

## 热处理对莲藕中酚类物质消化释放与抗氧化活性的影响

吴昊怡<sup>1</sup>, 吴瑾瑾<sup>1</sup>, 易阳<sup>1\*</sup>, 孙莹<sup>1</sup>, 王宏勋<sup>2</sup>, 彭凯迪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 武汉轻工大学生命科学与技术学院 武汉 430023)

**摘要** 为探究热处理对莲藕营养特性的影响,针对不同品种及不同生长期的莲藕,研究常压和高压蒸汽加热对其酚类物质含量、消化释放规律和体外抗氧化能力的影响。结果表明:6种藕原料的酚类物质含量和抗氧化能力存在明显差异,经热处理后游离酚和游离黄酮含量均显著下降( $P<0.05$ ),且伴随 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 总抗氧化能力的降低,而高压蒸汽加热造成的降幅较大。热处理还明显改变莲藕模拟消化过程中的酚类物质释放规律:未热处理样品在唾液、胃液和肠液消化过程中的平均酚类物质释放量分别为 15.18, 11.23, 3.18 mg/g dw,而常压加热样品分别为 9.74, 15.14, 4.92 mg/g dw。莲藕消化液的 DPPH 自由基清除能力以胃液>唾液>肠液,而 FRAP 抗氧化能力以唾液>胃液>肠液。热处理可能通过影响酚类物质的消化释放而改变莲藕的营养特性,研究结果为莲藕热加工品质调控提供参考。

**关键词** 莲藕; 热处理; 模拟消化; 酚类物质; 抗氧化活性

**文章编号** 1009-7848(2024)01-0072-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.01.008

莲藕为水生植物莲 (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)的肥大根茎,是一种产量高且营养丰富的水生蔬菜,生食清脆,烹饪后香甜,广受消费者青睐。莲藕在常见的数十种蔬菜中表现出较强的抗氧化活性,与其含有较高的酚类物质有关<sup>[1]</sup>。莲藕中酚类物质包括没食子酸、儿茶素、没食子酸儿茶素、表儿茶素、儿茶酚、绿原酸、咖啡酸、香豆素、白藜芦醇、芦丁等<sup>[2-3]</sup>,发挥抗氧化,预防心血管疾病,降脂、消炎、抗肿瘤等功效<sup>[4]</sup>。据药典记载:生藕性寒,可清热、解毒、泻火而治热症;而熟藕性温,可温中、散寒、生气而治寒证<sup>[5]</sup>。目前,莲藕的热处理研究主要集中在贮藏特性、酶活、质地及风味物质等方面<sup>[6-9]</sup>,而生、熟莲藕的功效差异是否与加热所致酚类物质的变化有关仍不清楚。

近年来,随着人们健康意识的增强,热加工对食物营养特性的影响愈发受到关注。烘焙、蒸煮、挤压和微波等加热方式会影响食物中酚类物质含量、结构和抗氧化活性等,营养品质变化与其处理程度和加工方式密切相关<sup>[10]</sup>。一般来说,食物加热

过程中酚类物质含量与抗氧化活性都会有所降低,其原因可能是部分酚类物质溶出流失,或是因热降解而使分子键断裂或重组<sup>[11]</sup>。香菇经过蒸汽和高温、高压处理后,其总酚含量、DPPH 自由基清除率都有所提升,说明热加工方式对营养成分有积极影响<sup>[12]</sup>。然而,高温煮制苦荞,不仅会降低苦荞总酚、总黄酮和芦丁含量,也会使抗氧化活性降低,继续复合高压处理会加剧对营养物质的破坏<sup>[13]</sup>。有研究发现不同加热处理会对荷叶中酚类化合物产生影响,其中真空微波处理对荷叶中总酚和总黄酮释放量的提高效果最好,且抗氧化活性与酚类物质释放量呈正相关<sup>[14]</sup>。在温度 40~120 °C 范围内,随着加热处理温度的升高,冰菜中的总酚和总黄酮含量及抗氧化活性呈先上升后下降的趋势<sup>[15]</sup>。由此可见,研究莲藕中酚类物质在不同热处理条件下的变化规律,对提升其热加工产品的营养品质具有重要意义。

酚类物质的组成和含量与莲藕的品种和生长期密切相关。有研究表明,不同品种莲藕的脆度、色度、酚类物质含量有所差异,且在莲藕生长初期总酚含量较高,生长后期接近成熟时总酚含量较低<sup>[16-17]</sup>。本文选取不同品种及不同生长期的原料,分析常压和高压蒸汽加热对莲藕中酚类物质含量、消化释放规律和抗氧化活性的影响,探讨生、熟莲藕的营养特性差异与热处理方式的影响。

