

超声处理对糯米粉消化特性的影响及降低糯米粉血糖生成指数工艺优化

郭宇, 杨玉婵, 桂祎雯, 王东旭, 郭元新, 邓静

Effect of Ultrasonic Treatment on the Digestion Characteristics of Glutinous Rice Flour and Optimization of Process to Reduce Glutinous Rice Flour Glycemic Index

GUO Yu, YANG Yuchan, GUI Yiwen, WANG Dongxu, GUO Yuanxin, and DENG Jing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120088>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湿热处理对糯米粉血糖生成指数值及相关指标的影响

Effects of Heat-moisture Treatment on Glycemic Index and Relevant Indexes of Glutinous Rice Flour

食品工业科技. 2023, 44(1): 253-259 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040041>

木糖醇对糯米粉理化性质及汤圆品质的影响

Effects of Xylitol on Physicochemical Properties of Glutinous Rice Flour and Quality of Glutinous Rice Dumplings

食品工业科技. 2024, 45(7): 51-58 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040253>

糯米粉特性与速冻汤圆品质相关性分析

Correlation between the Characteristics of Glutinous Rice Flour and Quality of Quick-frozen Glutinous Soup Ball

食品工业科技. 2019, 40(4): 93-99 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.04.015>

不同品种糯米的粉质特性分析及对其冰点温度的影响

Characteristics Analysis of Different Glutinous Rice Flour and Its Influence on Freezing Point Temperature

食品工业科技. 2022, 43(15): 34-41 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090247>

调质温度和时间对黑糯米半干法制粉品质的影响

Effect of Tempering Temperature and Time on the Quality of Semi-dry Black Glutinous Rice Flour

食品工业科技. 2020, 41(5): 17-22,30 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.05.004>

鹰嘴豆粉对面条品质及血糖生成指数的影响

Effect of Chickpea Flour on Noodle Quality and Glycemic Index

食品工业科技. 2022, 43(24): 363-368 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020167>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭宇, 杨玉婵, 桂祎雯, 等. 超声处理对糯米粉消化特性的影响及降低糯米粉血糖生成指数工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 215–222. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120088

GUO Yu, YANG Yuchan, GUI Yiwen, et al. Effect of Ultrasonic Treatment on the Digestion Characteristics of Glutinous Rice Flour and Optimization of Process to Reduce Glutinous Rice Flour Glycemic Index[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(20): 215–222. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120088

· 工艺技术 ·

超声处理对糯米粉消化特性的影响及降低糯米粉血糖生成指数工艺优化

郭宇¹, 杨玉婵¹, 桂祎雯¹, 王东旭¹, 郭元新^{1*}, 邓静²

(1. 江苏科技大学粮食学院, 江苏省粮食生物加工工程研究中心, 江苏镇江 212100;

2. 四川旅游学院烹饪科学四川省高等学校重点实验室, 四川成都 610100)

摘要:目的: 为研究超声波处理对糯米粉消化特性及血糖生成指数 (Glycemic index, GI) 的影响。方法: 以 GI 值为指标, 通过单因素实验和响应面法研究糯米粉乳液浓度、超声功率、超声时间、干燥温度 4 个因素对糯米粉消化性的影响。研究表明, 超声作用可以使淀粉间组分相互转化, 提高抗性淀粉含量, 并显著 ($P < 0.05$) 降低糯米粉的 GI 值。糯米粉乳液浓度 30%、超声功率 400 W、超声时间 4 min、干燥时间 49 °C, 糯米粉的 GI 值降低至 76.31 (比普通糯米粉降低 14.22%), 与响应面回归方程预测值 (76.28) 相近, 表明该回归模型可用于优化糯米粉超声处理工艺。且超声处理并未改变糯米粉的晶型。结论: 该法可以提高糯米粉的抗消化性, 可为进一步开发低 GI 糯米粉提供实验思路。

关键词: 糯米粉, 超声技术, 血糖指数, 响应面, 体外消化特性

中图分类号: TS213.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)20-0215-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120088



本文网刊:

Effect of Ultrasonic Treatment on the Digestion Characteristics of Glutinous Rice Flour and Optimization of Process to Reduce Glutinous Rice Flour Glycemic Index

GUO Yu¹, YANG Yuchan¹, GUI Yiwen¹, WANG Dongxu¹, GUO Yuanxin^{1*}, DENG Jing²

(1. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Provincial Engineering Research Center of Grain Bioprocessing, Zhenjiang 212100, China;

2. Sichuan Tourism University Cuisine Science Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610100, China)

Abstract: Objective: To study the effect of ultrasonic treatment on the digestion characteristics and glycemic index (GI) of glutinous rice flour. Methods: With GI value as the index, the effects of four factors, including emulsion concentration, ultrasonic power, ultrasonic time and drying temperature, on the digestibility of glutinous rice flour were studied by single factor test and response surface method. The results showed that ultrasound could transform the components between starches, increase the content of resistant starch, and significantly ($P < 0.05$) reduce the GI value of glutinous rice flour. The GI value of glutinous rice flour decreased to 76.31 (14.22% lower than that of ordinary glutinous rice flour) with 30% emulsion concentration, 400 W ultrasonic power, 4 min ultrasonic time and 49 °C, which was similar to the predicted value of the response surface regression equation (76.28), indicating that the regression model could be used to optimize the ultrasonic treatment process of glutinous rice flour. The crystal form of glutinous rice flour was not changed by ultrasonic

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 江苏省 2023 年研究生创新计划项目 (SJCX23_2244); 烹饪科学四川省高等学校重点实验室 2023 年度资助项目 (PRKX2023Z12); 常州市农业科技支撑项目 (CE20202008)。

作者简介: 郭宇 (1999-) (ORCID: 0009-0005-8821-2132000), 女, 硕士, 研究方向: 农产品精深加工, E-mail: gy18234591259@163.com。

* 通信作者: 郭元新 (1970-) (ORCID: 0000-0002-4259-5079), 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮油食品加工与营养健康, E-mail: guoyuanxin@just.edu.cn。

treatment. Conclusion: This method could improve the digestibility of glutinous rice flour and provide experimental ideas for the further development of low GI glutinous rice flour.

