测定

参照GB/T 24852—2010《大米及米粉糊化特性测定 快速粘度仪法》^[18]。准确称取不同DE值预消化大米膨化粉(3.00±0.01) g于RVA快速黏度分析仪配套的样品筒中, 加入(25.00±0.01) mL去离子水, 用配套的搅拌器上下快速搅动10次使试样分散。样品先在38 °C加热1 min, 随后以12 °C/min速率升温至95 °C, 保温5 min, 然后以12 °C/min速率降温至38 °C, 保温1 min; 搅拌器转速在开始10 s内上升到960 r/min, 之后保持在160 r/min。根据计算机屏幕显示的黏度变化曲线, 记录主要参数包括峰值黏度、最低黏度、最终黏度、衰减值和回生值。

1.3.7 可溶性蛋白含量测定

采用考马斯亮蓝法^[19]。准确称取不同DE值预消化大米膨化粉1.00 g, 加入9 mL生理盐水, 在冰浴条件下进行机械均质, 悬浊液于2 500 r/min离心10 min。取上清液定容至25 mL即为样液。取样液100 μL, 加入考马斯亮蓝染色液1 mL, 充分混匀后室温静置3~5 min, 于595 nm波长下测定吸光度, 代入标准曲线计算得可溶性蛋白含量。可溶性蛋白含量用牛血清白蛋白当量表示, 牛血清白蛋白标准溶液(0.0~0.2 mg/mL)的标准曲线为 $y=1.7386x$, $R^2=0.9975$ 。

1.3.8 快消化淀粉含量测定

参考王琳^[20]的方法并稍作修改。准确称取不同DE值预消化大米膨化粉200 mg于50 mL离心管中, 加入7.5 mL乙酸钠缓冲液(0.1 mol/L, pH 6.0)使其充分溶解, 使用磁力搅拌器100 °C恒温搅拌30 min, 转速600 r/min, 使样品均匀糊化, 冷却后加入0.75 mL混合酶液(混合酶液制备步骤如下: 称取1.5 g猪胰 α -淀粉酶于50 mL离心管中, 加入5 mL 0.1 mol/L乙酸钠缓冲液涡旋均匀后, 于磁力搅拌器中搅拌10 min, 随后在4 000 r/min离心10 min; 在上清液中加入0.5 mL淀粉葡萄糖苷酶, 即为混合酶液), 置于37 °C水浴中以300 r/min水浴振荡。分别在反应第

0、20分钟取100 μL 酶解液，置于装有900 μL 无水乙醇离心管中终止酶解，涡旋均匀，随后在4 000 r/min离心10 min，采用GOPOD试剂法测定上清液中葡萄糖含量。按下式计算快消化淀粉含量：

$$\text{快消化淀粉质量分数/\%} = \frac{G_{20} - G_0}{\text{TS}} \times 0.9 \times 100 \quad (9)$$

式中： G_0 、 G_{20} 分别为反应第0、20分钟酶解液中葡萄糖质量/mg；TS为样品中总淀粉质量/mg。

1.3.9 扫描电子显微镜观察

取适量不同DE值预消化大米膨化粉，将其贴于导电碳膜双面胶上，放入离子溅射仪中喷涂薄金层，在真空条件下以5.0 kV的电压拍摄，放大倍数为2 000倍。

1.3.10 X射线衍射分析

将不同DE值预消化大米膨化粉均匀填满X射线衍射仪样品槽中，测试条件设置如下：扫描范围 $4^\circ \sim 60^\circ$ ，扫描步长 0.02° ，电压40 kV，电流40 mA。使用Jade 6软件计算相对结晶度。

1.3.11 傅里叶变换红外光谱分析

将2 mg不同DE值预消化大米膨化粉与200 mg干燥的溴化钾混合研磨，压制成片，使用傅里叶变换红外光谱进行扫描。扫描参数设置如下：光谱范围 $4\ 000 \sim 400\ \text{cm}^{-1}$ ，分辨率 $4\ \text{cm}^{-1}$ ，扫描累加32次。使用Peakfit 4.0软件对蛋白质二级结构（酰胺I带 $1\ 700 \sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ ）进行分析，并计算 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规卷曲的相对含量。

