

热处理对莲藕全粉加工品质的影响

吴瑾瑾¹, 吴昊怡¹, 易阳^{1*}, 张燕鹏¹, 王宏勋², 孙莹¹

(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 武汉 430023

² 武汉轻工大学生命科学与技术学院 武汉 430023)

摘要 为探究莲藕原料及其热处理对全粉加工品质的影响,选择不同品种及不同生长期的莲藕,考察 100 ℃和 120 ℃蒸汽加热对产品色泽、糖类物质含量、消化特性、热力学性质和糊化特性的影响。结果表明,不同品种及不同生长期莲藕制得的全粉的营养组成和消化特性有所差异,经热处理的全粉品质变化主要涉及:总淀粉含量减少 2.48%~18.41%,其中快消化淀粉和慢消化淀粉的占比分别增加 19.06%~34.56%和 28.66%~57.70%,而抗性淀粉含量占比减少 48.56%~87.21%;糖类物质消化释放规律有所改变,还原糖释放总量增加 14.05%~93.78%;糊化的起始、峰值和终止温度均显著降低($P<0.05$),且高压加热全粉的谷值黏度和最终黏度亦显著下降($P<0.05$)。热处理显著改变莲藕全粉的营养特征和冲调特性,研究结果可为其加工品质调控提供参考。

关键词 莲藕; 热处理; 全粉加工; 品质特征; 消化特性

文章编号 1009-7848(2024)03-0172-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.03.017

莲藕是莲科(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)植物的可食根茎,作为一种水生经济作物在我国长江中下游流域广泛种植^[1]。其中,湖北是莲藕生产第一大省,种植面积达 10.56 万 hm^2 ,产量达 217.2 万 t ^[2]。莲藕的风味和口感独特,富含碳水化合物、维生素、矿物质等营养物质,据中医药典籍记载具有祛瘀清热、生津止呕、止渴、健脾益气 and 养血生肌等功效^[3]。目前,我国莲藕以鲜食和烹饪为主,少量加工为藕粉类、藕汁类、保鲜类、卤制类产品^[4]。相关产品的附加值不高,未能充分发挥莲藕资源的特色和优势^[5],不符合“绿色”发展的理念。例如,藕粉的传统和现代加工工艺均产生大量废水和藕渣废弃物,产品的资源利用率低且营养损失严重。

莲藕全粉,又称全藕粉,由新鲜莲藕经清洗、去皮、干燥、粉碎等工艺加工,保留了几乎全部的营养物质,其加工工艺相比于传统的藕淀粉加工更简易,耗水量更少,资源利用率更高^[6]。莲藕全粉的产品形式和利用(食用)方式与其淀粉高度相

似,作为替代性的绿色产品开发具有良好前景。目前,全藕粉的研发主要关注护色、干燥和速溶的工艺设计与优化^[7-8],而原料对产品品质的影响则鲜见报道。

对于不同品种及不同生长期的莲藕,其营养成分的含量、组成和功能等可能存在显著差异^[9-12]。热处理是莲藕烹饪和加工的传统方法,对其细胞壁结构、基本营养组分、理化特性、消化特性、质构和风味等显著影响^[12-13]。研究莲藕原料及其热处理方式与全粉加工品质的关联,对产品品质提升有重要意义。

针对不同品种以及不同生长期的 6 种莲藕原料,采用常压蒸汽(100 ℃)和高压蒸汽(120 ℃)进行预处理,结合色泽、糖类物质含量、淀粉消化特性和热力学性质等综合分析热处理对全粉加工品质的影响,旨在为藕全粉的加工品质调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜莲藕由武汉市金水祺良农副产品有限公司提供,包括生长期 6 个月的鄂莲 5 号(EL5-S6)、鄂莲 6 号(EL6-S6)和武植 2 号(WZ2-S6),以及生长期 9 个月的鄂莲 5 号(EL5-S9)、花奇莲(HQ-S9)和武植 2 号(WZ2-S9)。

人工唾液、胃液和结肠液,北京雷根生物技术

收稿日期: 2023-03-15

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

第一作者: 吴瑾瑾,女,硕士生

通信作者: 易阳 E-mail: yiy86@whpu.edu.cn

有限公司; α -淀粉酶(猪胰腺)和淀粉葡萄糖苷酶原液(AMG),上海源叶生物科技有限公司;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;其它试剂:次氯酸钾钠、氢氧化钠、浓硫酸、无水乙醇、3,5-二硝基水杨酸、酒石酸钾钠、醋酸钠等,均为国药分析试剂。

1.2 仪器与设备

A360型紫外-可见分光光度计,翱艺仪器(上海)有限公司;SCIENTZ-12N/A冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;XQ200型多功能高速粉碎机,上海广沙工贸有限公司;Q2000型差示扫描量热仪,美国TA公司;JZ-300色差仪,北京时代瑞光科技有限公司;Super4快速黏度仪,瑞典波通公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 新鲜莲藕洗净削皮后,每段节藕切成3等份,且各取1份合为1组,即将藕段分为3组。其中一组经切片后置于 -20°C 预冻,采用真空($\sim 35\text{ Pa}$)冷冻干燥24 h。另两组藕段分别置于常压蒸锅(100°C ,40 min)和高压灭菌锅(120°C ,10 min)中蒸汽加热,经冷却切片和 -20°C 预冻后冷冻干燥。将冷冻干燥后的藕片用超微粉碎机直接制成粉末,分装后转入干燥器内室温避光保存。

1.3.2 水分含量的测定 参照食品安全国家标准(GB 5009.3-2016)中直接干燥法方法测定样品的水分含量^[14],平行测定3次取平均值。

1.3.3 色泽分析 通过手持色差仪测定莲藕全粉的色泽,其中 L^* 表示亮度, a^* 表示红绿值, b^* 表示黄蓝值。在测定前使用白版进行校准,平行测定5次取平均值。

1.3.4 碳水化合物含量的测定

1) 可溶性糖的提取 精确称取(1.00 ± 0.01)g样品置于锥形瓶中,加入80 mL去离子水,硅胶塞密封后放入沸水浴中,在磁力搅拌下浸提30 min。浸提结束后过滤,残渣用少量沸水洗涤并过滤,合并滤液。待滤液冷却至室温后,用去离子水定容至100 mL,用于可溶性糖的分析检测。

2) 可溶性总糖含量的测定 参考文献蒽酮-硫酸法^[15],测定样液中可溶性总糖浓度(葡萄糖质量浓度,mg/mL),并计算样品(干质量)中可溶性总

糖含量(%)。

3) 还原糖含量的测定 参考文献DNS法^[16],测定样液中还原糖浓度(葡萄糖质量浓度,mg/mL),并计算样品(干质量)中还原糖含量(%)。

4) 总淀粉含量的测定 采用总淀粉测定试剂盒,按说明书方法检测样品(干质量)中总淀粉含量(%)。

5) 抗性淀粉含量的测定 参照AOAC方法测定样品中抗性淀粉(resistant starch, RS')含量^[17]。称取藕粉(100 ± 5)mg于15 mL离心管中,加入4 mL α -胰液淀粉酶悬浮液涡旋混匀,水平置于 37°C 水浴摇床平行振荡16 h;酶解结束后用无水乙醇与50%的乙醇溶液反复洗脱。沉淀经2 mL KOH(2 mol/L)和0.1 mL AMG处理后,用DNS法测定还原糖质量浓度(mg/mL),按其0.9倍换算RS'浓度,并计算样品(干重)中RS'含量(%)。

