

不同加工工艺的莲藕全粉糊化和体外消化特性比较

李依凡¹, 吴瑾瑾¹, 易阳^{1,2}, 彭凯迪^{1,2}, 孙莹^{1,2}, 朱锐^{3*}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 农产品加工与转化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430023)
(2. 湖北省荆楚特色食品产业技术研究院, 湖北荆州 434000) (3. 长江大学文理学院, 湖北荆州 434020)

摘要: 以武植 II 号鲜藕为原料, 分别采用藕浆添加茶多酚 (I)、藕浆高温糊化-回生 (II)、藕浆添加茶多酚-高温糊化-回生 (I-II)、藕浆高温糊化-普鲁兰酶脱支酶解-回生 (II-III)、藕浆高温糊化-普鲁兰酶脱支酶解-添加茶多酚-回生 (I-II-III) 工艺, 结合冷冻干燥制备莲藕全粉 LRWP-I、LRWP-II、LRWP-I-II、LRWP-II-III、LRWP-I-II-III, 以直接冷冻干燥制备的 LRWP 为对照, 分析不同加工工艺对 LRWP 糊化和消化特性的影响。结果表明, LRWP-I 峰值粘度 (4 596 cP) 和衰减值 (3 322 cP) 最高, 相比于 LRWP, 其最终粘度、回生值以及凝胶特性均降低; LRWP-II 的硬度 (89.7 g) 和 LRWP-I-II 的硬度 (93.1 g) 较 LRWP (37.6 g) 明显增加; LRWP-II-III 峰值粘度最低为 43 cP 且凝胶特性最差; LRWP-I-II-III 相较于 LRWP, 糊化温度、粘度及凝胶特性均降低; 此外, 体外模拟消化实验显示 LRWP-I 中抗性淀粉的含量 (92.65%) 显著 ($P < 0.05$) 高于 LRWP 中抗性淀粉含量 (77.88%)。结论: 仅添加茶多酚处理可增加抗性淀粉含量, 全粉 LRWP-I 具有良好的糊化特性及消化特性, 本研究为莲藕全粉资源的开发与利用以及抗性淀粉的制备提供理论指导。

关键词: 茶多酚; 高温糊化-回生; 酶解; 糊化特征; 体外消化特征

文章编号: 1673-9078(2024)12-218-226

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.12.1388

Gelatinization and *in Vitro* Digestive Properties of Lotus Root Whole Powder Prepared Using Various Processing Techniques

LI Yifan¹, WU Jinjin¹, YI Yang^{1,2}, PENG Kaidi^{1,2}, SUN Ying^{1,2}, ZHU Rui^{3*}

(1. School of Food Science and Engineering, Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

(2. Hubei Jingchu Specialty Food Industry Technology Research Institute, Jingzhou 434000, China)

(3. College of Arts and Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434020, China)

Abstract: Lotus root whole powder (LRWP) were prepared from the fresh roots of Wuzhi II lotus using several processing techniques and/or freeze-drying. The processing techniques included tea polyphenol addition (i.e., adding tea polyphenols to lotus root pulp) (I), gelatinization and retrogradation (i.e., high-temperature gelatinization and retrogradation of lotus root pulp) (II), tea polyphenol addition-gelatinization and retrogradation (I-II), gelatinization-pullulanase debranching-retrogradation (II-III), and gelatinization-pullulanase debranching-tea polyphenol addition-retrogradation (I-II-III). LRWP samples prepared

引文格式:

李依凡, 吴瑾瑾, 易阳, 等. 不同加工工艺的莲藕全粉糊化和体外消化特性比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 218-226.

LI Yifan, WU Jinjin, YI Yang, et al. Gelatinization and *in vitro* digestive properties of lotus root whole powder prepared using various processing techniques [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 218-226.

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 武汉市知识创新专项基础研究项目 (2022020801010389); 湖北省重点研发计划项目 (2022BBA0023)

作者简介: 李依凡 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬精深加工, E-mail: 158426142582@163.com

通讯作者: 朱锐 (1984-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 品质分析, E-mail: zhurui6113@163.com

via these processing techniques were denoted as LRWP- I , LRWP- II , LRWP- I - II , LRWP- II - III , and LRWP- I - II - III , respectively, and the LRWP samples prepared by direct freeze-drying were used as the control (denoted as LRWP). The impact of different processing techniques on the gelatinization and digestive properties of LRWP samples was analyzed. The results showed that LRWP-I had the highest peak viscosity (4 596 cP) and breakdown viscosity (3 322 cP) among groups, whereas the final viscosity, setback viscosity, and gel properties of LRWP- I were lower than those of LRWP. The firmness of LRWP-II (89.7 g) and LRWP- I - II (93.1 g) was significantly higher than that of LRWP (37.6 g). LRWP-II-III had the lowest peak viscosity of 43 cP and the worst gel properties. LRWP- I - II - III had a lower gelatinization temperature, viscosity, and gel properties compared with those of LRWP. Additionally, *in vitro* digestion experiments indicated that the content of resistant starch in LRWP- I (92.65%) was significantly ($P<0.05$) higher than that in LRWP (77.88%). In conclusion, applying tea polyphenol addition (I) alone increased the content of resistant starch, and the corresponding product LRWP-I showed good gelatinization and digestive properties. This study provide theoretical guidance for the development and application of LRWP as well as the preparation of resistant starch.