Key words: glutinous rice flour; ultrasonic technology; glycemic index; response surface; *in vitro* digestion characteristics

糯米营养丰富, 口感独特, 其制品糯米粉具有低致敏性、低谷蛋白含量、较易消化等特点, 深受消费者喜爱。水磨糯米粉柔软、香糯、韧滑, 适用于制作汤团、糍粑等小食^[1]。淀粉是糯米粉的主要营养物质, 且以支链淀粉为主, 由于支链淀粉的特殊分叉结构, 淀粉酶接触位点多, 糯米粉消化效率高, 快消化淀粉较多, 食用后血糖反应大, 易增加患肥胖、II型糖尿病和心血管疾病的风险^[2-3]。支链淀粉结晶区的微晶束会对酶的消化能力产生抵抗作用, 从而抑制胰淀粉酶水解支链淀粉中的 α -1,4糖苷键, 且支链淀粉中的 α -1,6糖苷键无法被人体 α -淀粉酶正常水解, 产生人体无法消化吸收的极限糊精, 容易造成消化不良, 严重限制了糯米粉的应用范围^[4]。血糖生成指数(Glycemic index, GI)是对食物组分和含量、碳水化合物类型和结构、食物的物理状态和加工制作过程等因素的综合评估, 较全面地反映了食物在人体的消化利用状况^[5-6]。影响食品GI值的因素包括直链淀粉和支链淀粉的比例、淀粉的凝胶化、淀粉颗粒的结晶度以及食品加工方式等^[6]。近年来, 通过物理、生物、化学技术, 提高淀粉的抗消化性, 降低糯米粉的GI值, 已成为糯米高值化开发领域的研究热点。郭宇等^[7]利用蛋白酶处理糯米粉, 发现酸性蛋白酶处理的糯米粉GI值比对照降低了27.95%。王东旭等^[8]利用湿热处理工艺使糯米粉GI值降低了30.1%。张振娜^[9]的研究表明射频处理使糯米粉的抗性淀粉(Resistant Starch, RS)含量提高了20.27%, 消化率显著降低。熊金娟等^[10]采用臭氧处理降低了糊化糯米粉的消化率。然而, 经处理的糯米粉仍为中/高GI值食品, 探索更多方式来降低糯米粉的消化速率具有一定的研究价值。

超声波技术绿色环保、简单高效, 在水体系中使用高频波(>15~20 kHz)产生强剪切力、高温和自由基, 可以使淀粉晶体结构、功能发生变化, 表现为RS含量增加^[11-14]。超声波处理的效果取决于操作时间、温度、功率、频率和淀粉来源和种类^[15]。Vidhyalakshmi等^[16]将超声作用于珍珠小米淀粉, 显著提高了RS含量, 将经超声的珍珠小米淀粉-胚芽复合物代替部分小麦粉, 制作的面包GI值显著降低; Flores-Silva等^[17]研究超声对玉米淀粉消化性的影响, 发现超声处理通过破坏颗粒完整性和解聚淀粉链来诱导淀粉颗粒形态和物理化学变化, 且超声时间对原生淀粉和糊化淀粉消化率的影响有差异, 原生淀粉RS显著增加, 快消化淀粉(Rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉(Slowly digestible starch, SDS)变化不大, 糊化淀粉RS、RDS增加, SDS降低。杨梦恬等^[18]研究了超声对糯米、非糯米淀粉消

化性的影响, 超声处理可提高糯米与非糯米淀粉中直链淀粉含量、RDS和RS含量。但超声波对糯米粉消化特性及血糖指数有何影响还未见报道。本研究以糯米粉乳液浓度、超声时间、超声功率、干燥温度为考察因素, 研究了超声波对糯米粉消化特性及血糖指数的影响, 并通过Box-Behnken响应面法确定最佳超声处理条件, 验证超声处理对糯米粉GI值的降低效果, 为低GI糯米粉的开发提供了技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

糯米粉 常州金坛江南制粉有限公司; 95%乙醇、无水亚硫酸钠、无水葡萄糖、苯酚、酒石酸钾钠、氢氧化钠、无水乙酸钠、无水葡萄糖、乙酸(冰醋酸)均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 淀粉葡萄糖苷酶(酶活为100000 μ /mL)、3,5-二硝基水杨酸 上海麦克林生化科技有限公司; 耐高温 α -淀粉酶(酶活为2000 μ /mL) 阿拉丁生化科技股份有限公司。

HWS-26 电热恒温水浴锅、DHG-9240A 电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司; 5810R 高速冷冻离心机 德国Eppendorf公司; HIM 多功能酶标仪 美国Bio-Tek公司; DF-101T 集热式磁力搅拌器 上海力辰邦西仪器科技有限公司; PHSJ-4F pH计 上海仪电科学仪器股份有限公司; YP5001N 型电子天平 上海舜宇恒平科学仪器厂; MB25 谷物水分测定仪 宁波奥克斯集团有限公司; Smart-Lab 智能转靶X射线衍射仪 日本理学株式会社。

1.2 实验方法

1.2.1 糯米粉的超声处理 参考Flores-Silva等^[17]的方法, 将糯米粉溶于水配制成30%的糯米粉乳液, 室温条件下磁力搅拌2h, 将超声机的探头置于糯米粉乳液中, 于冰浴条件下进行超声处理。超声条件为: 超声功率300W, 工作时间1s, 间歇时间1s, 总时间9min进行超声, 糯米粉乳液经10000 r/min离心5min, 随后50℃干燥2h左右, 使含水量控制在11% \pm 1%, 粉碎过100目筛, 得到超声糯米粉样品, 并以未超声糯米粉为对照进行比较。

1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 糯米粉乳液浓度对糯米粉消化特性和GI值的影响 在超声功率300W, 超声时间9min, 干燥温度50℃条件下, 考察糯米粉乳液浓度20%、30%、40%、50%、60%、70%对糯米粉消化特性和GI值的影响。

1.2.2.2 超声功率对糯米粉消化特性和GI值的影响 在糯米粉乳液浓度为30%, 超声时间9min, 干燥

温度 50 ℃ 条件下,考察超声功率 0、100、200、300、400、500、600 W 对糯米粉消化特性和 GI 值的影响。

1.2.2.3 超声时间对糯米粉消化特性和 GI 值的影响

在糯米粉乳液浓度为 30%, 超声功率 300 W, 干燥温度 50 ℃ 条件下,考察超声时间 1、5、9、13、17、21 min 对糯米粉消化特性和 GI 值的影响。