1.3.5 热力学性质分析 参考Punia等^[18]的方法,采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)测定莲藕全粉的热力学性质。称取3 mg藕粉(≥ 80 目)于铝制坩埚中,加入10 mL去离子水后加盖密封,室温下平衡24 h。在充 N_2 条件下进行DSC扫描,升温速率为 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测定范围为 $20\sim 120^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.6 糊化特性分析 参考Liu等^[19]的方法测定莲藕全粉的糊化性质。称取3 g藕粉于快速黏度仪(Rapid visco analyzer, RVA)的专用铝罐中,加入25 mL去离子水。测定程序为: 50°C 运行2 min,以 $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率从 50°C 加热至 95°C ,在 95°C 下保温2.5 min,再以同样的速率降至 50°C 。测定过程中,前10 s内搅拌速率为960 r/min,之后搅拌速率为160 r/min。

1.3.7 消化特性分析 体外模拟消化参考文献[20]的方法,并稍作修改。取100 mg藕粉于15 mL试管中,加入10 mL人工唾液,充分混匀后置于 37°C 振荡消化10 min。模拟口腔消化结束后,于 4°C 离心($10\ 000\ \text{r}/\text{min}$)15 min分离口腔消化液。离心管中沉淀物加入10 mL人工胃液,充分混匀后置于 37°C 振荡消化2 h, 4°C 离心分离胃消化液。而沉淀物继续加入10 mL人工肠液,充分混匀后置于 37°C 振荡消化1.5 h, 4°C 离心分离肠消化

样液。测定3种消化样液中的还原糖含量。

莲藕全粉中淀粉的体外消化特性参考 Englyst 等^[21]的方法,取25 mg藕粉于10 mL试管中,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),充分混匀后置于37℃振荡消化,分别在水解0,20和120 min时取0.5 mL上清液于离心管中,加4 mL无水乙醇灭酶并离心(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。

样品中快消化淀粉 (rearily digestible starch, RDS)、慢消化淀粉 (slowly digestible, SDS)、RS使用以下公式进行计算:

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

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

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

式中: G_0 、 G_{20} 和 G_{120} 分别代表样品酶解0,20和120 min时释放的葡萄糖质量;TS是指样品中总淀粉的质量;0.9为由葡萄糖转化为葡萄糖酐的物质的量比。

1.4 数据处理

试验数据均以“平均值±标准偏差”表示。组间数据在0.05水平的显著性差异通过SPSS19.0软件采用Duncan(D)进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同莲藕全粉的色泽比较

色泽是评价食品品质的重要指标之一; L^* 值反映亮度,其值与样品亮度呈正相关; a^* 值表示偏红偏绿程度,正值越大,颜色越接近纯红色; b^* 值表示偏黄偏蓝程度,正值越大,颜色越接近纯黄色。由表1可知,不同品种及不同生长期莲藕加工全粉 L^* 、 a^* 和 b^* 的平均值分别为93.93,2.71和18.14,经常压加热后全粉 L^* 、 a^* 和 b^* 值无明显变化,而高压加热后的 L^* 和 b^* 值分别降低了9.01和5.03, a^* 值增加了1.69。结果说明,高压加热显著降低全粉的亮度和黄度。色素降解和褐变反应是果蔬热处理过程中颜色变化的主要原因,而全藕粉的色泽改变可能主要归因于美拉德或焦糖化反应^[22]。类似的研究发现,70~90℃湿热处理未造成土豆的亮度变化^[23],而大米经蒸汽湿热处理后因褐变导致亮度降低,且更高温度(140~150℃)会加速非酶褐变并增加红色值^[24]。

表1 莲藕全粉的色泽

Table 1 Color of whole lotus root powders

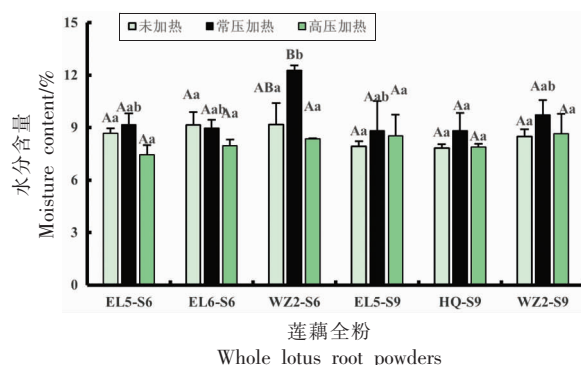
品种	热处理	L^*	a^*	b^*
EL5-S6	未加热	90.76 ± 0.82 ^{Ba}	3.78 ± 0.82 ^{Ab}	18.82 ± 1.43 ^{Bbc}
	常压加热	93.12 ± 1.35 ^{Ca}	3.46 ± 0.59 ^{Ac}	15.88 ± 1.86 ^{Aa}
	高压加热	84.00 ± 1.48 ^{Ab}	4.40 ± 2.04 ^{Aa}	15.30 ± 2.24 ^{Ab}
EL6-S6	未加热	95.84 ± 0.37 ^{Cc}	2.10 ± 0.91 ^{Aa}	17.78 ± 0.81 ^{Cb}
	常压加热	91.88 ± 1.15 ^{Ba}	2.04 ± 0.74 ^{Alc}	15.76 ± 1.40 ^{Ba}
	高压加热	85.62 ± 0.66 ^{Alc}	5.26 ± 0.60 ^{Ba}	12.40 ± 1.33 ^{Aa}
WZ2-S6	未加热	91.52 ± 0.41 ^{Ba}	3.70 ± 0.71 ^{Ab}	19.84 ± 1.07 ^{Cc}
	常压加热	91.92 ± 0.74 ^{Ba}	2.92 ± 0.90 ^{Alc}	16.58 ± 1.04 ^{Ba}
	高压加热	83.80 ± 0.79 ^{Aa}	4.76 ± 0.34 ^{Ba}	12.50 ± 0.96 ^{Aa}
EL5-S9	未加热	93.48 ± 0.65 ^{Ba}	2.26 ± 0.71 ^{Aa}	19.90 ± 1.01 ^{Cc}
	常压加热	97.00 ± 1.21 ^{Cb}	2.08 ± 0.61 ^{Ab}	14.92 ± 1.82 ^{Ba}
	高压加热	82.46 ± 2.29 ^{Aa}	4.38 ± 1.22 ^{Ba}	11.40 ± 1.51 ^{Aa}
HQ-S9	未加热	95.50 ± 0.91 ^{Cc}	2.26 ± 0.92 ^{Aa}	17.76 ± 1.09 ^{Bb}
	常压加热	93.20 ± 0.38 ^{Ba}	1.08 ± 0.39 ^{Aa}	13.18 ± 2.07 ^{Aa}
	高压加热	83.64 ± 1.13 ^{Ab}	4.18 ± 1.46 ^{Ba}	14.20 ± 0.31 ^{Aa}
WZ2-S9	未加热	96.46 ± 0.70 ^{Cc}	2.16 ± 0.68 ^{Aa}	14.74 ± 1.51 ^{Aa}
	常压加热	92.76 ± 1.40 ^{Ba}	2.94 ± 0.77 ^{Alc}	14.26 ± 1.95 ^{Aa}
	高压加热	86.24 ± 1.35 ^{Ac}	3.44 ± 1.42 ^{Aa}	12.84 ± 1.85 ^{Aa}