Key words: tea polyphenol; high-temperature gelatinization-retrogradation; enzymolysis; gelatinization property; *in vitro* digestive property

莲藕是我国广泛种植、烹食和加工的一种水生蔬菜,其淀粉和膳食纤维含量较高,且富含维生素、矿物质、多酚等营养物质^[1]。莲藕全粉,又称全藕粉,是由新鲜莲藕经清洗、去皮节、切片、干燥、粉碎等工艺制成^[2],与藕淀粉相比,加工简单、资源利用率高,且几乎保留了全部的营养物质。莲藕全粉的产品形式和利用方式与藕淀粉产品高度相似,作为替代性的绿色产品开发具有良好前景。莲藕全粉中含有约40%的淀粉,但抗性淀粉含量低于5%^[3]。食用淀粉含量高的食物会导致血糖水平升高,从而引发II型糖尿病及相关病症^[4]。提高莲藕全粉中的抗性淀粉含量有利于食用后的血糖控制,继而满足人们对健康饮食的需求。

抗性淀粉为不被健康人体小肠所吸收的淀粉及其分解物的总称^[5],其代谢类型与膳食纤维相似,具有降低血糖和血脂、改善肠道健康等功能^[6]。然而,抗性淀粉在天然食物中的含量通常较低,一般通过化学法、物理法和酶法来改性提升含量。莲藕淀粉中支链淀粉含量高,易老化,对其进行改性处理可以改善其加工性能^[3],目前,大多数研究均是直接对莲藕淀粉改性,如Xu等^[7]采用响应面法确定了次氯酸钠改性莲藕淀粉的最佳工艺条件,在温度35℃、活性氯含量4.6%、pH值10.8、反应时间120min条件下,改性效果最好。樊律廷等^[8]发现茶多酚和原花青素与普鲁兰酶复合适用于淀粉改性。然而,不同加工处理方式对莲藕全粉的综合品质特征,尤其是对其理化和消化特性的影响,尚鲜见报道。

本文以新鲜莲藕为原料,匀浆后通过不同的加工处理方式(冷冻干燥、添加茶多酚后冷冻干燥、糊化-回生处理后冷冻干燥、添加茶多酚-糊化-回生处理后冷冻干燥、糊化-酶解-回生后冷冻干燥、糊化-酶解-添加茶多酚-糊化-回生处理后冷冻干燥)制备莲藕全粉,表征其淀粉颗粒与结构,分析全粉的糊化特性、凝胶特性、黏度特性及体外消化特性,旨在为莲藕全粉的高品质加工提供更多的理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜莲藕(武植II号),武汉市金水祺良农副产品有限公司。

人工唾液、胃液和结肠液,北京雷根生物技术有限公司;总淀粉试剂盒和D-葡萄糖检测试剂盒,南京建成生物工程研究所;茶多酚(纯度98%),山东优索化工科技有限公司;食品级普鲁兰酶(1U/mg),广东建达生物科技有限公司;其它试剂均为国药分析试剂。

1.2 仪器与设备

SCIENTZ-12N/A型冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Q2000型差示扫描量热仪,美国TA公司;SKG1354多功能果蔬原汁机,佛山艾诗凯奇电气有限公司;D8 Advance X-射线衍射仪,德国Bruker;Super4型快速粘度仪,瑞典波通公司;

扫描电镜, 捷克 TESCAN MIRA LMS ; TA.XTC 质构仪, 上海宝圣实业发展有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 莲藕全粉制备

新鲜莲藕洗净后去皮、去节、切片, 用匀浆机制成藕浆。藕浆采用茶多酚添加(方法 I)、糊化-回生(方法 II)、普鲁兰酶酶解脱支(方法 III)的单一或组合工艺处理, 再经冷冻干燥、粉碎、过筛(80目)获得全粉。

(1) 全粉 LRWP: 藕浆直接冻干制粉。

(2) 全粉 LRWP-I: 藕浆中按质量百分比添加 0.5% 的茶多酚, 物理混匀后冻干制粉。

(3) 全粉 LRWP-II: 将藕浆置于 100 °C 水浴锅中糊化 30 min, 置于 4 °C 回生 24 h 后冻干制粉。

(4) 全粉 LRWP-I-II: 藕浆中按质量百分比添加 0.5% 的茶多酚, 转入 100 °C 水浴锅中糊化 30 min, 置于 4 °C 回生 24 h 后冻干制粉。

(5) 全粉 LRWP-II-III: 藕浆置于 100 °C 水浴锅中糊化 30 min, 冷却至 60 °C, 加入 0.2% 的普鲁兰酶, 60 °C 下酶解 4 h 后沸水灭酶 10 min, 置于 4 °C 回生 24 h 后冻干制粉。

(6) 全粉 LRWP-I-II-III: 藕浆置于 100 °C 水浴锅中糊化 30 min, 冷却至 60 °C, 加入 0.2% 的普鲁兰酶, 60 °C 下酶解 4 h 后沸水灭酶 10 min, 灭酶后冷却至 50 °C, 加入 0.5 wt.% 的茶多酚后糊化 30 min, 置于 4 °C 回生 24 h 后冷冻干燥制粉。

1.3.2 SEM观测

观察全粉的微观结构, 将适量的全粉黏在导电胶带上进行镀金处理。

1.3.3 XRD分析

参照 Han 等^[9]的方法进行分析: X-射线发生器管压: 40 kV, 电流: 40 mA, 发射狭缝: 0.25 nm, 铜 K α 射线, 扫描速度: 2°/s (连续扫描), 扫描角度: 2 θ =5°~45°。

1.3.4 DSC分析

参考 Han 等^[9]的方法, 并稍作修改, 在铝制坩埚中称取 3 mg 全粉, 加入 10 μ L 去离子水(加盖密封), 室温平衡 24 h。扫描条件: N₂, 升温速率: 10 °C/min, 测定范围: 30~120 °C。