**收稿日期:** 2023-01-23

**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:** 吴昊怡,女,硕士生

**通信作者:** 易阳 E-mail: yiy86@whpu.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜莲藕, 采收于武汉市江夏区棋良公司莲藕生产基地, 生长期6个月的鄂莲五号(EL5-S6)、鄂莲六号(EL6-S6)和武植二号(WZ2-S6), 以及生长期9个月的鄂莲五号(EL5-S9)、花奇莲(HQ-S9)和武植二号(WZ2-S9)。

Folin-Ciocalteu 试剂, 武汉特尔惠生物科技有限公司; 95%芦丁标准品, 上海源叶生物科技有限公司; 人工唾液(reenwood)、人工胃液(ChP)、人工小肠液(Leagene)和DPPH试剂, 北京雷根生物技术有限公司; FRAP试剂盒, 碧云天生物技术有限公司。

### 1.2 仪器与设备

12N 冷冻干燥仪, 宁波新芝生物科技股份有限公司; A360型紫外可见分光光度计, 翱艺仪器(上海)有限公司; SUNRISE 酶标定量测定仪, 西化仪(北京)科技有限公司; 超声波清洗机, 深圳市洁拓超声设备有限公司; 超微粉碎机 BJ-800A, 杭州拜杰科技有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 莲藕样品预处理 新鲜莲藕洗净削皮后, 每段节藕切分成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℃预冻, 采用真空(35 Pa)冷冻干燥24 h。另两组藕段分别置于常压蒸锅(100℃)和高压灭菌锅(120℃)中蒸汽加热40 min和10 min, 经冷却切片和-20℃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 藕粉中游离酚和游离黄酮含量的测定 参考文献[18]的方法提取莲藕中游离酚和游离黄酮: 取50 mg藕粉加10 mL 40%乙醇, 混匀后置于200 W超声场中浸提40 min, 采用10 000 r/min转速离心15 min, 分离上清液。采用Folin-Ciocalteu法测定上清液中总酚含量<sup>[19]</sup>: 取上清液200 μL加入800 μL去离子水, 向其中加入125 μL Folin-Ciocalteu试剂, 混匀后在25℃下避光反应6 min; 再加入7%的碳酸钠溶液1.25 mL, 补加去离子水至3.0 mL, 充分混匀后, 在25℃下避光反应90 min; 反应结束后, 采用分光光度计测定波长760

nm处的吸光度; 以没食子酸标准溶液建立总酚含量测定的标准曲线, 测算浸提液中游离酚质量浓度(mg/mL), 并进一步计算藕粉中游离酚含量(mg/g干重)。

采用硝酸铝显色法测定上清液中总黄酮含量<sup>[20]</sup>: 取4 mL上清液加入0.3 mL 5%NaNO<sub>2</sub>, 混匀静置6 min; 再加入0.3 mL 10%Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, 混匀静置6 min; 加入4 mL 1.0 mol/L NaOH, 用80%乙醇定容至10 mL, 混匀静置15 min; 反应结束后, 采用分光光度计测定波长510 nm下的吸光度; 配制芦丁标准溶液建立总黄酮含量测定的标准曲线, 测算浸提液中总黄酮质量浓度(mg/mL), 并进一步计算藕粉中总黄酮含量(mg/g干重)。

1.3.3 藕粉的体外模拟消化 藕粉的体外模拟消化参考文献[21]的方法操作, 并稍作修改。取100 mg藕粉于15 mL离心管中, 加入10 mL人工唾液, 充分混匀后置于37℃振荡消化10 min。模拟口腔消化结束后, 于4℃离心(10 000 r/min)15 min分离口腔消化样液。离心管中沉淀物加入10 mL人工胃液, 充分混匀后置于37℃振荡消化2.0 h, 4℃离心分离胃消化样液。而沉淀物继续加入10 mL人工肠液, 充分混匀后置于37℃振荡消化1.5 h, 4℃离心分离肠消化样液。测定3种消化液中的总酚含量、总黄酮含量和抗氧化能力。