注:不同小写英文字母表相同处理下不同样品之间的色度值差异($P < 0.05$),不同大写英文字母表示相同样品经不同处理的色度值差异($P < 0.05$)。

2.2 不同莲藕全粉的糖类成分含量比较

由图 1 可知,不同品种及不同生长期莲藕全粉中含水量无显著差异($P<0.05$),其平均值及变异系数(coefficient of variation, CV)分别为 8.54%和 6.00%,而常压和高压加热后的全粉中平均含水量分别为 9.63%和 8.14%。热处理后的含水量变化可能与藕淀粉的分子结构及持水力改变有关。尚珊等^[25]研究发现,热处理可能通过改变糯麦粉中淀粉分子的结构而有效提升了其持水率。基于样品干质量比较不同莲藕全粉的糖类成分含量,结果如表 2 所示。

糖类是莲藕全粉中的主要营养成分,以可溶性糖和淀粉为主。不同品种及不同生长期莲藕中可溶性总糖和还原糖的平均含量分别为 28.68%(CV 4.60%)和 1.76%(CV 2.26%),而多糖可能为主要可溶性成分^[11]。其中,EL6 藕中的可溶性总糖含量显著高于其它藕样($P<0.05$)。随着生长期的延长,EL5 藕中可溶性总糖含量显著减少($P<0.05$),而 WZ2 藕的含量变幅较小。热处理可导致莲藕中可溶性总糖和还原糖含量增加,尤其是高压加热。随着加热温度升高,样品中糖类物质分解,可能使部分不可溶性糖类物质分解为可溶性糖类物质。此外,热处理过程中的汁液流失可能导致可溶性



注:不同小写英文字母表示相同处理下不同样品之间的含水量差异($P<0.05$),不同大写英文字母表示相同样品经不同处理后的含水量差异($P<0.05$)。

图 1 莲藕全粉的含水量

Fig.1 Water content of whole lotus root powders

总糖含量的减少。

不同品种和不同生长期莲藕中总淀粉的平均含量为 41.24%(CV 5.6%),平均 RS' 含量为 37.69%(CV 2.11%),其中 WZ2-S9 藕中总淀粉含量与 RS' 含量均高于其它藕样。热处理导致全粉中总淀粉含量和 RS' 含量明显降低,可能因部分淀粉受热分解为糊精与还原糖^[26]。娄朋举等^[27]研究发现,随着加热温度升高和时间延长,青香蕉粉中 RS 含量显著降低。

表 2 莲藕全粉的糖类成分含量

Table 2 Saccharide content of whole lotus root powders

品种	热处理	可溶性总糖含量/%	还原糖含量/%	总淀粉含量/%	抗性淀粉含量/%
EL5-S6	未加热	31.56 ± 0.14 ^{Bb}	2.19 ± 0.07 ^{Ad}	35.87 ± 3.00 ^{Aa}	29.86 ± 1.00 ^{Aa}
	常压加热	29.75 ± 0.66 ^{Ab}	2.78 ± 0.17 ^{Bc}	34.98 ± 3.49 ^{Aa}	27.34 ± 6.02 ^{Acld}
	高压加热	39.25 ± 0.36 ^{Cc}	3.53 ± 0.13 ^{Cl}	32.77 ± 3.40 ^{Ab}	26.19 ± 1.10 ^{Ab}
EL6-S6	未加热	37.65 ± 1.10 ^{Ac}	1.71 ± 0.07 ^{Ab}	40.21 ± 1.4 ^{Aabc}	37.94 ± 2.00 ^{Bb}
	常压加热	36.61 ± 0.81 ^{Ac}	3.24 ± 0.25 ^{Cc}	37.48 ± 6.56 ^{Ab}	28.96 ± 2.88 ^{Ad}
	高压加热	46.03 ± 0.48 ^{Bc}	4.34 ± 0.03 ^{Bc}	37.90 ± 2.50 ^{Ab}	29.26 ± 1.91 ^{Ac}
WZ2-S6	未加热	23.75 ± 2.77 ^{Aa}	1.96 ± 0.15 ^{Ac}	42.47 ± 1.87 ^{Abc}	40.01 ± 2.18 ^{Cc}
	常压加热	27.21 ± 0.22 ^{ABb}	3.81 ± 0.32 ^{Bd}	37.66 ± 0.55 ^{Ab}	25.64 ± 1.08 ^{Abc}
	高压加热	30.49 ± 0.27 ^{Ba}	4.03 ± 0.28 ^{Bc}	36.82 ± 2.80 ^{Ab}	28.55 ± 1.25 ^{Bc}
EL5-S9	未加热	25.05 ± 0.68 ^{Aa}	1.67 ± 0.01 ^{Ab}	37.80 ± 0.44 ^{Bab}	36.26 ± 1.40 ^{Cb}
	常压加热	27.94 ± 2.25 ^{ABb}	1.85 ± 0.13 ^{Aa}	30.84 ± 2.78 ^{Bab}	22.58 ± 1.36 ^{Ab}
	高压加热	31.52 ± 0.03 ^{Aa}	2.32 ± 0.23 ^{Ba}	33.11 ± 1.67 ^{Aa}	27.59 ± 1.40 ^{Bb}
HQ-S9	未加热	30.18 ± 0.40 ^{Ab}	1.67 ± 0.02 ^{Ab}	43.64 ± 2.69 ^{Acld}	39.30 ± 0.46 ^{Bc}
	常压加热	27.61 ± 3.17 ^{Ab}	2.02 ± 0.13 ^{Bab}	42.24 ± 1.49 ^{Ab}	23.51 ± 3.62 ^{Aabc}
	高压加热	31.52 ± 0.28 ^{Ab}	2.77 ± 0.16 ^{Cb}	42.05 ± 1.38 ^{Ab}	24.19 ± 0.31 ^{Aa}
WZ2-S9	未加热	23.89 ± 2.77 ^{Aa}	1.34 ± 0.06 ^{Aa}	47.49 ± 1.24 ^{Bd}	42.80 ± 2.57 ^{Cl}
	常压加热	22.74 ± 2.35 ^{Aa}	2.16 ± 0.19 ^{Bb}	44.57 ± 1.49 ^{Ab}	21.52 ± 1.55 ^{Aa}
	高压加热	41.21 ± 0.72 ^{Bd}	2.93 ± 0.18 ^{Cb}	41.54 ± 1.38 ^{Ad}	24.86 ± 1.01 ^{Ba}