1.4 数据统计与分析

所有实验均重复3次，数据表示为 $\bar{x} \pm s$ 。使用SPSS 21.0统计软件进行单因素方差分析，采用Duncan检验， $P < 0.05$ ，差异显著；使用Origin 2021软件作图。

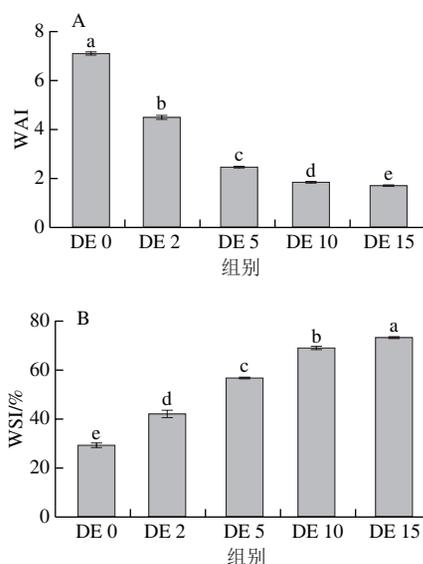
2 结果与分析

2.1 不同DE值预消化大米膨化粉WAI和WSI比较

如图1所示，经过预酶解处理后，预消化大米膨化粉的WAI随其DE值增大而显著降低（ $P < 0.05$ ），由7.11（DE 0组）降低至1.71（DE 15组），降幅达76%；相反，预消化大米膨化粉的WSI则随DE值增大显著提高（ $P < 0.05$ ），由29.48%（DE 0组）提高至73.49%（DE 15组），增幅达149.29%。其中，DE 15的大米粉在所有样品中WAI最小，WSI最大。

WAI和WSI通常用来衡量粉体的冲调性质。WAI代表样品的亲水性，主要反映淀粉的持水性能，而WSI代表样品在水中的分散性，主要反映大分子降解的程度^[7]，两者呈现一定的负相关性。在预酶解-挤压膨化处理过程中，大米所含淀粉被 α -淀粉酶降解成小分子糖和糊精类物质，可形成的淀粉凝胶减少，预消化大米膨化粉亲水

性变弱，WAI下降；与此同时，随着酶解产生的小分子糖和糊精等可溶性糖增加，预消化大米膨化粉在水中的分散性增强，WSI升高。戴晓慧等^[9]对大米进行蒸汽酶解调质-挤压膨化处理，发现与直接挤压膨化相比，速食米粉的WAI降低了72.68%，WSI提高了96.90%，与本研究结果相符。WAI的降低和WSI的提高有利于预消化大米膨化粉在水中溶解，冲调时不易结块，溶解速度快。



DE后数据表示DE值（%）；不同字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ），下同。

图1 大米膨化粉的WAI (A) 和WSI (B) 随DE值变化关系

Fig. 1 Relationship between WAI (A) and WSI (B) of puffed rice flour and DE value

2.2 不同DE值预消化大米膨化粉流动性比较

如表1所示，不同处理组预消化大米膨化粉休止角随DE值增大而逐渐降低，但各组间无显著差异（ $P > 0.05$ ）；此外，滑角也呈相似的下降趋势，由 40.85° （DE 0组）降低至 38.75° （DE 15组），降低了5.14%。休止角和滑角与粉体的流动性密切相关，一般而言，休止角和滑角越小，摩擦力越小，粉体流动性越好^[15]。本研究中，不同DE值预消化大米膨化粉休止角均小于 40° ，可以满足工业应用中生产流动性的需要。滑角则反映了粉体与固体表面接触的性质^[21]，本研究中，预消化大米膨化粉滑角随着DE值增大而逐渐降低，说明在工业应用中生产时，只需要设计较小的进料斗角度即可实现粉体的流动。

Carr指数和Hausner比值分别反映粉体的凝聚性和松散状态，其值越大，表明粉体凝聚性越大，松散状态越强。由表1可知，Carr指数和Hausner比值随DE值提高逐渐增大，Carr指数由25.74%（DE 0组）提高至35.89%（DE 15组），提高了39.43%；Hausner比值由1.35（DE 0组）提高至1.56（DE 15组），提高了15.56%。该