1.2.2.4 干燥温度对糯米粉消化特性和 GI 值的影响

在糯米粉乳液浓度为 30%, 超声功率 300 W, 超声时间 9 min 条件下,考察干燥温度 40、50、60、70、80、90 ℃ 对糯米粉消化特性和 GI 值的影响。

1.2.3 响应面优化试验设计 在单因素实验结果的基础上,以 GI 值为考察指标,设计 3 因素 3 水平的 Box-Behnken 试验确定最佳处理条件。考察因素及水平设计见表 1。在响应面优化试验设计结果基础上进行验证试验,比较预测 GI 值与实际 GI 值。

表 1 Box-Behnken 试验因素水平设计
Table 1 Design of Box-Behnken experimental factor levels

因素	水平		
	-1	0	1
超声功率(W)	300	400	500
超声时间(min)	1	5	9
干燥温度(℃)	40	50	60

1.2.4 验证试验 在优化条件下重复 3 次试验,测定超声糯米粉 GI 值,以验证优化试验条件的准确性与稳定性。

1.2.5 GI 值的测定 参考 Englyst 等^[19]和缪铭^[20]的方法进行体外模拟消化试验,称取糯米粉 200 mg 装入到 50 mL 具塞离心管中,加入 15 mL 浓度为 0.2 mol/L, pH5.2 的醋酸钠缓冲溶液,沸水浴处理 30 min,加热期间不停搅拌,结束后取出离心管冷却至室温。加入 10 mL 混合酶液(0.002 mL 的淀粉葡萄糖苷酶与 1.5 mL 猪胰腺 α -淀粉酶混合定容至 10 mL,即为混合酶液),并于 37 ℃ 水浴保温酶解。分别在酶解时间为 0、10、20、40、60、90、120、180 min 时吸取 1 mL 酶解液于试管中,加入乙醇均匀灭酶,在 4 ℃ 下,10000 r/min 离心 5 min,取上清液稀释 10 倍。使用 DNS 法测定糯米粉样品中的葡萄糖含量,通过葡萄糖标准曲线($y=0.9765x+0.0383$, $R^2=0.9992$)和公式计算葡萄糖含量并绘制出糯米粉样品的水解曲线,曲线下面积表示食物消化后对血糖的影响。以白面包(定义白面包的水解率为 100)为对照标准,计算营养片段 RDS、SDS 和 RS 的含量、水解指数(Hydrogenated Index, HI)和 GI 值。

$$RDS(\%) = \frac{(G_{20} - FG) \times 0.9}{TS}$$

$$SDS(\%) = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{TS}$$

$$RS(\%) = \frac{TS - (RDS + SDS)}{TS}$$

式中: G_{20} —淀粉样品酶水解 20 min 后产生的葡萄糖含量(mg); FG—酶水解前淀粉样品中游离的葡萄糖含量(mg); G_{120} —淀粉样品酶水解 120 min 后产生的葡萄糖含量(mg); TS—总淀粉干基重(mg)。

$$\text{水解率}(\%) = \frac{Gt \times 0.9}{200}$$

HI=样品消化(水解)曲线下面积/参比标准样品消化(水解)曲线下面积 $\times 100$

$$GI = 39.71 + (0.549HI)$$

1.2.6 X-射线衍射分析 将糯米粉样品放入 XRD 衍射检测槽进行 X-射线衍射扫描。测试条件为:靶型: Cu 射线,电压为 40 kV,电流为 150 mA,扫描范围为 5°~40°,步长为 0.02°,扫描速度 6°/min,测定的 X 衍射图谱的 2θ 。采用 MDI Jade6 软件对样品进行相对结晶度计算,根据公式:

$$RC = \frac{Ac}{Ac + Aa} \times 100$$

式中,RC 为样品的相对结晶度,Ac 为样品结晶区的面积,Aa 为样品无定型区面积。

1.3 数据处理

所有实验均平行测定 3 次,结果以平均值 \pm 标准偏差表示。采用 IBM SPSS 19.0 统计软件对实验数据进行统计分析,显著水平 $P < 0.05$ 。使用 OriginPro 2015 制图,Design-Expert 软件进行响应面法优化分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 糯米粉乳液浓度对消化特性及 GI 值的影响 RDS 的含量很大程度上决定餐后血糖的应答,GI 值的升高受 RS 和 SDS 含量控制,RS 的含量升高代表抗消化能力增强^[21-22]。方桂红等^[23]的研究表明 RS 是位于淀粉内部的双螺旋结构,排列紧密,酶与淀粉之间的作用位点少,具有很好的抗酶解能力,RDS 是位于淀粉重结晶的外部区域的无定形结构,SDS 介于两者之间。在一定浓度范围内,料液比影响超声空化效应,溶质增加,减弱了对单一淀粉颗粒的超声效应,单一淀粉颗粒接收到的能量小,淀粉结晶度降低,影响淀粉的消化性。由图 1 可知,当糯米粉乳液浓度为 20%~60% 时,RDS 变化不显著,当乳液浓度为 70% 时,RDS 含量最高(35.52%),但相较于普通糯米粉(38.04%)低,表明超声可以降低 RDS 含量。RS 含量随着乳液浓度的提高呈下降趋势,当乳液浓度为 20% 时,RS 含量最高(43.87%),较普通糯米粉提高了 24.45%,表明超声使消化淀粉转化为不可消化淀粉,这是因为强烈的超声空化导致淀粉颗粒中形成孔,酶更易进入,以及游离直链糖分子的增加等一系列原因^[24-27]。