注:不同小写英文字母表相同处理下不同样品之间的糖类含量差异($P<0.05$),不同大写英文字母表示相同样品经不同处理的糖类含量差异($P<0.05$)。

2.3 不同莲藕全粉的消化特性比较

18种莲藕全粉模拟消化过程中的还原糖释放量均以胃液消化>肠液消化>唾液消化。不同全粉经唾液、胃液和肠液依次消化的平均还原糖释放量分别为0.24, 4.28 mg/g和0.90 mg/g, 其CV分别为7.43%, 8.38%和8.84%。有研究表明, 多糖经胃液消化后的分子质量降低, 解离出还原糖^[28-29]。莲藕全粉在胃液消化环境中释放大量的还原糖, 可能酸性条件下的多糖糖苷键断裂有关。

经过不同热处理后, 莲藕全粉在各消化阶段

的还原糖释放量均有所增加。其中, 常压加热全粉在唾液、胃液和肠液消化环境中的平均还原糖释放量分别增加了0.05, 1.49 mg/g和0.81 mg/g, 而经高压加热后的平均增长量分别为0.11, 2.68 mg/g和1.21 mg/g。其原因可能是莲藕内部水分子在蒸汽加热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^[28]。洪晴悦^[29]研究发现, 热处理能有效增加青稞在胃肠道消化过程中的还原糖释放。

表3 莲藕全粉模拟消化过程中的还原糖释放

Table 3 Release of reducing sugars from whole lotus root powders during simulated digestion

品种	热处理	还原糖含量/mg·g ⁻¹		
		唾液消化释放	胃液消化释放	肠液消化释放
EL5-S6	未加热	0.32 ± 0.03 ^{Ad}	3.25 ± 0.14 ^{Aa}	1.03 ± 0.15 ^{Ad}
	常压加热	0.40 ± 0.03 ^{Bc}	5.07 ± 0.15 ^{Ba}	1.61 ± 0.04 ^{Bb}
	高压加热	0.43 ± 0.03 ^{Cc}	6.48 ± 0.29 ^{Ca}	1.93 ± 0.16 ^{Ca}
EL6-S6	未加热	0.20 ± 0.02 ^{Ab}	3.42 ± 0.15 ^{Aa}	0.95 ± 0.10 ^{Ad}
	常压加热	0.22 ± 0.02 ^{Aa}	4.85 ± 0.45 ^{Aa}	1.48 ± 0.05 ^{Ba}
	高压加热	0.47 ± 0.05 ^{Bf}	5.88 ± 0.52 ^{Ba}	2.12 ± 0.01 ^{Ca}
WZ2-S6	未加热	0.36 ± 0.04 ^{Ac}	4.48 ± 0.68 ^{Ab}	0.64 ± 0.07 ^{Aa}
	常压加热	0.42 ± 0.02 ^{Bc}	4.78 ± 0.67 ^{Aa}	1.73 ± 0.16 ^{Bbcd}
	高压加热	0.41 ± 0.01 ^{Bd}	6.02 ± 0.16 ^{Ba}	2.07 ± 0.15 ^{Ca}
EL5-S9	未加热	0.18 ± 0.01 ^{Ab}	4.40 ± 0.07 ^{Ab}	1.03 ± 0.09 ^{Ad}
	常压加热	0.23 ± 0.02 ^{Aa}	7.05 ± 0.17 ^{Bc}	1.86 ± 0.14 ^{Bd}
	高压加热	0.25 ± 0.02 ^{Aa}	7.83 ± 0.08 ^{Bb}	2.09 ± 0.07 ^{Ca}
HQ-S9	未加热	0.25 ± 0.03 ^{Ac}	4.42 ± 0.37 ^{Ab}	0.80 ± 0.02 ^{Ab}
	常压加热	0.28 ± 0.02 ^{Bb}	7.10 ± 0.69 ^{Bc}	1.83 ± 0.21 ^{Bcd}
	高压加热	0.30 ± 0.01 ^{Cc}	7.88 ± 0.93 ^{Bb}	2.42 ± 0.29 ^{Cb}
WZ2-S9	未加热	0.15 ± 0.02 ^{Aa}	5.70 ± 0.33 ^{Ac}	0.91 ± 0.04 ^{Ac}
	常压加热	0.23 ± 0.01 ^{Ba}	5.78 ± 0.27 ^{Ab}	1.70 ± 0.07 ^{Bbc}
	高压加热	0.28 ± 0.01 ^{Cb}	7.65 ± 0.83 ^{Bb}	2.01 ± 0.83 ^{Ca}

注: 不同小写英文字母表相同处理下不同样品之间的还原糖释放差异($P < 0.05$), 不同大写英文字母表示相同样品经不同处理的还原糖释放差异($P < 0.05$)。

在食物热加工过程中, 淀粉的结构性质会发生一定改变, 从而影响其消化性^[30]。根据淀粉的消化速率将淀粉分RDS, SDS和RS^[21]。RDS是指20 min内能在口腔和小肠中被迅速消化吸收的淀粉; SDS是指20~120 min内小肠中被完全消化吸收的淀粉; 而RS是指消化120 min后仍在人体小肠中无法消化吸收的淀粉。由表4可知, 不同莲藕全粉中淀粉组成以RS含量>SDS含量>RDS含量, 其平均值分别为88.96%(CV 25.8%)、9.88%

(CV 18.75%)和1.16%(CV 8.63%)。Lin等^[31]测得莲藕淀粉中RDS, SDS与RS的含量分别为1.20%, 12.80%和86.00%, 与本研究结果相近。此外, 不同全粉中SDS和RS的含量差异也说明, 品种和生长期在一定程度上影响全粉的淀粉消化特性。

经过不同热处理后, 莲藕全粉中RDS与SDS的含量显著增加($P < 0.05$), 而RS含量显著降低($P < 0.05$)。其中, 经常压加热后RDS和SDS的平均含量分别增加了23.64%和34.48%, 而RS平均

含量降低了 58.13%；经高压加热后 RDS 和 SDS 的平均含量增加了 25.66% 和 40.09%，而 RS 平均含量减少了 65.75%。其原因在于，淀粉颗粒因加