结果表明,大米粉经 α -淀粉酶酶解和挤压膨化处理,结构变得松散,粉末颗粒之间空隙变大,从而导致了Carr指数和Hausner比值的增大。粉体流动性不仅影响粉体的生产、输送和装载等过程,同时也反映了其在工业应用中生产时倒入容器中的难易^[22],较好的粉体流动性有利于粉剂型特医食品的冲调与食用。

表1 不同DE值预消化大米膨化粉的粉体流动性

Table 1 Fluidity of pre-digested puffed rice flours with different DE values

组别	休止角/ (°)	滑角/ (°)	Carr指数/%	Hausner比值
DE 0	34.76±2.45 ^a	40.85±0.41 ^a	25.74±2.88 ^c	1.35±0.05 ^c
DE 2	34.10±0.36 ^a	40.14±0.81 ^{ab}	28.34±1.79 ^{bc}	1.40±0.03 ^{bc}
DE 5	32.53±2.13 ^a	39.67±0.40 ^{ab}	29.12±0.48 ^b	1.41±0.01 ^b
DE 10	32.14±1.74 ^a	38.97±0.40 ^b	35.59±1.33 ^a	1.55±0.03 ^a
DE 15	32.11±0.91 ^a	38.75±1.44 ^b	35.89±2.06 ^a	1.56±0.05 ^a

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 表2同。

2.3 不同DE值预消化大米膨化粉糊化度及糊化特性比较

如图2所示, 预消化大米膨化粉的糊化度随着DE值增大整体呈下降趋势。相比于DE 0组样品, DE值小于5的样品糊化度下降较少, 约降低1%; 当DE值超过5后其糊化度显著降低 ($P<0.05$), 分别降低了5.26% (DE 10组) 和7.42% (DE 15组)。刘超等^[23]研究表明, 淀粉的糊化度与其膨化率呈正相关, 即膨化率越高, 淀粉糊化度越高。本研究中, 大米粉由于经过淀粉酶预消化处理, 淀粉被部分水解, 其水解程度随着样品的DE值增大而加深, 淀粉水解成糊精化淀粉、寡糖或小分子糖后会降低其挤压过程中的膨化率, 从而导致糊化度逐渐降低^[24]。

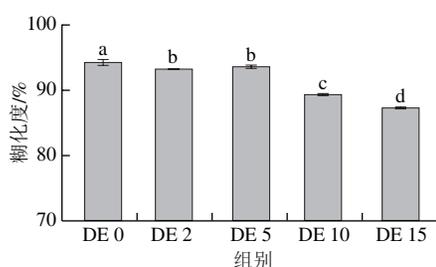


图2 不同DE值预消化大米膨化粉的糊化度

Fig. 2 Gelatinization degrees of pre-digested puffed rice flours with different DE values

如表2所示, 随着DE值增大, 预消化大米膨化粉的峰值黏度、最低黏度、最终黏度、衰减值和回生值均呈下降趋势。相比于对照, DE 15的预消化大米膨化粉其峰值黏度、最低黏度、最终黏度、衰减值和回生值分别降低了59.85%、27.63%、37.79%、97.10%和94.87%。一般而言, 峰值黏度取决于样品中受损伤淀粉的含量, 它反映了淀粉颗粒膨胀和破裂平衡时的黏度^[25]。大米粉经过 α -淀粉酶预酶解和挤压膨化处理, 淀粉颗粒被破坏, 吸水性和溶胀力下降, 从而导致了峰值黏度的降低。衰减值是峰值黏度与最低黏度之间的差值, 反映了淀粉的

抗剪切能力和热稳定性, 衰减值越小, 其抗剪切能力和热稳定性越好^[26]。回生值是最终黏度与最低黏度之间的差值, 回生值越低, 淀粉越不容易老化^[25]。随着预消化大米膨化粉DE值增大, 其衰减值和回生值均明显降低, 说明预消化大米膨化粉DE值越大, 其抗剪切能力和热稳定性越好, 越不容易发生老化, 这与戚明明等^[27]对豌豆粉进行挤压和酶解挤压处理时的研究结果一致。通过选取衰减值和回生值较低的预消化大米膨化粉, 将其应用至乳剂型特医食品中后, 有利于降低乳液的黏度、提高乳液体系的稳定性。