1.3.5 糊化特性分析

方法同许之麟等^[10], 测定样粉的糊化性质。

1.3.6 凝胶质构特性分析

方法同许之麟等^[10], 测定糊样的凝胶性质。

1.3.7 体外消化特性分析

体外模拟消化参考 Kim 等^[11]的方法, 并稍作修改。在 15 mL 试管中称取 100 mg 样品, 加入人工唾液 10 mL (充分混匀), 37 °C 振荡消化 10 min。模拟口腔消化后, 于 4 °C 离心 (10 000 r/min) 15 min 分离样液。沉淀物中加入 10 mL 人工胃液 (充分混匀), 37 °C 振荡消化 2 h, 4 °C 离心分离胃消化样液。而沉淀物继续加入 10 mL 人工肠液 (充分混匀), 37 °C 振荡消化 1.5 h, 4 °C 离心分离肠消化样液。测定三种消化样液中的还原糖含量。

1.3.8 淀粉含量及组成分析

采用总淀粉测定试剂盒, 按说明书方法检测样品(干重)中总淀粉含量(mg/g)。全粉中淀粉的体外消化曲线参考樊律廷等^[8]的方法测定: 10 mL 试管中称取 25 mg 样粉, 加入 5 mL 混酶溶液(α -胰淀粉酶 290 U 与淀粉葡萄糖苷酶 30 U), 充分混匀, 37 °C 振荡消化; 分别在酶解 0、10、20、40、60、80、100、120 和 180 min 时, 吸取 0.5 mL 上清液于离心管中, 加 4 mL 无水乙醇并离心 (5 000 r/min, 10 min); 采用 D-葡萄糖检测试剂盒测定上清液中的葡萄糖含量, 绘制成淀粉消化曲线图。按以下公式计算快消化淀粉 (Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉 (Slowly Digestible Starch, SDS)、抗性淀粉 (Resistant Starch, RS) 的含量:

$$B_1 = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{D} \times 100\% \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{D} \times 100\% \quad (2)$$

$$B_3 = \frac{D - G_{120} - G_{20}}{D} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

B_1 ——快消化淀粉 (RDS) 的含量, %;

B_2 ——慢消化淀粉 (SDS) 的含量, %;

B_3 ——抗性淀粉 (RS) 的含量, %;

G_0 、 G_{20} 和 G_{120} ——分别代表样品酶解 0、20 和 120 min 时释放的葡萄糖含量, mg;

D ——指样品中总淀粉的含量 (TS), mg;

0.9——由葡萄糖转化为葡萄糖酐的摩尔质量比。

1.4 数据处理

实验数据均以“平均值 \pm 标准偏差”表示

($n=3$)。组间数据在 0.05 水平的显著性差异采用 SPSS 19.0 软件 Duncan 分析。

2 结果与分析

2.1 加工工艺对莲藕全粉的微观形貌影响

加工方式的差异可导致样品淀粉颗粒的形貌不同,使其理化性质发生改变。在 SEM 图下观察到不同工艺制备莲藕全粉的微观结构差异(图 1): LRWP 和 LRWP-I 中淀粉颗粒呈短棒状或椭圆状,形状大小不一且较为分散,前者表面相对光滑;高温糊化-冷却回生处理导致 LRWP-II 中的淀粉颗粒结构破碎,呈现纹理规律的片状;LRWP-I-II 的淀粉颗粒表面粗糙且向内凹陷呈现出沟壑,片状组织分散在周边;LRWP-II-III 和 LRWP-I-II-III 的微观形貌与 LRWP-I-II 类似,但表面更加粗糙,呈现纤维状不规则纹理,且各碎片之间相互发生聚集。结果表明,莲藕全粉中淀粉颗粒经加热或脱支酶酶解后,直链淀粉大量溶出并参与分子之间的重新缔合,从而导致形貌由颗粒转变成片层或无规则聚集状^[12]。添加茶多酚混合后,淀粉颗粒表面的些许碎屑可能是淀粉与茶多酚的相互作用导致^[13]。

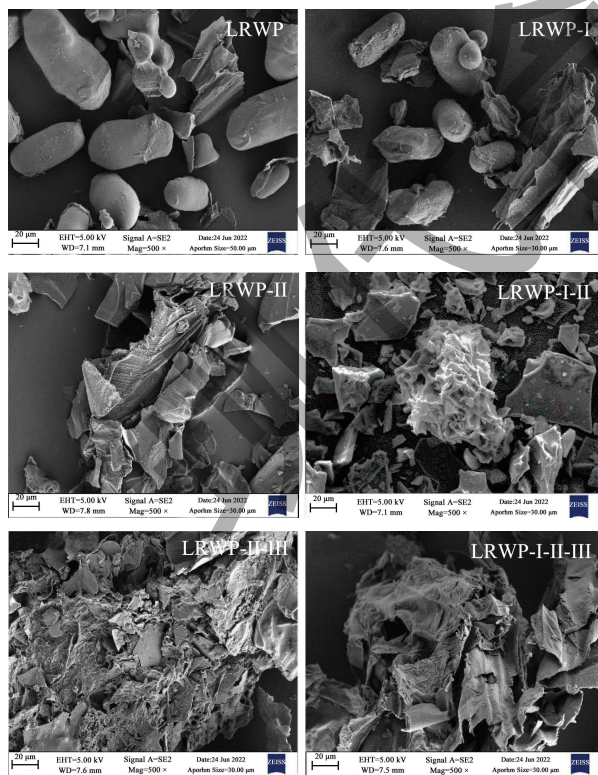


图 1 不同加工工艺制备莲藕全粉的 SEM 图

Fig.1 SEM images of lotus root whole powders prepared by different processing technologies