热破碎、糊化而易被消化酶水解^[32]，该规律在玉米淀粉和黑小麦淀粉的相似研究中亦被证实^[33-34]。

表 4 莲藕全粉中淀粉的消化特性

Table 4 Digestion characteristics of starches in whole lotus root powders

品种	热处理	RDS/%	SDS/%	RS/%
EL5-S6	未加热	0.38 ± 0.08 ^{Aa}	10.16 ± 0.93 ^{Ab}	89.46 ± 5.40 ^{Cab}
	常压加热	24.87 ± 3.10 ^{Ba}	44.26 ± 6.77 ^{Ba}	30.87 ± 4.83 ^{Bab}
	高压加热	29.90 ± 6.51 ^{Ba}	67.86 ± 4.54 ^{Cb}	2.25 ± 0.25 ^{Aa}
EL6-S6	未加热	1.01 ± 0.08 ^{Aa}	12.84 ± 0.56 ^{Aa}	86.15 ± 8.29 ^{Aa}
	常压加热	20.91 ± 4.32 ^{Ba}	41.50 ± 4.52 ^{Ba}	37.59 ± 4.859 ^{Bb}
	高压加热	30.46 ± 3.20 ^{Ca}	58.85 ± 3.74 ^{Cb}	10.70 ± 0.51 ^{Ca}
WZ2-S6	未加热	0.72 ± 0.11 ^{Aa}	14.72 ± 1.31 ^{Ab}	84.57 ± 0.74 ^{Cab}
	常压加热	22.42 ± 3.66 ^{Ba}	55.66 ± 7.79 ^{Ba}	21.92 ± 4.39 ^{Bb}
	高压加热	25.91 ± 1.40 ^{Ba}	52.47 ± 3.42 ^{ABa}	21.62 ± 1.71 ^{Aa}
EL5-S9	未加热	1.45 ± 0.10 ^{Ab}	5.14 ± 3.62 ^{Ab}	93.41 ± 3.28 ^{Bb}
	常压加热	36.01 ± 0.49 ^{Cb}	40.82 ± 2.28 ^{Ba}	23.17 ± 0.67 ^{Ab}
	高压加热	25.40 ± 1.87 ^{Ba}	59.23 ± 2.67 ^{ABa}	15.38 ± 0.73 ^{Aa}
HQ-S9	未加热	2.51 ± 0.01 ^{Ab}	8.21 ± 1.34 ^{Ab}	89.28 ± 1.34 ^{Bab}
	常压加热	21.57 ± 0.27 ^{Ba}	43.72 ± 6.83 ^{Ba}	34.71 ± 4.15 ^{Ab}
	高压加热	24.13 ± 3.25 ^{Ba}	51.00 ± 8.91 ^{Bb}	24.88 ± 1.53 ^{Aa}
WZ2-S9	未加热	0.90 ± 0.22 ^{Aa}	8.19 ± 3.35 ^{Ab}	90.92 ± 3.31 ^{Bab}
	常压加热	23.04 ± 0.28 ^{Ba}	40.21 ± 7.34 ^{Bb}	36.75 ± 0.87 ^{Aa}
	高压加热	25.15 ± 5.89 ^{Ba}	54.25 ± 1.98 ^{Bb}	20.59 ± 4.34 ^{Aa}

注：RDS 为快消化淀粉，SDS 为慢消化淀粉，RS 为抗性淀粉；不同小写英文字母表相同处理下不同样品之间的淀粉含量差异 ($P < 0.05$)，不同大写英文字母表示相同样品经不同处理的淀粉含量差异 ($P < 0.05$)。

2.4 不同莲藕全粉的热力学性质比较

糊化温度反映了淀粉颗粒内部微晶部分的排列状况及结晶度，结晶度越高则糊化温度越高，同时说明淀粉晶体结构越完整且不易被破坏^[35]。焓变值主要反映糊化时破坏淀粉双螺旋结构（包括结晶区和非结晶区）所需的能量^[36]。表 5 中，不同莲藕全粉的平均起始温度、峰值温度、终止温度和焓变值分别为 62.76, 66.30, 76.03 °C 和 2.24 J/g，其 CV 分别为 0.57%, 0.71%, 0.14% 和 4.07%。不同品种与不同生长期莲藕的热力学特性差异，可能是由于淀粉粒的形状、大小、直连淀粉含量及淀粉颗粒的晶型结构差异导致^[6]。

经过不同热处理后，莲藕全粉糊化的起始、峰值和终止温度均显著降低 ($P < 0.05$)。马丹妮^[34]研究发现，5 种黑小麦起始糊化温度为 63.42~65.21 °C，经常压和高压热处理后分别将至 44.54~48.14 °C 和 43.7~48.92 °C。蒸煮处理会显著降低板栗淀

粉的糊化温度，主要是因为高温破坏了大量的长支链淀粉，导致支链淀粉含量降低^[37]。而莲藕经热处理后的全粉焓变值增减可能存在两个方面的原因：其一是加热导致淀粉分子的有序程度降低，从而降低焓变值；其二是加热过程中淀粉与其它组分形成了复合物以及新的稳定结构，使得焓变值略增加^[38]。

2.5 不同莲藕全粉的糊化特性比较

淀粉在适当的水温下能够吸水膨胀形成均匀的糊状溶液，此过程即为糊化，而黏度的增加为糊化最直接的表现^[39]。通过 RVA 测定不同莲藕全粉的糊化特性，结果如表 5 所示。不同莲藕全粉峰值黏度、谷值黏度、衰减值、最终黏度、回生值的平均值分别为 2 587.50, 1 206.30, 1 381.00, 1 449.00 cP 和 243.00 cP，其 CV 分别为 0.95%, 2.87%, 2.96%, 1.87% 和 1.75%。其中，WZ2-S9 样品具有最高值，而 EL5-S6 具有最低值。峰值黏度的大小与淀粉