糯米粉乳液浓度对糯米粉的降糖效果有显著 ($P < 0.05$) 影响。糯米粉的 HI 和 GI 随着糯米粉乳

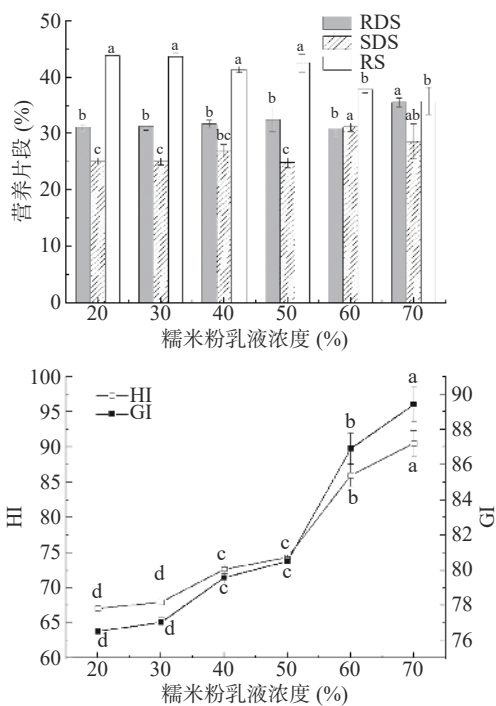


图 1 糯米粉乳液浓度对糯米粉消化特性及 GI 值的影响
Fig.1 Effects of glutinous rice flour emulsion concentration on digestive properties and glycemic index of glutinous rice flour

注: 图中同一指标小写字母不同, 表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

液浓度的提高而增大, 当乳液浓度为 20% 时, HI (67.05) 和 GI (76.52) 最低, 分别比未超声糯米粉 (测得 $GI = 88.96$) 降低了 25.25%、13.98%。这可能是由于 RDS 含量降低, RS 含量提高, RS 在食物消化过程中吸水溶胀形成高黏度溶胶, 有助于提升饱腹感, 可延缓餐后血糖升高^[28]。在乳液浓度为 20%~50% 范围内, HI 和 GI 值增加缓慢, 抗消化性能较强。当糯米粉乳液浓度大于 50% 时, 糯米粉水解曲线下面积大, 此时淀粉分子与酶结合位点多, 释放的葡萄糖量多, 耐消化性较差。综合考虑成本及生产的可控制性, 选取乳液浓度 30% 完成以下试验。

2.1.2 超声功率对消化特性及 GI 值的影响 超声产生强烈的空化作用使悬浮介质产生气泡, 气泡坍塌前后产生的剪切力会改变淀粉链结构, 从而实现了对淀粉的改性。由图 2 可知, 随着超声功率的增加, RDS 含量呈先下降后上升的趋势, SDS 含量几乎不变, RS 含量先上升后下降, 表明超声作用可以使淀粉间组分相互转化。当超声功率为 400 W 时 RS 含量达到最大值 (42.22%), 此时的糯米粉淀粉结晶区域更紧凑有序, 更耐消化酶的作用。这是因为超声波切断直链和去支链产生的短链分子, 淀粉酶降解分散淀粉链的能力减弱所致^[17]。Zhuang 等^[29] 在研究超声联合微波对荷籽淀粉-甘油单硬脂酸复合物体外消化率的影响时, 发现 400 W 的超声波处理可提高淀粉复合物的消化阻力, 增加抗性淀粉的含量, 与本研究结论一致。当功率增大至 500 W 时, 超声能量增大, 糯米淀粉颗粒产生损伤, 完整性被破坏, 消化酶容易进入淀

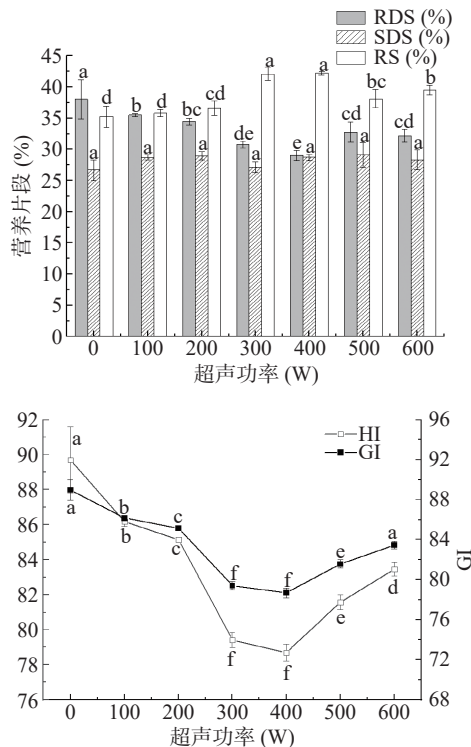


图 2 超声功率对糯米粉消化特性及 GI 值的影响

Fig.2 Effects of ultrasound power on digestive properties and glycemic index of glutinous rice flour

注: 图中同一指标小写字母不同, 表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

粉内部, 致使糯米淀粉 RDS 含量增加, RS 含量减少。

糯米粉的 HI 和 GI 随着超声功率的增大呈先下降后上升的趋势, 在超声功率 100~300 W 范围内, HI 及 GI 值降低幅度较大, 超声波产生的高速、强烈的空化效应和搅拌作用, 破坏了淀粉结构, 淀粉消化速率降低、淀粉在小肠的吸收率及摄后血糖反应均下降。当超声功率为 400 W 时, 糯米粉的 HI 和 GI 值最小, 二者的变化趋势一致。相比于未超声糯米粉 (测得 $GI = 88.96$), GI 值从 88.96 降低至 78.69, 降低了 11.54%, 表明超声工艺可使糯米粉具有抗消化性。综合考虑成本及生产的可控制性, 选取超声功率 300~500 W 进行响应面法优化试验。

2.1.3 超声时间对消化特性及 GI 值的影响 RDS 的相对含量与淀粉酶降解分散淀粉链的能力有关, 相反, 淀粉链的淀粉水解反应受到淀粉构象效应影响。由图 3 可知, 在 17 min 以内, RDS 含量变化不明显, 继续延长超声时间糯米粉乳液中 RDS 增加, 这可能是由于直链淀粉分子的断裂和支链淀粉分子的脱支使短链的可用性增加。SDS 随着超声时间的延长无显著变化, RS 呈先增加后降低的趋势, 在超声 5 min 时 RS 达到最大值 (42.92%) 比对照提高了 21.76%, 这是因为短时的超声波诱导的内部颗粒结构的增强重排, 长程结晶度增加, 可有效限制淀粉水解酶的水解速率, 从而降低支链淀粉链的降解速度^[17]。