2.2 加工工艺对莲藕全粉的晶体结构影响

采用 XRD 测定不同加工工艺制备莲藕全粉的晶体结构特征(图 2)。LRWP 和 LRWP-I 在 15.0°、17.0° 和 23.0° 处出现衍射峰,属于 A 型晶体结构,但全粉受高温糊化-回生处理后晶体类型发生改变,LRWP-II 在 17.0° 和 22.0° 处的衍射峰属于 B 型晶体结构^[14]。加热可破坏淀粉晶体结构,导致衍射峰强度的减弱或淀粉链中分子内和分子间氢键断裂,进而改变晶型^[15]。LRWP-I-II 亦是如此,但减弱的特征衍射峰表明其结晶度有所下降。樊律廷等^[8]研究表明,经多酚处理的藕粉不会出现新的衍射峰,因为多酚与淀粉是通过非共价作用相结合的,且多酚可通过抑制淀粉回生降低其结晶度。经普鲁兰酶处理的 LRWP-II-III 和 LRWP-I-II-III 基本呈现出弥散的衍射图样,整体为无定型,推测可能是普鲁兰酶酶解脱支导致支撑作用减弱,因此从有序的结晶型变为无序的无定型^[16]。

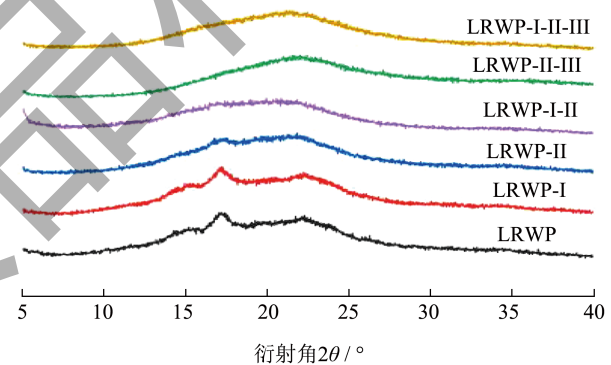


图 2 不同加工工艺制备莲藕全粉的 XRD 图

Fig.2 XRD patterns of lotus root whole powders prepared by different processing technologies

2.3 加工工艺对莲藕全粉的热力学特性影响

起始温度代表熔化淀粉颗粒中最弱的微晶所需温度,终止温度与之相反,表示熔化最完整微晶所需温度,焓变值则表示破坏淀粉结晶区域所需能量^[17]。由表 1 可知,相对于全粉 LRWP 的糊化温度(62.55 °C)与焓变值(27.22 J/g),LRWP-I 的糊化温度(59.41 °C)与焓变值(7.63 J/g)均降低,与 Guo 等^[18]的研究结果相似,糊化过程中多酚与淀粉相互作用,破坏淀粉的晶体结构,故只需较低的能量就可以膨胀糊化。扫描电镜结果表明全粉 LRWP-II 和 LRWP-I-II 中淀粉的晶体结构发生改变,导致糊化温度与焓变值下降;LRWP-II-III 的起始温度与峰值温度相比 LRWP 略微增加,但焓变

值显著降低 ($P < 0.05$), 由 27.22 J/g 降为 6.42 J/g; 全粉 LRWP- I - II - III 的焓变值最低为 4.14 J/g。可能是酶处理后产生更紧密的晶型结构, 直链分子间结合力较强, 使其加热解聚和熔融时需要更高的温度; 而酶解后淀粉颗粒结构变得疏松易崩解, 晶体易解构, 继而焓变值降低^[16]。

2.4 加工工艺对莲藕全粉的糊化特性影响

采用 RVA 测定不同莲藕全粉的糊化特性, 其中: 衰减可反映淀粉糊的热稳定性, 衰减越小, 则淀粉糊的热稳定性越好; 回生值则反映淀粉的稳定性和老化速度, 回生值越大, 淀粉越易老化^[19]。表 2 结果表明, 相对于 LRWP 的衰减 (2 960 cP) 和回生值 (343 cP), LRWP- I 的衰减 (3 322 cP) 增加且回生值 (285 cP) 降低, 说明添加茶多酚处理会降低全粉的热稳定性, 但能有效抑制其老化。谢亚敏等^[20]研究表明, 淀粉中的羟基会与茶多酚中

的羟基结合形成复合物, 阻碍淀粉分子间的相互作用, 产生抑制回生的特性。相较之下, LRWP- II 和 LRWP- I - II 的峰值黏度、衰减均显著降低 ($P < 0.05$), 可能是由于蛋白质及膳食纤维等内源性物质不同程度限制水分子进入淀粉分子, 从而影响其糊化特性^[21]。LRWP- II - III 的峰值黏度及衰减最低, 分别为 43 cP 和 5 cP, 此结果与莫琰等^[16]采用普鲁兰酶酶解葛根淀粉的峰值黏度及衰减降低趋势一致, 可能是由于峰值黏度与直链淀粉含量呈负相关, 而在加热糊化和酶解过程中均有大量直链淀粉溶出, 与支链淀粉分子纠缠限制淀粉颗粒在糊化过程中的膨胀, 从而导致峰值黏度下降以及糊化温度的升高, 这与热力学性质结果一致; 加热糊化处理后分子间相互作用会增强, 同时热稳定性较好的小分子直链淀粉大量溶出, 降低莲藕全粉的衰减^[22]。

表 1 不同加工工艺制备莲藕全粉的热力学特性

Table 1 Thermodynamic characteristics of lotus root whole powders prepared by different processing technologies