表2 不同DE值预消化大米膨化粉的糊化特性

Table 2 Gelatinization characteristics of pre-digested puffed rice flours with different DE values

组别	峰值黏度	最低黏度	最终黏度	衰减值	回生值
DE 0	408.50±0.71 ^a	219.00±2.83 ^a	258.00±4.24 ^a	189.50±3.54 ^a	39.00±1.41 ^a
DE 2	239.50±13.44 ^b	200.50±10.61 ^b	227.00±15.56 ^b	39.00±2.83 ^b	26.50±4.95 ^b
DE 5	174.00±2.83 ^c	165.50±0.71 ^c	172.50±3.54 ^c	8.50±2.12 ^c	7.00±2.83 ^c
DE 10	165.00±0.00 ^c	159.50±0.71 ^c	161.50±0.71 ^c	5.50±0.71 ^c	2.00±0.00 ^c
DE 15	164.00±1.41 ^c	158.50±0.71 ^c	160.50±0.71 ^c	5.50±0.71 ^c	2.00±0.00 ^c

2.4 不同DE值预消化大米膨化粉可溶性蛋白含量比较

如图3所示, 结果表明, 随着DE值增大, 预消化大米膨化粉的可溶性蛋白含量逐渐降低, DE 10组可溶性蛋白含量较DE 0组降低了74.87%, 而DE 15组样品虽然较DE 10组样品可溶性蛋白含量进一步降低, 但两组并无显著差异 ($P>0.05$)。大米中的淀粉和蛋白质相互包裹并结合^[28], 随着淀粉酶解程度的加深, 与淀粉相结合的蛋白质被游离出来的含量不断增加; 经过高温高压挤压膨化处理, 失去淀粉包裹保护作用的游离态蛋白质严重变性^[29], 这可能是导致可溶性蛋白含量随样品DE值增大而不断降低的原因。

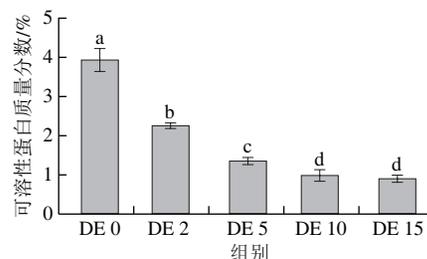


图3 不同DE值预消化大米膨化粉的可溶性蛋白含量

Fig. 3 Soluble protein contents of pre-digested puffed rice flours with different DE values

2.5 不同DE值预消化大米膨化粉快消化淀粉含量比较

如图4所示, 随着DE值增大, 预消化大米膨化粉的快消化淀粉含量呈升高趋势, 由62.53% (DE 0组) 提高至71.10% (DE 15组), 提高了13.71%。快消化淀粉含量提高的原因一方面与其水解程度加深有关, 随着大米膨化粉DE值的增加, 其由淀粉水解产生的糊精化淀粉、寡

糖和小分子糖含量提高^[24]；另一方面，由于可溶性蛋白含量增加，与淀粉结合的蛋白质逐渐减少，消化酶与淀粉更容易接触，从而被检测出来的快消化淀粉含量随之增大。

快消化淀粉是能够在20 min内被小肠快速消化吸收的碳水化合物组分。因此，对于快消化淀粉含量高的预消化大米膨化粉适合提供手术后、化疗后等需要快速供能的患者，而快消化淀粉含量低的样品则可应用于糖尿病患者。

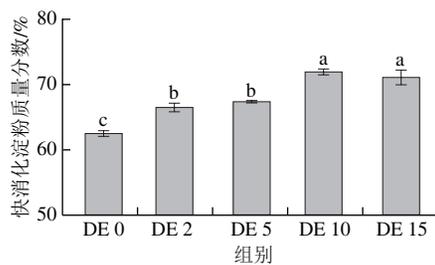
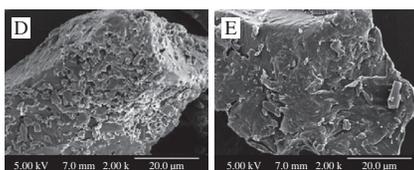
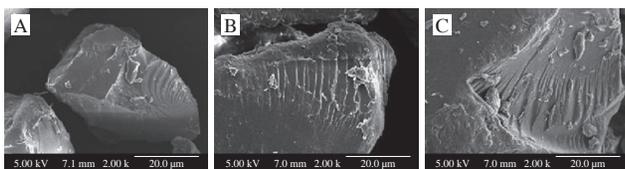