由图 3 可知, 糯米粉的 HI 和 GI 随着超声时间

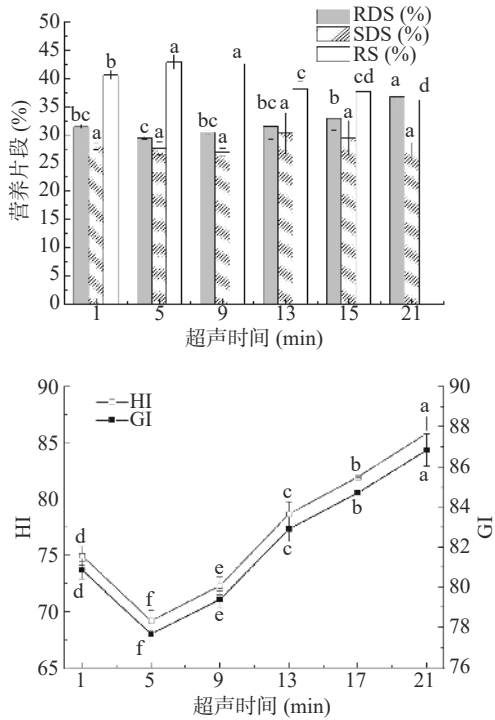


图 3 超声时间对糯米粉消化特性及 GI 值的影响

Fig.3 Effects of ultrasound time on digestive properties and glycemic index of glutinous rice flour

注: 图中同一指标小写字母不同, 表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

的增大呈先下降后上升的趋势。短时超声有利于降低糯米粉的 HI 及 GI 值, 当超声时间为 5 min 时, 糯米粉的 HI 和 GI 值达到最小值, 相比于未超声糯米粉(测得 $GI = 88.96$), GI 值从 88.96 降低至 77.68, 降低了 12.68%, 这是因为超声时间较短, 作用于结晶区域的机械功率低, 使 α -淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶对淀粉水解的敏感性低^[30-31]。当超声时间在 9~21 min 范围内, GI 显著提高, 说明长时间的超声处理促进了淀粉的水解, 这可能是因为随着超声时间的增加, 淀粉颗粒表面产生损伤, 酶更容易进入到淀粉内部进行水解反应, 此时糯米粉乳液的结构变得更加均匀, 淀粉分子间重排形成了新的有序化结构^[32]。也可能是因为超声破坏了 α -1,6 糖苷链上的 C-O-C 键, 增加了线性链数, 有助于支链淀粉分支点的断裂, 从而促进了淀粉水解^[33]。综合考虑成本及生产的可控制性, 选取超声时间 1~9 min 进行响应面法优化试验。

2.1.4 干燥温度对消化特性及 GI 值的影响 干燥温度对淀粉链的晶体结构、短程有序性及消化性有重要影响^[34], 但对不同晶型及来源的淀粉影响不同。Shang 等^[35] 研究干燥温度对玉米淀粉结构及消化率的影响时发现, 在一定温度范围内, 干燥温度会改变玉米淀粉短程有序结构以及对酶消化的敏感性, 进而影响淀粉的消化性。Oh 等^[36] 研究干燥温度对高直链淀粉消化性的影响时表明, 在一定温度范围内, 干燥温度与淀粉体外消化率呈负相关, 随着干燥温度的提高, RDS 含量逐渐降低, SDS 与 RS 含量明显增加, 淀粉相对结晶度的提高和短程有序性是影响淀粉

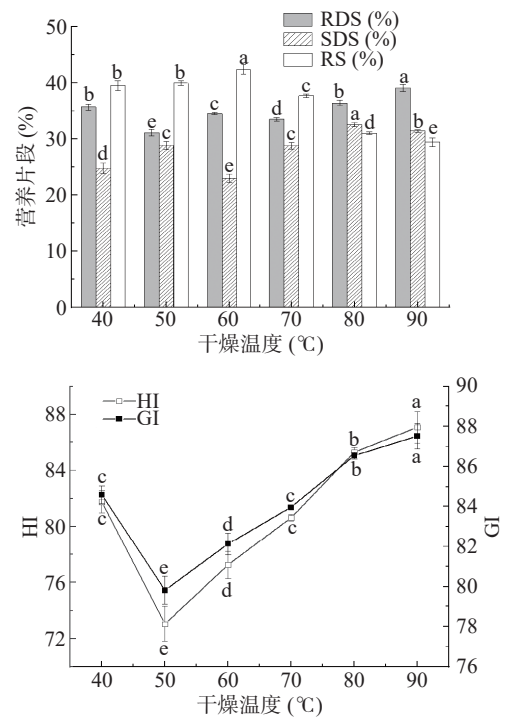


图 4 干燥温度对糯米粉消化特性及 GI 值的影响

Fig.4 Effects of drying temperature on digestive properties and glycemic index of glutinous rice flour

注: 图中同一指标小写字母不同, 表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

酶对淀粉链可及性的重要因素。从图 4 可见, 干燥温度对糯米粉的 RDS、SDS、RS 含量影响显著, 随着干燥温度的升高, RDS 为先降低后升高的趋势, 且在 50 °C 时达到最小值, SDS 呈逐渐上升趋势, RS 先上升后下降, 在 60 °C 达到最大值, 表明较低的干燥温度下, 有利于 RS 的形成。这与 Oh 等^[36] 的研究结果不一致, 这可能是因为直链淀粉和支链淀粉共同决定 RS 的形成, 两种淀粉的结晶熔融温度有明显差异, 直链淀粉在 160 °C 左右发生结晶熔融, 支链淀粉在 60 °C 左右结晶熔融, 糯米粉大部分为支链淀粉, 在较高的干燥温度下, 部分支链淀粉熔融, 结晶结构被破坏, 致使 RS 含量降低, 当温度达到 80 °C 以上时 RS 降低尤为明显^[37], 对于干燥温度对淀粉消化特性的影响研究并不统一, 具体机理仍需进一步深入研究。

糯米粉 HI 和 GI 随着温度的升高呈先降低后增加趋势。在 50 °C 下干燥的糯米粉 GI 含量为 79.81, 比未超声糯米粉(测得 $GI = 88.96$)降低了 10.29%, 此条件下糯米粉的抗消化性最好, 继续提高干燥温度, GI 上升明显, 这可归因于淀粉局部糊化和结合水能力的提高, 较高的温度会快速带走糯米粉表面的水分, 淀粉内外形成水分差从而产生拉伸应力, 糯米粉出现色泽发黄、硬化结块现象。综合考虑成本及生产的可控制性, 选取处理温度 40~60 °C 进行响应面法优化试验。