莲藕全粉	起始温度/°C	峰值温度/°C	终止温度/°C	焓变值/(J/g)
LRWP	62.55 ± 2.13 ^{bc}	66.27 ± 3.06 ^b	73.00 ± 4.00 ^b	27.22 ± 1.9 ^{7d}
LRWP- I	59.41 ± 3.09 ^{ab}	65.46 ± 1.91 ^b	68.46 ± 3.30 ^{ab}	7.63 ± 0.6 ^{8b}
LRWP- II	57.08 ± 3.80 ^a	64.58 ± 2.09 ^{ab}	69.66 ± 1.21 ^b	9.12 ± 1.99 ^{bc}
LRWP- I - II	58.88 ± 0.29 ^{ab}	66.10 ± 1.54 ^b	70.59 ± 2.07 ^{ab}	11.58 ± 1.06 ^c
LRWP- II - III	65.72 ± 1.93 ^c	68.36 ± 2.34 ^b	69.29 ± 2.75 ^{ab}	6.42 ± 2.38 ^{ab}
LRWP- I - II - III	56.81 ± 1.14 ^a	60.99 ± 3.02 ^a	66.10 ± 1.79 ^a	4.14 ± 1.02 ^a

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$); LRWP: 冷冻干燥的全藕粉, LRWP- I: 添加茶多酚后冷冻干燥的全藕粉, LRWP- II: 糊化-回生处理后冷冻干燥的全藕粉, LRWP- I - II: 添加茶多酚-糊化-回生处理后冷冻干燥的全藕粉, LRWP- II - III: 糊化-酶解-回生后冷冻干燥的全藕粉, LRWP- I - II - III: 糊化-酶解-添加茶多酚-糊化-回生处理后冷冻干燥的全藕粉。下同。

表 2 不同加工工艺制备莲藕全粉的糊化特性

Table 2 Total paste characteristics of lotus root whole powders prepared by different processing technologies

莲藕全粉	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	衰减/cP	最终黏度/cP	回生值/cP
LRWP	4 282.00 ± 42.00 ^d	1 322.00 ± 21.00 ^c	2 960.00 ± 26.0 ^{0e}	1 665.00 ± 24.00 ^e	343.00 ± 22.0 ^{0c}
LRWP- I	4 596.00 ± 53.00 ^c	1 274.00 ± 19.00 ^d	3 322.00 ± 24.0 ^{0f}	1 559.00 ± 41.00 ^d	285.00 ± 32.00 ^c
LRWP- II	1 877.00 ± 54.00 ^b	842.00 ± 17.00 ^b	1 035.00 ± 46.00 ^b	1 031.00 ± 15.00 ^b	189.00 ± 30.00 ^b
LRWP- I - II	2 228.00 ± 33.00 ^c	1 265.00 ± 40.00 ^d	963.00 ± 19.00 ^d	2 309.00 ± 30.00 ^f	1 044.00 ± 66.00 ^d
LRWP- II - III	43.00 ± 3.00 ^a	38.00 ± 1.00 ^a	5.00 ± 2.00 ^a	56.00 ± 2.00 ^a	18.00 ± 2.00 ^a
LRWP- I - II - III	2 161.00 ± 12.00 ^c	971.00 ± 17.00 ^c	1 190.00 ± 32.00 ^c	1 152.00 ± 20.00 ^e	181.00 ± 17.00 ^b

表 3 不同加工工艺制备莲藕全粉的凝胶特性

Table 3 Gel characteristics of lotus root whole powder prepared by different processing technologies

莲藕全粉	硬度/g	弹性/mm	胶着性/g	咀嚼性/g
LRWP	37.60 ± 2.10 ^d	0.67 ± 0.12 ^d	18.66 ± 1.85 ^c	12.54 ± 1.21 ^c
LRWP- I	21.70 ± 2.80 ^c	0.63 ± 0.08 ^{cd}	10.41 ± 1.52 ^b	6.61 ± 1.53 ^b
LRWP- II	89.70 ± 7.10 ^e	0.31 ± 0.03 ^{ab}	76.18 ± 4.20 ^d	23.8 ± 2.30 ^d
LRWP- I - II	93.10 ± 4.67 ^e	0.58 ± 0.04 ^{cd}	81.90 ± 7.06 ^c	22.98 ± 2.82 ^d
LRWP- II - III	4.05 ± 0.74 ^a	0.23 ± 0.05 ^a	1.73 ± 0.41 ^a	0.26 ± 0.08 ^a
LRWP- I - II - III	13.20 ± 1.30 ^b	0.45 ± 0.22 ^{bc}	6.19 ± 0.69 ^{ab}	2.76 ± 0.63 ^a

2.5 加工工艺对莲藕全粉的凝胶特性影响

淀粉分子糊化后，会形成具有一定弹性和强度的三维网状结构，而糊化温度、直链/支链淀粉含量和淀粉链长短分布及其交互作用等均会影响这种网状结构^[12]。如表 3 所示，加工工艺对全粉的凝胶特性有明显影响。硬度与咀嚼度越大，淀粉类食品品质往往越差^[20]。相比 LRWP，LRWP- I 的硬度、弹性、胶着性和咀嚼性均减少，这是因为直链淀粉会与多酚中的羟基结合，破坏网状结构形成，淀粉结晶过程被抑制，回生值降低，从而导致全粉的硬度和弹性降低^[20]。LRWP- II 和 LRWP- I - II 的硬度、胶着性和咀嚼性显著增加 ($P < 0.05$)，推测是由于其在高温糊化后，淀粉分子间的作用力增大，形成不易破坏的凝胶^[23]。LRWP- II - III 和 LRWP- I - II - III 的凝胶特性均显著降低 ($P < 0.05$)，推测其可能是由于在酶解处理前糊化反应完全，淀粉链的重结晶受到阻碍，无法形成强劲的网络结构，凝胶硬度显著降低^[12]。