图4 不同DE值预消化大米膨化粉的快消化淀粉含量

Fig. 4 Rapidly digestible starch contents of pre-digested puffed rice flours with different DE values

2.6 不同DE值预消化大米膨化粉微观结构比较

如图5所示，所有预消化大米膨化粉均呈现不规则形态，表面均有不同程度的裂纹和鳞状结构。相对而言，DE值为0的预消化大米膨化粉表面较为光滑，鳞状结构较少，随着DE值增大，预消化大米膨化粉表面的裂纹越来越多，鳞状结构越来越明显，粉体不规则程度增加；其中DE 10和DE 15的样品组表面还观察到了细小的孔洞（图5D、E），这应该是 α -淀粉酶酶解淀粉引起的结构变化。疏松多孔的结构一方面有利于水分进入粉体内部，使其具有良好的水溶性；另一方面，有利于提高其松散状态，增强粉体流动性，这与2.1、2.2节中高DE值的预消化大米膨化粉WSI、Carr指数和Hausner比值等指标增大相符。



A~E. DE 0、DE 2、DE 5、DE 10、DE 15。

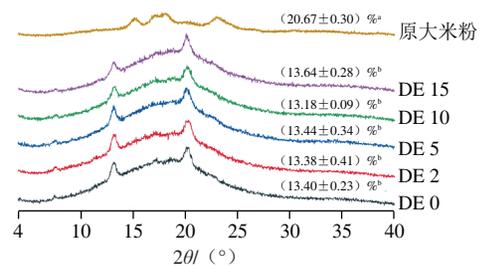
图5 不同DE值预消化大米膨化粉的扫描电子显微镜图

Fig. 5 Scanning electron microscopic images of pre-digested puffed rice flours with different DE values

2.7 不同DE值预消化大米膨化粉X射线衍射分析

如图6所示，原大米粉在 2θ 15°、17°、18°、23°处有较强的衍射峰，其中 2θ 17°、18°为连续的双峰，呈现典型的A型结构。经过挤压膨化处理后，大米粉的衍射峰减少，出峰位置也发生了变化，在 2θ 13°、20°处出现较强的衍射峰，淀粉由原来的A型变为V型结构，这与方浩标^[30]、Pornpimon^[31]等对米粉进行挤压膨化处理时研究结果一致。此外，经过预酶解处理的大米膨化粉与原大米膨化粉相比，其晶型均为V型结构。Sharma等^[32]的研究显示，V型晶体结构来源于直链淀粉，大米粉经过挤压膨化处理后，晶型由A型变为V型，这与直链淀粉-脂质复合物的形成有关^[33]，这种复合物会阻碍直链淀粉的重排，延缓体系中回生现象的发生^[34]。这与2.3节糊化特性研究中随着DE值增大预消化大米膨化粉回生值减小，淀粉不易老化的研究结果相符合。

此外，发现原大米粉的相对结晶度为20.67%，经过挤压膨化后，大米粉的相对结晶度显著下降（ $P < 0.05$ ），可能是由于大米粉在通过挤压压机时受到高温高压以及剪切力的综合作用，淀粉的结晶结构被破坏，无定形区域面积增加，导致相对结晶度降低^[35]，这与2.5节中预消化大米膨化粉快消化淀粉含量随DE值增加而增大的研究结果相符；而不同DE值预消化大米膨化粉相对结晶度无显著差异（ $P > 0.05$ ）。



图中数据为相对结晶度。

图6 不同DE值预消化大米膨化粉的X射线衍射图

Fig. 6 X-ray diffraction patterns of pre-digested puffed rice flours with different DE values

2.8 不同DE值预消化大米膨化粉蛋白质二级结构含量分析

采用Peakfit软件对红外光谱中酰胺I带（1 600~1 700 cm^{-1} ）进行拟合分峰处理，以分析蛋白质二级结构的相对含量。根据Du Jing等^[36]的分析，谱带在1 650~1 660 cm^{-1} 范围内的归属为 α -螺旋，谱带在1 600~1 640 cm^{-1} 范围内的归属为 β -折叠，谱带在1 660~1 700 cm^{-1} 范围内的归属为 β -转角，谱带在1 640~1 650 cm^{-1} 范围内的归属为无规卷曲。由图7可知，与原大米粉相比，不同DE值预消化大米膨化粉的 α -螺旋相对含量显著降低（ $P < 0.05$ ），由21.47%降低