表5 莲藕全粉的热力学特性

Table 5 Thermodynamic characteristics of whole lotus root powders

品种	热处理	热力学特征指标			
		起始温度/°C	峰值温度/°C	终止温度/°C	焓变值/J·g ⁻¹
EL5-S6	未加热	62.96 ± 0.16 ^{Cb}	66.97 ± 0.17 ^{Cc}	72.45 ± 0.13 ^{Ca}	2.50 ± 0.06 ^{ABc}
	常压加热	49.86 ± 0.13 ^{Bbl}	57.73 ± 0.10 ^{Bbl}	71.05 ± 0.08 ^{Bc}	2.40 ± 0.11 ^{Ad}
	高压加热	46.96 ± 0.12 ^{Aa}	56.29 ± 0.63 ^{ab}	69.36 ± 0.08 ^{Ad}	2.63 ± 0.12 ^{Ba}
EL6-S6	未加热	64.26 ± 0.07 ^{Cc}	68.35 ± 1.08 ^{Cl}	77.32 ± 0.12 ^{Bbl}	2.28 ± 0.09 ^{ABc}
	常压加热	46.27 ± 0.16 ^{Aa}	57.29 ± 0.11 ^{Bc}	65.87 ± 0.12 ^{Aa}	1.67 ± 0.12 ^{Aa}
	高压加热	48.51 ± 0.12 ^{Bb}	55.65 ± 0.11 ^{Ab}	65.96 ± 0.07 ^{Ac}	2.47 ± 0.12 ^{Ba}
WZ2-S6	未加热	61.57 ± 0.11 ^{Ca}	65.23 ± 0.69 ^{Cab}	73.79 ± 0.04 ^{Cb}	2.35 ± 0.01 ^{ABc}
	常压加热	46.54 ± 0.13 ^{Ab}	57.28 ± 0.09 ^{Bc}	72.92 ± 0.12 ^{Bbl}	2.21 ± 0.12 ^{AC}
	高压加热	47.67 ± 0.12 ^{Bab}	55.64 ± 0.11 ^{Ab}	64.36 ± 0.11 ^{Ab}	3.20 ± 0.12 ^{Bb}
EL5-S9	未加热	61.59 ± 0.17 ^{Ca}	64.28 ± 0.70 ^{Ca}	76.94 ± 0.12 ^{Cc}	2.28 ± 0.11 ^{Bb}
	常压加热	46.22 ± 0.12 ^{Aa}	58.85 ± 0.10 ^{Bc}	74.36 ± 0.09 ^{Bc}	2.04 ± 0.07 ^{ABc}
	高压加热	47.99 ± 0.11 ^{Bb}	55.16 ± 0.13 ^{Ab}	64.34 ± 0.12 ^{Ab}	2.63 ± 0.11 ^{Ca}
HQ-S9	未加热	62.66 ± 0.71 ^{Bb}	66.24 ± 0.12 ^{Ckc}	76.12 ± 0.12 ^{Cc}	1.66 ± 0.12 ^{Aa}
	常压加热	46.90 ± 0.23 ^{Ac}	56.60 ± 0.53 ^{Bb}	71.10 ± 0.12 ^{Bc}	3.69 ± 0.12 ^{Ca}
	高压加热	47.61 ± 0.67 ^{Aab}	55.15 ± 0.1 ^{Ab}	64.19 ± 0.19 ^{Ab}	3.14 ± 0.11 ^{Bb}
WZ2-S9	未加热	63.52 ± 0.94 ^{Ckc}	66.72 ± 0.12 ^{Bc}	79.53 ± 0.12 ^{Cc}	2.35 ± 0.09 ^{ABc}
	常压加热	46.24 ± 0.11 ^{Aa}	52.21 ± 0.11 ^{Aa}	67.39 ± 0.12 ^{Bb}	1.96 ± 0.09 ^{ABc}
	高压加热	47.88 ± 0.93 ^{Bc}	52.28 ± 0.11 ^{Aa}	63.07 ± 0.11 ^{Aa}	2.45 ± 0.11 ^{Ba}

注:不同小写英文字母表相同处理下不同样品之间的热力学特征指标差异($P<0.05$),不同大写英文字母表示相同样品经不同处理的热力学特征指标差异($P<0.05$)。

表6 莲藕全粉的糊化特性

Table 6 Gelatinization characteristics of whole lotus root powders

品种	热处理	糊化特性				
		峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	衰减值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP
EL5-S6	未加热	2 047 ± 18 ^{Ba}	1 120 ± 36 ^{Ca}	927 ± 53 ^{Aa}	1 278 ± 29 ^{Ca}	158 ± 7 ^{Aa}
	常压加热	2 392 ± 34 ^{Cc}	858 ± 21 ^{Ba}	1 534 ± 13 ^{Bc}	1 098 ± 32 ^{Ba}	240 ± 11 ^{Ab}
	高压加热	1 545 ± 31 ^{Aa}	705 ± 29 ^{Ab}	840 ± 60 ^{Aa}	886 ± 21 ^{Ab}	181 ± 5 ^{Aab}
EL6-S6	未加热	2 461 ± 12 ^{Bc}	1 210 ± 30 ^{Cb}	1 250 ± 41 ^{Bc}	1 471 ± 31 ^{Cl}	261 ± 6 ^{Ab}
	常压加热	1 822 ± 21 ^{Aa}	838 ± 32 ^{Aa}	985 ± 11 ^{Aa}	1 058 ± 20 ^{Aa}	220 ± 12 ^{Aab}
	高压加热	3 489 ± 21 ^{Cf}	1 028 ± 29 ^{Bc}	2 461 ± 32 ^{Cf}	1 279 ± 29 ^{Bf}	251 ± 18 ^{Ac}
WZ2-S6	未加热	2 490 ± 32 ^{Bc}	1 156 ± 31 ^{Bab}	1 332 ± 2 ^{Bc}	1 329 ± 28 ^{Bb}	171 ± 3 ^{Aa}
	常压加热	1 920 ± 31 ^{Ab}	955 ± 19 ^{Ab}	965 ± 12 ^{Aa}	1 168 ± 31 ^{Ab}	213 ± 12 ^{Ba}
	高压加热	2 948 ± 29 ^{Ce}	939 ± 29 ^{Ad}	2 008 ± 48 ^{Ce}	1 139 ± 33 ^{Ad}	200 ± 14 ^{Bb}
EL5-S9	未加热	2 294 ± 21 ^{Ab}	1 151 ± 63 ^{Bab}	1 143 ± 77 ^{Ab}	1 417 ± 13 ^{Bc}	265 ± 6 ^{Ab}
	常压加热	2 633 ± 33 ^{Bbl}	1 141 ± 11 ^{Bc}	1 492 ± 22 ^{Cb}	1 573 ± 30 ^{Cc}	432 ± 20 ^{Bc}
	高压加热	2 318 ± 30 ^{Ad}	963 ± 29 ^{Ad}	1 355 ± 60 ^{Bc}	1 219 ± 10 ^{Ac}	256 ± 21 ^{Ac}
HQ-S9	未加热	2 742 ± 31 ^{Bbl}	1 171 ± 29 ^{Bab}	1 571 ± 60 ^{Bbl}	1 446 ± 31 ^{Bcd}	275 ± 6 ^{Bb}
	常压加热	3 326 ± 22 ^{Cc}	1 312 ± 31 ^{Cl}	2 014 ± 10 ^{Cl}	1 831 ± 31 ^{Cl}	519 ± 2 ^{Cl}
	高压加热	2 222 ± 23 ^{Ac}	750 ± 29 ^{Ac}	1 473 ± 6 ^{Ad}	954 ± 11 ^{Ac}	204 ± 6 ^{Ab}
WZ2-S9	未加热	3 491 ± 34 ^{Bc}	1 428 ± 21 ^{Bc}	2 063 ± 14 ^{Bc}	1 754 ± 32 ^{Bc}	326 ± 12 ^{Bb}
	常压加热	3 770 ± 35 ^{Cf}	1 544 ± 16 ^{Cc}	2 226 ± 20 ^{Cc}	2 093 ± 26 ^{Cc}	549 ± 11 ^{Cc}
	高压加热	1 824 ± 27 ^{Ab}	606 ± 28 ^{Aa}	1 218 ± 10 ^{Ab}	748 ± 20 ^{Aa}	142 ± 3 ^{Aa}

注:不同小写英文字母表相同处理下不同样品之间的糊化特征指标差异($P<0.05$),不同大写英文字母表示相同样品经不同处理的糊化特征指标差异($P<0.05$)。