2.2 响应面分析湿热处理工艺试验结果

2.2.1 响应面法优化试验设计及结果 应用 Design

Expert 8.0.6 软件对响应值 GI 值进行多元回归拟合分析, 可得到二次项回归方程: $GI=76.47+0.76A-0.35B+0.63C+0.52AB-0.095AC-1.16BC+1.13A^2+1.83B^2+2.36C^2$ 。结果及拟合方程预测值如表 2 所示。

表 2 响应面试验设计及结果
Table 2 Design and results of response surface test

实验号	超声时间(min)	超声功率(W)	干燥温度(°C)	GI值
1	1	300	50	79.89
2	9	300	50	80.09
3	1	500	50	77.72
4	9	500	50	80.02
5	1	400	40	78.57
6	9	400	40	80.54
7	1	400	60	79.58
8	9	400	60	81.17
9	5	300	40	78.79
10	5	500	40	80.84
11	5	300	60	82.80
12	5	500	60	80.22
13	5	400	50	76.41
14	5	400	50	76.43
15	5	400	50	76.75
16	5	400	50	76.08
17	5	400	50	76.69

2.2.2 方差分析结果 由表 3 所示, 回归模型极显著 ($P<0.0001$), 该模型的可信度水平大于 99.90%, 失拟项不显著 ($P=0.1007>0.05$), 表明该回归方程模拟与实际拟合良好, 方程能够反映糯米粉超声处理后各因素与 GI 值之间的关系; 决定系数 $R^2=0.9816$, 表明该模型具有良好的拟合度, $R^2_{Adj}=0.9580$, 即该模型能解释 95.80% 试验数据响应值的变化, 该模型预测值和实际值拟合度高; R^2_{Adj} 与 R^2_{Pre} 的差值 <0.2 , 表明没有显著差异, 无需进一步优化响应面方程。A、C、BC、 A^2 、 B^2 、 C^2 对应的 $P<0.01$, 影响极显著, 对糯米粉 GI 值的影响大; B、AB 对应的 $P<0.05$, 影响显著, AC 对糯米粉 GI 值的影响不显著, 由 F 值的大小可

表 3 回归模型方差分析
Table 3 ANOVA of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	62.67	9	6.96	41.56	<0.0001	**
A-超声时间	4.59	1	4.59	27.4	0.0012	**
B-超声功率	0.96	1	0.96	5.72	0.0480	*
C-干燥温度	3.16	1	3.16	18.88	0.0034	**
AB	1.1	1	1.1	6.58	0.0373	*
AC	0.036	1	0.036	0.22	0.6566	ns
BC	5.36	1	5.36	31.99	0.0008	**
A^2	5.38	1	5.38	32.1	0.0008	**
B^2	14.07	1	14.07	83.95	<0.0001	**
C^2	23.51	1	23.51	140.29	<0.0001	**
残差	1.17	7	0.17			
失拟项	0.89	3	0.3	4.17	0.1007	ns
纯差	0.28	4	0.071			
综合	63.85	16				

注: **表示差异极显著, $P<0.01$; *表示差异显著, $P<0.05$; ns表示无统计学差异, $P>0.05$ 。

知, 3 个因素对超声处理糯米粉的 GI 值影响程度依次为: 超声时间>干燥温度>超声功率, 超声时间对糯米粉 GI 值的影响最大。

2.2.3 各因素交互作用 为了研究变量之间的相互作用, 并确定每个变量的最大响应最佳水平, 生成了 3D 响应面图, 见图 5~图 7。响应面中各因素的影响程度可以通过 3D 响应面图中响应面的陡峭角度反映。响应面图中曲面越陡, 说明这两个因素交互影响作用越显著。在响应面优化试验中, 干燥温度不变

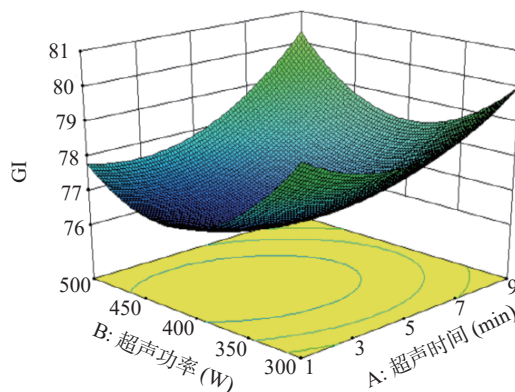


图 5 超声时间与超声功率相互作用的响应面图

Fig.5 Response surface map of the interaction between ultrasonic time and ultrasonic power

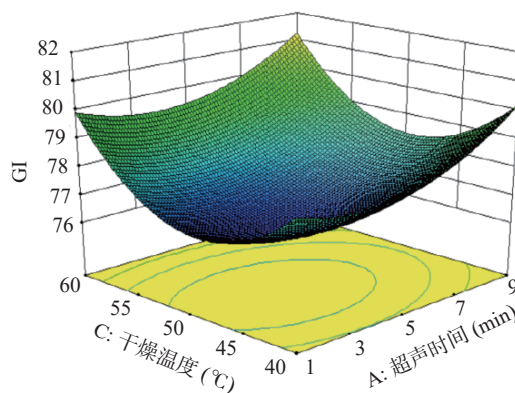


图 6 超声时间和干燥温度相互作用的响应面图

Fig.6 Response surface map of the interaction between ultrasound time and drying temperature

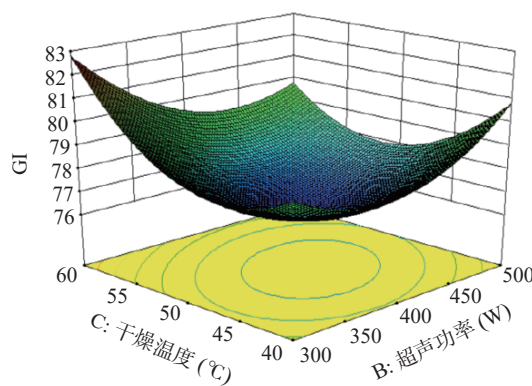


图 7 超声功率与干燥温度相互作用的响应面图

Fig.7 Response surface map of the interaction between ultrasonic power and drying temperature