2.6 加工工艺对莲藕全粉的体外消化特性影响

不同加工工艺制备莲藕全粉在模拟消化过程中的还原糖释放如图 3 所示：模拟口腔消化的还原糖释放量范围是 0.05~4.56 mg/g，依据释放量高低排序为：LRWP- I ≈ LRWP- I - II < LRWP ≈ LRWP- II < LRWP- I - II - III < LRWP- II - III；胃室消化液中的释放量范围是 2.89~4.61 mg/g，依据释放量高低排序为：LRWP- I ≈ LRWP < LRWP- II < LRWP- II - III < LRWP- I - II - III < LRWP- I - II；肠室消化液中的释放量范围是 0.39~0.99 mg/g，释放量高低排序为：LRWP=LRWP- II < LRWP- I < LRWP- II - III < LRWP- I - II - III < LRWP- I - II。LRWP，LRWP- I，LRWP- II 和 LRWP- I - II 样品中的还原糖主要在模拟胃室消化液中释放，而 RWP- II - III 和

LRWP- I - II - III 的还原糖主要在模拟口腔和胃液中释放。有文献报道多糖经胃液消化后的分子量降低，解离出还原糖，推测莲藕全粉在胃液消化环境中释放大量还原糖，可能与酸性条件下的多糖糖苷键断裂有关^[24]。此外，LRWP- II - III 及 LRWP- I - II - III 可能是由于其经过普鲁兰酶处理，生成小分子还原糖释放于消化液中，更易被分解，因此在口腔及胃中释放量远高于小肠。在模拟口腔消化中，经茶多酚处理样品中的还原糖释放量低于未经处理的样品，可能是因为茶多酚可降低、抑制 α -淀粉酶及淀粉酶的活性^[25]，并且对肠道内碳水化合物的消化吸收有抑制作用，继而可调节葡萄糖的释放^[26]。经高温糊化的全粉，各腔室中还原糖释放量增加，其原因可能是全粉内部水分子在高温的作用下破坏了抗性淀粉紧密结构，使得大部分抗性淀粉转化成可消化淀粉^[24]。经普鲁兰酶处理后的样品，各个腔室中还原糖释放量增加，可能是由于普鲁兰酶在脱支过程中也水解了一些多聚糖中的 α -1,4-糖苷键，继而生成葡萄糖等小分子糖^[27]。

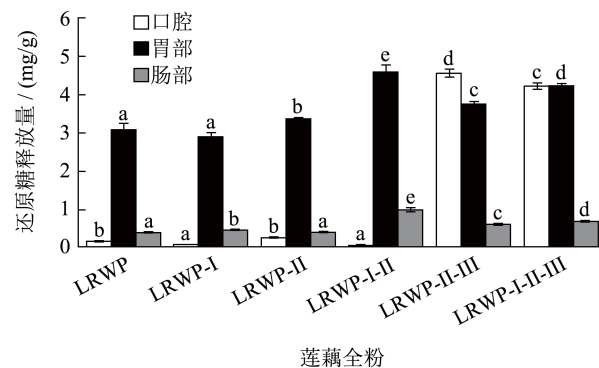


图 3 不同加工工艺制备莲藕全粉的体外消化特性

Fig.3 In vitro digestive characteristics of lotus root whole powder prepared by different processing technologies

注：图中小写字母代表显著差异， $P < 0.05$ 。

图4为不同加工工艺制备莲藕全粉的淀粉消化速率曲线,其中,LRWP和LRWP-I的淀粉消化速率缓慢且趋于平缓,淀粉消化率在3h内介于0%~15%之间;相对于LRWP,LRWP-I的抗性淀粉含量更高,淀粉消化率更低,这是因为茶多酚对淀粉消化酶的活性有明显的抑制作用^[23],可延缓碳水化合物的分解,导致葡萄糖的产生速率降低^[28]。LRWP-I-II和LRWP-II的淀粉消化速率分别在0~60 min和0~100 min内迅速升高,随后缓慢达到平缓状态,淀粉消化率在3h内介于0%~55%之间,这是因为全粉在加热过程中,淀粉颗粒破裂使其表面积增大,导致淀粉链对酶的敏感性增加,因此经糊化处理后的样品淀粉消化速率均增加^[13]。LRWP-II-III和LRWP-I-II-III消化初始的还原糖含量较高,随后的还原糖释放趋于平缓。推测普鲁兰酶在脱支过程中,不仅作用于 α -1,6-糖苷键也作用于多聚糖中的 α -1,4-糖苷键,继而生成大量小分子糖,如葡萄糖等^[27]。

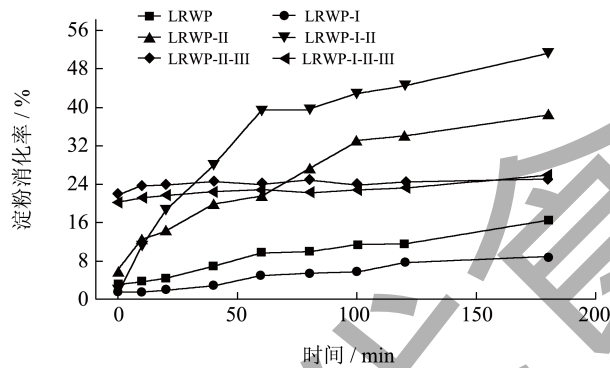


图4 不同加工工艺制备莲藕全粉的消化特性曲线

Fig.4 Digestive characteristics of lotus root whole powder prepared by different processing technologies