至11.48%，降低了46.53%； β -转角相对含量显著提高 ($P < 0.05$)，由20.56%提高至32.46%，提高了57.88%； β -折叠和无规卷曲相对含量无显著变化 ($P > 0.05$)。产生这种现象的原因可能是在经过挤压膨化处理时，大米粉中的蛋白质受热发生变性，分子结构被破坏，导致代表蛋白质有序结构的 α -螺旋相对含量显著降低，而 β -转角相对含量显著增加，说明蛋白质结构从稳定有序逐渐向松散无序转变^[27]。此外，在预酶解-挤压膨化过程中，大米粉受到高温高压高剪切作用，一部分蛋白质结构被破坏，转向松散无序的状态；一部分生成淀粉-蛋白质复合物，导致可溶性蛋白含量的降低，与2.4节可溶性蛋白含量指标降低相符。大米膨化粉中不同DE值预消化大米膨化粉之间二级结构相对含量无显著差异 ($P > 0.05$)，说明酶添加量对其未产生明显影响。

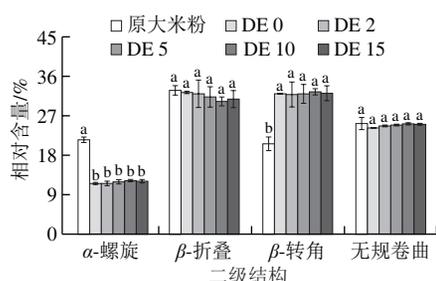


图7 不同DE值预消化大米膨化粉的二级结构相对含量

Fig. 7 Relative contents of secondary structures in pre-digested puffed rice flours with different DE values

3 结论

制备了不同DE值预消化大米膨化粉，并评价了其理化性质及结构特性。结果表明，随着DE值增大，预消化大米膨化粉的WAI、糊化度、可溶性蛋白含量、最终黏度等指标整体呈降低趋势；而WSI、Carr指数、Hausner比值、粉体流动性等有所提高；此外，经过预酶解处理后，DE值大的样品组微结构表面变得粗糙多孔，但与原大米膨化粉比，不同DE值预消化大米膨化粉中淀粉的相对结晶度以及蛋白质二级结构并无明显变化。研究结果为大米粉替代麦芽糊精在特医食品中的应用提供了一定理论基础。

参考文献:

[1] 刘馨蔚. 中外药企纷纷入局特医食品业[J]. 中国对外贸易, 2022(4): 56-57.
 [2] 马永轩, 张名位, 张瑞芬, 等. 我国特殊医学用途配方食品的现状[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(21): 221-224. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2018.21.037.
 [3] ROWAN J N, ANDERSON J G. Maltodextrin stimulates growth of *Bacillus cereus* and synthesis of diarrheal enterotoxin in infant milk formulae[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(3): 1182-1184. DOI:10.1128/AEM.63.3.1182-1184.1997.