时, 超声时间与超声功率均显著($P<0.05$), 3D 响应面图陡峭, 由此说明其交互作用显著($P=0.0373<0.05$)对糯米粉 GI 值影响较大。超声时间一定时, 超声功率与干燥温度均显著($P<0.05$), 3D 响应面图陡峭, 其交互作用极显著($P=0.0008<0.01$), 这与 F 值结果一致。由方差分析结果也可知 AB、BC 交互作用均能显著影响 GI 值的大小。

2.2.4 确定最佳工艺条件及验证试验 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行优化得到模型预测理论值为 76.28, 该模型得到最佳的工艺条件为超声时间 3.54 min, 超声功率为 411.09 W, 干燥温度 48.86 °C, 考虑到实际操作的可能性, 将参数设置为超声时间 4 min, 超声功率为 400 W, 干燥温度 49 °C 并以该条件进行三次重复试验, 测得实际值为 76.31 ± 0.43 , 与理论预测值吻合度较好, 表明在该模型优化得到的超声工艺参数可靠、准确。

2.2.5 超声糯米粉 X-射线衍射分析 图 8 可见, 糯米粉与超声处理糯米粉均表现出典型的 A 型衍射, 均在 17.3° 和 18.2° 附近有未分离的峰, 在 15.2° 和 23.1° 处有强峰, 说明超声处理并没有改变糯米粉的晶型。糯米粉的相对结晶度为 20.73%, 超声糯米粉的相对结晶度为 16.30%, 经过超声波处理后糯米粉的结晶度显著降低, 这是因为结晶区与支链淀粉含量呈正相关, 超声波的机械作用切断了聚合物的结构链, 切断支链淀粉的侧链, 产生更多的线性分子, 增加了直链淀粉的含量。

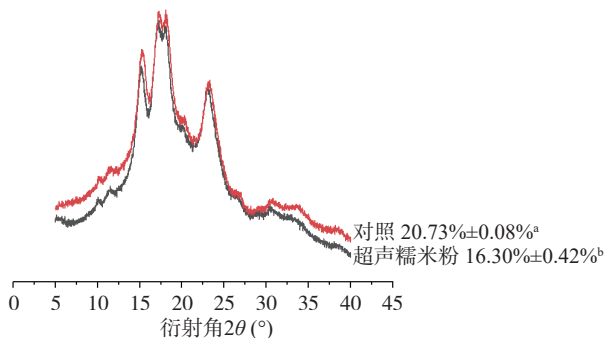


图 8 超声糯米粉 X-射线衍射图的结晶度

Fig.8 Crystallinity of ultrasonic glutinous rice flour by X-ray diffraction

注: 小写字母不同表示数据有显著性差异($P<0.05$)。

3 结论

通过体外消化试验研究了超声条件对糯米粉消化特性及血糖指数的影响, 并进行了数据建模和条件优化。研究表明, 糯米粉乳液浓度、超声时间、超声功率、干燥温度 4 个因素对糯米粉消化特性及 GI 值的影响均显著。超声作用可以使淀粉间组分相互转化, 可有效降低糯米粉的 GI 值。经 Box-Behnken 设计试验得到的回归方程极显著($P<0.0001$), 失拟项不显著($P>0.05$), 回归方程拟合度好。在糯米粉乳液浓度为 30%, 超声时间 4 min, 超声功率为 400 W, 干燥

温度 49 °C, 糯米粉 GI 值为 76.31 ± 0.43 (比普通糯米粉降低了 14.22%), 实测值与理论值较为接近, 表明该模型可用于优化糯米粉超声处理工艺。超声处理并没有改变糯米粉的晶型, 结晶度显著降低。短时间的超声处理降低糯米粉的血糖指数为糯米资源的高值化利用提供了一个可行的方法。但单纯的超声处理还不能使糯米粉达到低 GI 值食品的要求, 进一步研究采用超声联合其他技术是否会达到更好的效果, 需要进一步深入研究。超声工艺操作简单, 但如何实现工业化生产还需进行实践检验。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 郝宗国, 余振宇, 胡尧, 等. 冷冻球磨处理对糯米淀粉结构、特性及消化性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 39-47. [HAO Zongwei, YU Zhenyu, HU Yao, et al. Effect of freezing ball milling treatment on the structure, properties and digestibility of waxy rice starch[J]. Food Science, 2023, 44(11): 39-47.]
- [2] HE Hai, CHI Chengdeng, XIE Fengwei, et al. Improving the *in vitro* digestibility of rice starch by thermomechanically assisted complexation with guar gum[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105637.
- [3] BUTARDO V M Jr, SREENIVASULU N. Tailoring grain storage reserves for a healthier rice diet and its comparative status with other cereals[J]. International Review of Cell and Molecular Biology, 2016, 323: 31-70.
- [4] 余振宇, 孙露倩, 胡尧, 等. OSA 改性糯米粉的理化及乳化特性分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(3): 43-51. [YU Zhenyu, SUN Luqian, HU Yao, et al. Physicochemical and emulsifying properties of OSA modified glutinous rice flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(3): 43-51.]
- [5] 冒钰荣. 低 GI 黑小麦速食粥的研制及储藏稳定性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023. [MAO Yurong. Preparation and storage stability of low GI instant triticale porridge[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.]
- [6] KHURAI SHAH N S, MOHD A N A S M, FARHANA N K, et al. Validation of *in vitro* glycaemic index (eGI) and glycaemic load (eGL) based on selected baked products, beverages, and canned foods[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 100502.
- [7] 郭宇, 王东旭, 丁震, 等. 蛋白酶水解对糯米粉 GI 值及品质的影响研究[J]. 现代面粉工业, 2022, 36(1): 21-25. [GUO Yu, WANG Dongxu, DING Zhen, et al. Effect of protease hydrolysis on GI value and quality of glutinous rice flour[J]. Modern Flour Milling Industry, 2022, 36(1): 21-25.]
- [8] 王东旭, 郭美玲, 刘一锐, 等. 湿热处理对糯米粉血糖生成指数值及相关指标的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 253-259. [WANG Dongxu, GUO Meiling, LIU Yirui, et al. Effects of heat-moisture treatment on glycemic index and relevant indexes of glutinous rice flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 253-259.]
- [9] 张振娜. 射频处理调控大米淀粉消化性能的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [ZHANG Z N. Research on regulating the digestive properties of rice starch through radio frequency processing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]