不同加工工艺制备全粉的RDS、SDS和RS含量如表4所示,LRWP中的RDS、SDS和RS分别为3.61%、18.52%和77.88%。相比于LRWP,LRWP-I的RDS和SDS含量降低,RS含量显著增加($P < 0.05$),分别为2.09%、5.26%和92.65%,与Lin等^[29]研究结果接近,其测得莲藕淀粉中RDS、SDS与RS的含量分别为1.20%、12.80%和86.00%。张智涵^[30]的研究与本文结果相似,茶多酚可一定程度上抑制淀粉的酶解,其原因可能是茶多酚中的羟基与消化酶之间形成氢键,从而抑制淀粉的消化率,同时多酚可能与直链淀粉产生相互作用形成新的网络结构,也会降低淀粉的消化率^[31]。经高温糊化-冷却回生处理的LRWP-II和

LRWP-I-II,其RDS和SDS含量显著增加,RS含量显著降低($P < 0.05$),主要因为淀粉在高温下发生糊化,破坏原有的淀粉结构,使其易被消化酶酶解^[32],此外,LRWP-I-II的抗性淀粉含量低于LRWP-II,分别为5.62%和13.35%。一方面,高温糊化处理可能导致多酚结构的变化或影响多酚与淀粉间的相互作用,因此茶多酚的添加未能有效增加莲藕全粉中的抗性淀粉含量^[33]。另一方面,与LRWP-II相比,LRWP-I-II中的淀粉颗粒结构表面更粗糙,可能使得淀粉更易于与淀粉酶接触,从而导致更高的淀粉消化率和较低的抗性淀粉含量^[34]。相较LRWP,LRWP-II-III的RDS含量明显增加,SDS和RS含量略微下降;LRWP-I-II-III的SDS含量显著增加($P < 0.05$),RS含量显著降低。王成祥等^[35]研究表明,黑豆抗性淀粉经过普鲁兰酶处理后,含量显著增加,且随着酶解时间增加,含量先增加后减少。与本实验结果不符,可能是由于普鲁兰酶处理过度,产生的短直链淀粉过多,不利于抗性淀粉的生成^[36]。

表4 不同加工工艺制备莲藕全粉的淀粉消化特性(%)

Table 4 Starch digestion characteristics of lotus root whole powder prepared by different processing technologies

莲藕全粉	RDS	SDS	RS
LRWP	3.61 ± 1.18 ^b	18.52 ± 2.48 ^c	77.88 ± 3.74 ^d
LRWP-I	2.09 ± 0.77 ^a	5.26 ± 2.12 ^a	92.65 ± 1.04 ^c
LRWP-II	25.85 ± 5.75 ^d	68.8 ± 7.41 ^f	13.35 ± 2.70 ^b
LRWP-I-II	38.00 ± 3.55 ^e	56.38 ± 6.80 ^c	5.62 ± 3.85 ^a
LRWP-II-III	16.13 ± 4.67 ^c	13.27 ± 0.01 ^b	70.59 ± 5.83 ^d
LRWP-I-II-III	3.75 ± 0.01 ^b	48.68 ± 2.12 ^d	47.57 ± 1.59 ^c

3 结论

本试验采用不同加工方法制备莲藕全粉,分析对比不同加工工艺对莲藕全粉微观形貌、晶体结构、热力学特征、糊化特征、凝胶特性以及体外消化特征的影响。结果表明:LRWP-I相比于LRWP,其糊化温度及焓值均有所降低,峰值黏度与衰减值增加,硬度与胶着性降低,其中RS含量由77.88%显著提高至92.65%,而RDS及SDS含量显著减少;经高温糊化-冷却回生处理后的全粉(LRWP-II、LRWP-I-II),淀粉颗粒形态与晶体类型发生变化,从有序变为无序的状态,淀粉的消化速率上升;LRWP-II相比于LRWP,其糊化温度及焓值均减少,硬度增加,峰值黏度、衰减值和回

生值均减小, RDS 和 SDS 含量显著增加, RS 含量显著减少。经普鲁兰酶处理的全粉(LRWP- II - III、LRWP- I - II - III), 淀粉颗粒形态及晶体类型均发生显著变化, 但破裂的淀粉碎片相对于高温糊化-冷却回生的更加聚集, 晶体转为无定型; 相比于 LRWP- II, LRWP- II - III 糊化温度升高且焓变值降低, 黏度、硬度及回生值均为最低, RDS 和 SDS 含量减少, RS 含量增加; 但与 LRWP 相比, 经普鲁兰酶处理后的样品中 RS 含量均有所降低, 此与大多数研究不符, 推测可能与普鲁兰酶处理全粉的用量与时间相关, 未来可以进行处理条件的优化研究。综上所述, 在以上加工方式中, 仅添加茶多酚处理更易提高抗性淀粉的含量, LRWP- I 有最高的抗性淀粉含量为 92.65%, 可为莲藕全粉的改性研究提供一定参考。