颗粒的膨胀性能呈正相关^[40];衰减与淀粉颗粒的稳定性呈反比^[41];回生值表示淀粉的稳定性和老化速度,回生值越大,淀粉越易老化^[42]。相比之下,WZ2-S9全粉的淀粉膨胀性与热糊稳定性较好,但冷糊稳定性差,易老化;EL5-S6全粉与之相反。

莲藕品种、生长期和热处理方式对全粉的糊化特性均有明显影响,尤其是高压加热显著降低全粉的谷值黏度和最终黏度($P<0.05$)。经高压加热后,样品的平均峰值黏度和谷值黏度分别降低了196.40 cP和374.60 cP,而平均衰减值和最终黏度分别增加了178.30 cP和412.00 cP。有研究表明^[43-44],高温、高压可使淀粉颗粒被破坏,直链分子溶出,大量短直链分子在氢键等作用力的作用下发生集聚,形成耐热结构,使得总体的黏度降低。而水解形成的短链更易溶解,使得淀粉回生困难,即回生值降低。但在热处理后期,由于可溶性物质与其它物质的流失,使得高膨胀性的淀粉颗粒占据较大的体积而更紧密,淀粉颗粒之间互相靠紧,传递着较高的内部摩擦力,即黏度升高^[25]。

3 结论

全粉是一种莲藕绿色加工产品,具有较高的营养价值和资源利用率,并能在一定程度上替代传统藕淀粉。不同品种和不同生长期莲藕加工全粉在糖类成分含量、消化特性和糊化特性方面呈现明显差异。经热处理后莲藕全粉的色泽加深,可溶性糖含量增加,而总淀粉及抗性淀粉含量减少。加热导致全粉中抗性淀粉部分转变成可消化淀粉,降低糊化温度,并改变凝胶特性。原料及其预处理会显著影响莲藕全粉的营养品质和冲调特性,是产品品质控制的关键。然而,对于莲藕全粉加工的原料学、工艺学和营养学问题仍需要深入的研究,为相关产品的开发与应用提供更加系统的科学依据和技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 王清章, 邱承光, 彭光华, 等. 莲藕粉糊的流变特性实验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 116-119.
- [2] 郭凤领, 吴金平, 周洁, 等. 湖北省水生蔬菜产业调研报告及对策建议[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(8): 80-84.
- [3] 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.
- [4] 李良俊, 曹碛生, 陈建林, 等. 我国莲藕产业标准化现状与提高竞争力的思考[J]. 农业科技管理, 2005, 24(4): 33-36.
- [5] 余清清, 张美霞, 陈光静, 等. 藕淀粉和超微全藕粉的糊化特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 130-137.
- [6] 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.
- [7] 刘建学. 全藕粉喷雾干燥工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 229-231.

WANG Q Z, QIU C G, PENG G H, et al. Experimental studies on rheological properties of lotus root powder paste[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 116-119.

GUO F L, WU J P, ZHOU J, et al. Research report and countermeasures of aquatic vegetable industry in Hubei province[J]. Chinese Melon Vegetables, 2020, 33(8): 80-84.

SUN Q R, LIU P, LI H W, et al. Analysis and evaluation of main nutritional ingredients in residual of lotus root from different areas [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 291-297.

LI L J, CAO B S, CHEN J L, et al. Current situation of standardization of lotus root industry in China and consideration on improving competitiveness[J]. Agricultural Science and Technology Management, 2005, 24(4): 33-36.

YU Q Q, ZHANG M X, CHEN G J, et al. Pasting properties of lotus root starch and super-fine whole lotus root starch[J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44(11): 130-137.

GU X M, YANG H L, HAN Y C, et al. Analysis on the morphology and quality characteristics of different varieties of lotus rootstarch and whole powder [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 95-101.

LIU J X. Experimental study on spray drying of

- whole lotus root powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 229-231.
- [8] 张美霞. 全藕粉生产过程中护色技术的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(13): 283-284, 335.
ZHANG M X. Study on the anti-brownness technique for whole-lotus powder process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(13): 283-284, 335.
- [9] 顾晓敏, 童川, 韩延超, 等. 不同品种莲藕游离氨基酸多样性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 183-189.
GU X M, TONG C, HAN Y C, et al. Diversity of free amino acid among different lotus root[J]. Food Science, 2022, 43(4): 183-189.
- [10] 顾晓敏. 不同品种莲藕品质分析及低温速溶藕粉工艺研究[D]. 温州: 温州大学, 2021.
GU X M. Research on quality characteristics of different varieties of lotus root and low-temperature instant lotus root powder technology [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021.
- [11] WANG H X, YI Y, SUN J, et al. Fingerprint profiling of polysaccharides from different parts of lotus root varieties [J]. RSC Advances, 2018, 8(30): 16574-16584.
- [12] MIN T, BAO Y, ZHOU B, et al. Transcription profiles reveal the regulatory synthesis of phenols during the development of lotus rhizome (*Nelumbo nucifera Gaertn*) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(11): 2735.
- [13] LI S, LI X, LAMIKANRA O, et al. Effect of cooking on physicochemical properties and volatile compounds in lotus root (*Nelumbo nucifera Gaertn*) [J]. Food Chemistry, 2017, 216: 316-323.
- [14] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1.
National Health and Family Planning Commission. National Standard for Food Safety Determination of moisture in food: GB 5009.3-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1.
- [15] 毕颖, 刘燕, 张平, 等. 蒽酮比色法测定大豆乳清废水中总糖含量[J]. 大豆通报, 2006(3): 24-25.
BI Y, LIU Y, ZHANG P, et al. Determination of total sugar content in soybean whey wastewater by anthrone colorimetric method [J]. Soybean Bulletin, 2006(3): 24-25.
- [16] 李志霞, 聂继云, 闫震, 等. 响应面法对3,5-二硝基水杨酸比色法测定水果中还原糖含量条件的优化[J]. 分析测试学报, 2016, 35(10): 1283-1288.
LI Z X, NIE J Y, YAN Z, et al. Optimization of 3, 5-dinitrosalicylic acid colorimetry determination conditions of reducing sugar content in fruits by response surface method [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2016, 35(10): 1283-1288.
- [17] AOAC. Resistant Starch in Starch and Plant Materials Enzymatic Digestion: 45.4.15 [S]. USA: AOAC Official Method, 2002.
- [18] PUNIA S, DHULL S B, KUNNER P, et al. Effect of γ -radiation on physico-chemical, morphological and thermal characteristics of lotus seed (*Nelumbo nucifera*) starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 584-590.
- [19] LIU D, LI Z, FAN Z W, et al. Effect of soybean soluble polysaccharide on the pasting, gels, and rheological properties of kudzu and lotus starches [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89(4): 443-452.
- [20] KIM I D, PARK Y S, PARK J J, et al. Physicochemical and antioxidant properties of garlic (*Allium sativum*) prepared by different heat treatment conditions [J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2019, 51(5): 452-458.
- [21] ENGLYST H N N, KINGMAN S M M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(S2): 33-50.
- [22] SEHRAWAT R, NEMA P K, KAUR B P. Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 34: 285-301.
- [23] SOPONRONNARIT S, NATHAKARANAKULE A, JIRAJINDALERT A, et al. Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 423-432.
- [24] PRACHAYAWARAKORN S, PRACHAYAWASIN P, SOPONRONNARIT S. Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers [J]. Food Science and Technology, 2006, 39(7): 770-778.
- [25] 尚珊, 黄卫宁, 贾春利, 等. 热处理对糯麦面团面包品质的影响 [J]. 食品科学, 2013, 34(23): 20-24.
SHANG S, HUANG W N, JIA C L, et al. Effects