- [10] 熊金娟, 陶倩, 丁文平, 等. 臭氧处理对糯米淀粉消化特性的影响研究[J]. 食品科技, 2017, 42(9): 166–170. [XIONG Jinjuan, TAO Qian, DING Wenping, et al. Effect of ozone treatment on digestibility of waxy rice starch[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(9): 166–170.]
- [11] BABU A S, MOHAN R J, PARIMALAVALLI R. Effect of single and dual-modifications on stability and structural characteristics of foxtail millet starch[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 457–465.
- [12] KANNIK K, TAI V N, SANDRA K, et al. Ultrasound-chilling assisted annealing treatment to produce a lower glycemic index of white rice grains with different amylose content[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022(87): 106055.
- [13] HU Aijun, JIAO Shuting, ZHENG Jie, et al. Ultrasonic frequency effect on corn starch and its cavitation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 2(60): 941–947.
- [14] KAUR H, GILL B S. Effect of high-intensity ultrasound treatment on nutritional, rheological and structural properties of starches obtained from different cereals[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 126: 367–375.
- [15] CUI Rongbin, ZHU Fan. Effect of ultrasound on structural and physicochemical properties of sweetpotato and wheat flours[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020(66): 105118.
- [16] VIDHYALAKSHMI R, PRABHASANKAR P, MEERA M S. Ultrasonication assisted pearl millet starch-germ complexing: Evaluation of starch characteristics and its influence on glycaemic index of bread[J]. Journal of Cereal Science, 2023(112): 103686.
- [17] FLORES-SILVA P C, ROLDAN-CRUZ C A, CHAVEZ-ESQUIVEL G, et al. *In vitro* digestibility of ultrasound-treated corn starch[J]. Starch-Stärke, 2017, 69(9–10): 1700040.
- [18] 杨梦恬, 沈舒民, 沈圣泉, 等. 超声处理对糯米与非糯米淀粉结构和消化性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 556–563. [YANG Mengtian, SHEN Shumin, SHEN Shengquan, et al. Effect of sonication on starch structure and digestibility of glutinous and non-glutinous rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(3): 556–563.]
- [19] ENGLYST H, KINGMAN S, CUMMINGS J. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46: 33–50.
- [20] 缪铭. 慢消化淀粉的特性及形成机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009. [MIAO Ming. Characteristic and formation mechanism of slowly digestible starch[D]. Jiangnan University, 2009.]
- [21] CHANG Ranran, LI Man, WANG Yanfei, et al. Retrogradation behavior of debranched starch with different degrees of polymerization[J]. Food Chemistry, 2019(297): 125001.
- [22] 吴怡瑾, 郑方园, 林丽, 等. 超高压处理对变温结晶制备糯米慢消化淀粉的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 55–61. [WU Yijin, ZHENG Fangyuan, LIN Li, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the preparation of slowly digestible starch from glutinous rice by temperature-cycled retrogradation[J]. Food Science, 2022, 43(5): 55–61.]
- [23] 方桂红, 邓小宝, 陶宇, 等. 两种菠萝蜜籽抗性淀粉特性研究[J]. 轻工科技, 2019, 35(7): 1–3. [FANG Guihong, DENG Xiaobao, TAO Yu, et al. Characteristics of resistant starch in two jackfruit seeds[J]. Light Industry Science and Technology, 2019, 35(7): 1–3.]
- [24] KANG Xuemin, LIU Pengfei, GAO Wei, et al. Preparation of starch-lipid complex by ultrasonication and its film forming capacity[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105340.
- [25] LIU Pengfei, WANG Rui, KANG Xuemin, et al. Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 215–222.
- [26] CHUMSRI P, PANPIPAT W, CHEONG L Z, et al. Formation of intermediate amylose rice starch-lipid complex assisted by ultrasonication[J]. Foods, 2022, 11: 2430.
- [27] RAZA Husnain, LIANG Qiufang, AMEER Kashif, et al. Dual-frequency power ultrasound effects on the complexing index, physicochemical properties, and digestion mechanism of arrowhead starch-lipid complexes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022(84): 105978.
- [28] 王鹏, 程志强, 祖亿, 等. 杂粮淀粉体外消化特性的分析[J]. 食品科技, 2017, 42(10): 170–174. [WANG Peng, CHENG Zhiqiang, ZU Yi, et al. Effect of starch grains on the *in vitro* digestibility in different processing methods[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(10): 170–174.]
- [29] ZHUANG Jie, LIU Huifang, YOU Longnong, et al. Influence of ultrasonic-microwave power on the structure and *in vitro* digestibility of lotus seed starch-glycerin monostearin complexes after retrogradation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023(228): 59–67.
- [30] SHUMOY Habtu, RAES Katleen. *In vitro* starch hydrolysis and estimated glycemic index of tef porridge and injera[J]. Food Chemistry, 2017(229): 381–387.
- [31] LU Zhanhui, BELANGER Nicholas, DONNER Elizabeth, et al. Debranching of pea starch using pullulanase and ultrasonication synergistically to enhance slowly digestible and resistant starch[J]. Food Chemistry, 2018(268): 533–541.
- [32] ZHANG Xiaolei, MI Tongtong, GAO Wei, et al. Ultrasonication effects on physicochemical properties of starch-lipid complex[J]. Food Chemistry, 2022(388): 133054.
- [33] ZHANG Bin, HUANG Qiang, LUO Faxing, et al. Structural characterisations and digestibility of debranched high-amylose maize starch complexed with lauric acid[J]. Food Hydrocolloids, 2012(28): 174–181.
- [34] GONZALEZ M, VERNON-CARTER E J, RAMIREZ Alvarez, et al. Effects of dry heat treatment temperature on the structure of wheat flour and starch *in vitro* digestibility of bread[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021(166): 1439–1447.
- [35] SHANG Jiaqi, HU Zhiqing, WANG Peizhuan, et al. Effect of operating conditions on structure and digestibility of spray-dried corn starch[J]. Food Research International, 2023(174): 113511.
- [36] OH I K, BAO I Y, LEE H G. Effect of dry heat treatment on physical property and *in vitro* starch digestibility of high amylose rice starch[J]. Int J Biol Macromol, 2018(108): 568–575.
- [37] 赵凯. 抗性淀粉形成机理及对面团流变学特性影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004. [ZHAO Kai. The forming mechanism of resistant starch and its effect on rheological property of dough[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2004.]