参考文献

- [1] 孙其然,刘培,李会伟,等.不同产地莲藕下脚料中主要营养成分的分析与评价[J].食品工业科技,2018,39(6):291-297.
- [2] 顾晓敏,杨海龙,韩延超,等.不同品种莲藕淀粉与全粉颗粒形态及品质特性分析[J].食品工业科技,2021,42(23):95-101.
- [3] 刘友锦.高抗性淀粉速溶全藕粉加工工艺的研究[D].福州:福建农林大学,2018.
- [4] 尉迟邈,吴建美,高璐等.马铃薯抗性淀粉对高脂血症大鼠的降血糖血脂作用[J].现代食品科技,2022,38(3):8-14.
- [5] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(2): S33-50.
- [6] PENG H, QIAN L M, FU Z J, et al.Using a novel hyperthermophilic amylopullulanase to simplify resistant starch preparation from rice starches [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 80: 104429-104429.
- [7] XU J S, YANG H Y, ZHANG C Y, et al. Optimised preparation and characterisation of lotus root starch oxidised with sodium hypochlorite (NaOCl) using response surface methodology [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2022, 1: 40.
- [8] 樊律廷,叶沁,卢文静,等.多酚复合普鲁兰酶改性藕粉的慢消化特性及结构表征[J].中国食品学报,2021,21(12):270-276.
- [9] HAN X Q, ZHANG M W, ZHANG R F, et al. Physicochemical interactions between rice starch and different polyphenols and structural characterization of their complexes [J]. Lwt, 2020, 125: 109227.
- [10] 许之麟,吴瑾瑾,易阳,等.莲藕全粉冲调产品的配方优化及品质评价[J].武汉轻工大学学报,2023,42(5):90-97,113.
- [11] KIM I D, PARK Y S, DHUNGANA S K, et al. Physicochemical and antioxidant properties of garlic (*A. sativum*) prepared by different heat treatment conditions [J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2019, 51(5): 452-458.
- [12] 雷鸣.部分糊化及酶脱支处理对淀粉物化特性影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2020.
- [13] 赵蓓蓓.莲子淀粉-茶多酚复合物的制备及理化特性研究[D].福州:福建农林大学,2019.
- [14] DU J, YANG Z, XU X, et al. Effects of tea polyphenols on the structural and physicochemical properties of high-hydrostatic-pressure-gelatinized rice starch [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91: 26-262.
- [15] 叶蓉.酶改性小麦淀粉的慢消化稳定性研究及其应用[D].无锡:江南大学,2019.
- [16] 莫琰,杨尚威,赵灿,等.普鲁兰酶酶解对葛根淀粉理化特性的影响[J].食品工业科技,2022,43(13):79-85.
- [17] ZHANG K Y, ZHAO D, GUO D X, et al. Physicochemical and digestive properties of A- and B-type granules isolated from wheat starch as affected by microwave-ultrasound and toughening treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 83: 481-489.
- [18] GUO Z B, ZHAO B B, CHEN J, et al. Insight into the characterization and digestion of lotus seed starch-tea polyphenol complexes prepared under high hydrostatic pressure [J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124992.
- [19] BOONKOR P, SAGIS L M C, LUMDUBWONG N. Pasting and rheological properties of starch paste/Gels in a sugar-acid system [J]. Foods, 2022, 11(24): 4060.
- [20] 谢亚敏,许飞,陈洁,等.多酚与淀粉相互作用对板栗淀粉特性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(5):30-38.
- [21] 高品涵,薛薇,李婷,等.内源性物质对不同品种大米淀粉消化性的影响[J].中国粮油学报,2024,39(3):33-41.
- [22] MA Z, BOYE J I. Research advances on structural characterization of resistant starch and its structure-physiological function relationship: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(7): 1059-1083.
- [23] MUDGIL D, BARAK S, KHATKAR B S. Optimization of textural properties of noodles with soluble fiber, dough mixing time and different water levels [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 104-110.
- [24] 刘恋.条斑紫菜中多糖的溶出动力学、模拟消化及生物活性[D].镇江:江苏大学,2017.
- [25] SANDHU K, SINGH N. Some properties of corn starches II: physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties [J]. Food Chemistry, 2007, 101(4): 1499-1507.

- [26] YANG X P, KONG F B. Effects of tea polyphenols and different teas on pancreatic α -amylase activity *in vitro* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 232-238.
- [27] HANHINEVA K, TORRONEN R, BONDIA-PONS I, et al. Impact of dietary polyphenols on carbohydrate metabolism [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2010, 11: 1365-1402.
- [28] MATZKE J, HERRMANN A, SCHNEIDER E, et al. Gene cloning, nucleotide sequence and biochemical properties of a cytoplasmic cyclomaltodextrinase (neopullulanase) from *Alicyclobacillus acidocaldarius*, reclassification of a group of enzymes [J]. Fems Microbiol Lett, 2000, 183(1): 55-61.
- [29] HE Q, LV Y P, YAO K. Effects of tea polyphenols on the activities of α -amylase, pepsin, trypsin and lipase [J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 1178-1182.
- [30] LIN L, HUANG J, ZHAO L, et al. Effect of granule size on the properties of lotus rhizome C-type starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 134: 448-457.
- [31] 张智涵. 淀粉与茶多酚共研磨对淀粉理化性质和消化性的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [32] 张学倩. 山药改性淀粉的制备、表征及肠道菌群调节作用研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [33] LI H, WANG R R, LIU J, et al. Effects of heat-moisture and acid treatments on the structural, physicochemical, and *in vitro* digestibility properties of lily starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 956-968.
- [34] 王杰, 何燕, 李洁, 等. 多酚对莲藕淀粉和玉米淀粉理化和消化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(6): 93-102.
- [35] 王伟良. 不同处理对荔浦芋淀粉加工特性和体外消化性能的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [36] 王成祥, 饶欢, 张美娜, 等. 热-酶解法制备黑豆抗性淀粉及其理化性质[J]. 食品工业, 2021, 42(8): 69-72.
- [37] 张钟, 夏丹丹, 王丽. 酸解-微波法制备RS3型玉米抗性淀粉工艺参数优化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(12): 282-286.