- of heat treatment on the quality of waxy dough and bread[J]. Food Science, 2013, 34(23): 20–24.
- [26] 景孝男, 党斌, 杨希娟, 等. 热处理对不同品种青稞全粉结构及理化特性的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 44–52.
- JING X N, DANG B, YANG X J, et al. Effect of heat treatment on the structure and physicochemical properties of barley powder of different varieties[J]. Food and Machinery, 2021, 37(9): 44–52.
- [27] 娄朋举, 阚洪囡, 尚敏, 等. 青香蕉粉中抗性淀粉的稳定性及消化性[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(2): 28–35.
- LOU P J, KAN H N, SHANG M, et al. Stability and digestibility of resistant starch in green banana powder[J]. Food Research and Development, 2022, 43(2): 28–35.
- [28] 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.
- LIU L. Dissolution kinetic models of polysaccharides from *Porphyra yezoensis* and their stimulated digestion *in vitro* and biological activity research[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [29] 洪晴悦. 不同热加工对青稞主要生物活性成分和体外消化与肠菌发酵特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- HONG Q Y. Effects of different thermal processing on main bioactive components, *in vitro* digestion and fermentation characteristics of Qingke [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [30] 从彦丽, 唐旭蔚, 刘东, 等. 柑橘模拟胃肠消化后的多酚生物有效性和抗 HepG2 细胞增殖活性[J]. 现代食品科技, 2019, 35(3): 38–45.
- CONG Y L, TANG X W, LIU D, et al. The bioavailability and activity of anti-HepG2 cell proliferation of citrus fruits polyphenol after simulated gastrointestinal digestion [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(3): 38–45.
- [31] LIN L S, HUANG J, ZHAO L X, et al. Effect of granule size on the properties of lotus rhizome C-type starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 134: 448–457.
- [32] HIA C, RW B, JIE L C, 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.
- [33] JI Y, YU J. *In vitro* digestion and physicochemical characteristics of corn starch mixed with amino acid modified by heat-moisture treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77(4): 720–725.
- [34] 马丹妮. 煮制方式对黑小麦酚酸组成、抗氧化活性和淀粉消化性的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- MA D N. Effect of cooking methods on phenolic acid composition, antioxidant activity and starch digestibility of triticale[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [35] MISHRA S, RAI T. Morphology and functional properties of corn, potato and tapioca starches[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(5): 557–566.
- [36] MAO M, ZHANG T, JIANG B. Characterisations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 1025–1032.
- [37] KAN, L, LI Q, XIE S, et al. Effect of thermal processing on the physicochemical properties of chestnut starch and textural profile of chestnut kernel[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 151: 614–623.
- [38] 唐玮泽. 多次湿热处理对大米淀粉和米粉消化性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- TANG W Z. The effect of multiple heat-moisture treatment on digestibility of rice and rice noodle[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.
- [39] 靳艳玲, 杨林, 丁凡, 等. 不同品种甘薯淀粉加工特性及其与磷含量的相关性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 46–51.
- JIN Y L, YANG L, DING F, et al. Processing characteristics and correlation to phosphorus of different varieties of sweet potato starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 46–51.
- [40] 陈振家, 王美玉, 陈丽, 等. 不同产地燕麦品种营养组成属性分析[J]. 农产品加工, 2020(12): 43–45, 48.
- CHEN Z J, WANG M Y, CHEN L, et al. Analysis of the nutrient composition of different oat cultivars [J]. Agricultural Products Processing, 2020 (12): 43–45, 48.
- [41] 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.
- XIE Y L, ZHANG C Y, WANG X L. Effect of extrusion for the starch structure and digestive characteristics of cereal granule noodles[J]. Journal of the

- Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33 (7): 38–42, 50.
- [42] 高晴, 郑学玲, 刘翀. 不同热处理对玉米粉理化性质影响[J]. 粮食加工, 2017, 42(5): 66–69.
- GAO Q, ZHENG X L, LIU Z. Effects of different heat treatments on physicochemical properties of corn meal[J]. Food Processing, 2017, 42(5): 66–69.
- [43] 曹承嘉, 缪书婷, 张晓晨, 等. 压热冷却循环处理制备青稞抗性淀粉的工艺优化及其特性研究[J]. 食品科技, 2020, 45(3): 253–258.
- CAO C J, MIAO S T, ZHANG X C, et al. Optimization of the preparation and physicochemical properties of hullless barley resistance starch by autoclaving–retrograding cycle method[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(3): 253–258.
- [44] 周帅. 亲水性胶体结合湿热处理对玉米淀粉消化性能的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- ZHOU S. Effect of hydrocolloids with heat–moisture treatment on the digestibility of corn starch [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.

Effects of Thermal Treatment on the Processing Quality of Whole Lotus Root Powder

Wu Jinjin¹, Wu Haoyi¹, Yi Yang^{1*}, Zhang Yanpeng¹, Wang Hongxun², Sun Ying¹
(¹School of Food Science and Engineering, Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023
²School of Life Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023)

Abstract In order to explore the impact of raw materials and heat treatment on the processing quality of lotus root whole powder, different varieties and different growth periods of lotus root were selected, and the effects of steam heating at 100 °C and 120 °C on product color, sugar content, digestion characteristics, thermodynamic properties and gelatinization characteristics were investigated. The results revealed variations in nutrient composition and digestive characteristics among different cultivars and growth stages of lotus root. Heat treatment led to changes in the qualities of whole powder. Especially, total starch content decreased by 2.48%–18.41%, with an increase in the ratio of fast digestible starch by 19.06%–34.56%, slow digestible starch by 28.66%–57.70%, while resistant starch decreased by 48.56%–87.21%. Digestion patterns for saccharides altered significantly, resulting in a rise in total release amount of reducing sugar by 14.05%–93.78%. The initial, peak and termination temperatures of gelatinization significantly decreased ($P<0.05$), and the valley viscosity and final viscosity of high pressure heating powder also significantly decreased ($P<0.05$). Heat treatment significantly influenced nutritional characteristics and flushing characteristics of lotus root powder; these findings can serve as valuable references for controlling its processing quality.

Keywords lotus root; heat treatment; whole powder processing; quality characteristics; digestive characteristics