[4] PRATIBHA S, LEIDY S L, DAVID R, et al. Maltodextrin-induced intestinal injury in a neonatal mouse model[J]. Disease Models & Mechanisms, 2020, 13(8): 044776. DOI:10.1242/dmm.044776.
 [5] LAUDISI F, DI FUSCO D, DINALLO V, et al. The food additive maltodextrin promotes endoplasmic reticulum stress-driven mucus depletion and exacerbates intestinal inflammation[J]. Cellular and Molecular Gastroenterology and Hepatology, 2019, 7(2): 457-473. DOI:10.1016/j.jcmgh.2018.09.002.
 [6] NICKERSON K P, HOMER C R, KESSLER S P, et al. The dietary polysaccharide maltodextrin promotes *Salmonella* survival and mucosal colonization in mice[J]. PLoS ONE, 2017, 9(7): e101789. DOI:10.1371/journal.pone.0101789.
 [7] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20171210-121.
 [8] 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. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.10.020.
 [9] 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. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.10.0327.
 [10] 应欣, 卢玉, 李义, 等. 麦芽糊精的功能特性及其应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(12): 131-137. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2019.12.021.
 [11] 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. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.2.021.
 [12] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-12.
 [13] 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. DOI:10.1002/star.19700220408.
 [14] 马永轩, 魏振承, 张名位, 等. 改善营养糊冲调性和流动性的配方优化和工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(7): 81-87. DOI:CNKI:SU N:ZLYX.0.2013-07-017.
 [15] ILELEJI K E, ZHOU B. The angle of repose of bulk corn stover particles[J]. Powder Technology, 2008, 187(2): 110-118. DOI:10.1016/j.powtec.2008.01.029.
 [16] 陈盛君, 朱家璧, 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. DOI:10.16522/j.cnki.cjph.2013.10.012.
 [17] BIRCH G G, PRIESTLEY R J. Degree of gelatinisation of cooked rice[J]. Starch-Stärke, 1973, 25(3): 98-100. DOI:10.1002/star.19730250308.
 [18] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 大米及米粉糊化特性测定 快速粘度仪法: GB/T 24852—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-7.
 [19] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254. DOI:10.1016/0003-2697(76)90527-3.
 [20] 王琳. 双酶协同制备慢消化淀粉及性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 14-15.
 [21] 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: 45-46.
 [22] 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 and Agriculture, 2004, 84(10): 1241-1252. DOI:10.1002/jsfa.1746.

- [23] 刘超, 张波, 魏益民. 影响淀粉类挤压膨化产品膨化率的因素研究进展[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(7): 124-128. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2013.07.024.
- [24] XU E, WU Z, WANG F, et al. Impact of high-shear extrusion combined with enzymatic hydrolysis on rice properties and Chinese rice wine fermentation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(3): 589-604. DOI:10.1007/s11947-014-1429-0.
- [25] MARTÍNEZ M M, ROSELL C M, GÓMEZ M. Modification of wheat flour functionality and digestibility through different extrusion conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 143: 74-79. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.06.035.
- [26] 周显青, 叶新悦, 张玉荣, 等. 粳糯稻谷贮藏期间糊化特性的变化[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 60-67. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028042.
- [27] 戚明明, 彭慧慧, 宋佳琳, 等. 挤压和酶解挤压对豌豆粉淀粉体外消化率、蛋白质结构和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 76-82. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201120-216.
- [28] 王怡杰, 洪雁, 顾正彪, 等. 储藏时间对大米淀粉精细结构的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(5): 45-52. DOI:10.3969/j.issn.1673-1689.2021.05.006.
- [29] 宋欢, 张瑞, 逢世峰, 等. 人参山药挤压膨化工艺优化及其理化性质研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 193-198. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020020031.
- [30] 方浩标, 郑经绍, 许立益, 等. 紫糙米粉挤压工艺优化及其理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 195-202. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020080099.
- [31] PORNPIMON M, CHULALUCK C, SAKAMON D. Physicochemical and thermal properties of extruded instant functional rice porridge powder as affected by the addition of soybean or mung bean[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(12): 2782-2791. DOI:10.1111/1750-3841.13118.
- [32] SHARMA S, SINGH N, SINGH B. Effect of extrusion on morphology, structural, functional properties and *in vitro* digestibility of corn, field pea and kidney bean starches[J]. Starch-Stärke, 2015, 67(9/10): 721-728. DOI:10.1002/star.201500021.
- [33] MIR S A, BOSCO S J D, SHAH M A, et al. Effect of puffing on physical and antioxidant properties of brown rice[J]. Food Chemistry, 2016, 191: 139-146. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.11.025.
- [34] LORENZ K, KULP K. Cereal-and root starch modification by heat-moisture treatment. I. Physico-chemical properties[J]. Starch-Stärke, 1982, 34(2): 50-54. DOI:10.1002/star.19820340205.
- [35] XIAO Y, ZHENG M Z, YANG S, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of proso millet starch after addition of proanthocyanidins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 168: 784-791. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.11.136.
- [36] DU J, LIN Y X, GUO Y, et al. Nutritional changes and early warning of moldy rice under different relative humidity and storage temperature[J]. Foods, 2022, 11(2): 185. DOI:10.3390/FOODS11020185.