1.3.4 抗氧化能力测定 DPPH自由基清除能力参考文献[22]的方法测定, 并稍作修改。以无水乙醇溶解制备质量浓度为0.056 mg/mL的DPPH工作液, 于-20℃避光保存。向测试管1中加入2.00 mL DPPH溶液和1.00 mL无水乙醇, 摇匀后避光反应30 min, 测定波长517 nm处的吸光度(即为空白对照的吸光度A<sub>0</sub>)。向测试管2中加入2.00 mL DPPH溶液和1.00 mL待测样液, 反应结束后测定待测样液的吸光度A<sub>s</sub>。向测试管3中加入2.00 mL无水乙醇和1.00 mL待测样液, 反应结束后测定参比溶液的吸光度A<sub>r</sub>。样液的DPPH自由基清除率C(%)按公式(1)计算:

$$C = [1 - (A_s - A_r) / A_0] \times 100\% \quad (1)$$

FRAP总抗氧化能力采用试剂盒检测: 在96孔板的每个检测孔中加入180 μL的FRAP工作液, 空白对照中加入5 μL蒸馏水或消化液, 样品检测孔内加入5 μL不同样液, 轻轻混匀, 于37℃

孵育 4 min 后测定波长 593 nm 处的吸光值,并参考试剂盒说明书计算总抗氧化能力(mmol/L)。

#### 1.4 数据分析

采用 SPSS 23.0 软件分析试验数据,结果用“平均值±标准偏差”(n=3)表示,并以 Origin 8.5 软件作图。组间数据在 0.05 水平的显著性差异采用单因素方差分析中的最小显著差异法判定,组间数据的相关性采用 Pearson 法分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 热处理对莲藕中游离酚和游离黄酮含量的影响

不同品种和不同生长期莲藕中游离酚的平均含量为 21.33 mg/g dw(变异系数达 13.38%),而游离黄酮的平均含量为 44.66 mg/g dw(变异系数达 16.15%),其中 WZ2-S6 的游离黄酮含量显著高于其它藕样( $P<0.05$ )。如表 1 和表 2 所示,随着生长期的延长,EL5 藕中游离酚和游离黄酮含量均显著增加( $P<0.05$ ),而 WZ2 藕中含量则显著减少( $P<0.05$ )。据文献报道,13 个品种莲藕食用部位中可提取总酚含量的变异系数达 20.87%,可提取总

黄酮含量的变异系数达 33.33%,且 WZ2 品种中含量显著高于 EL5 和 EL6 品种( $P<0.05$ )<sup>[23]</sup>。

热处理后莲藕中可提取酚类物质含量呈下降趋势:常压热处理样品中平均游离酚含量和平均游离黄酮含量分别降低了 16.97%和 32.83%,而高压热处理样品分别降低了 32.73%和 50.01%。有研究表明,山楂汁在经过热处理后其酚酸类化合物含量显著降低 3.98%~5.98%<sup>[24]</sup>。蒸制能降低葫芦果酚类物质的含量与抗氧化活性,是因为在高温处理下,植物细胞壁及内部结构被破坏,导致部分酚类物质流出损失,且加热过长时间会导致酚类物质等活性成分降解<sup>[25]</sup>。另有文献指出,加热处理后,酚类物质将发生组成成分的降解或聚合,导致其结构的改变,或产生其它新物质,从而影响其性质<sup>[23,26]</sup>。此外,酚类物质主要位于完整植物细胞液泡中,热处理能破坏细胞结构,引发多酚与细胞壁多糖和淀粉的相互作用,从而导致游离酚含量减少<sup>[27-29]</sup>。由此推测,莲藕经热处理后,其酚类物质可能发生流失、热降解、聚合等,导致可检测的游离态含量减少。

表 1 热处理对莲藕中游离酚含量及其消化释放的影响

Table 1 Effect of heating treatment on the free phenol content of lotus roots and its release by simulated digestion

品种	处理方式	游离酚含量/mg·g <sup>-1</sup> dw				
		游离态含量	唾液消化释放	胃液消化释放	肠液消化释放	消化释放总量
EL5-S6	未加热	19.24 ± 1.04 <sup>Ca</sup>	14.89 ± 0.24 <sup>Cxc</sup>	10.08 ± 0.23 <sup>Ab</sup>	3.51 ± 0.07 <sup>Bc</sup>	28.48 ± 0.32 <sup>Bc</sup>
	常压加热	17.01 ± 0.29 <sup>Bb</sup>	10.15 ± 0.16 <sup>Bd</sup>	15.89 ± 0.15 <sup>Bc</sup>	4.83 ± 0.17 <sup>Cc</sup>	30.87 ± 0.11 <sup>Cc</sup>
	高压加热	14.03 ± 0.50 <sup>Ab</sup>	8.80 ± 0.07 <sup>Ab</sup>	10.34 ± 0.11 <sup>Aa</sup>	3.28 ± 0.04 <sup>Ad</sup>	22.42 ± 0.17 <sup>Ac</sup>
EL6-S6	未加热	19.06 ± 0.49 <sup>Ca</sup>	13.78 ± 0.58 <sup>Ca</sup>	8.22 ± 0.06 <sup>Aa</sup>	2.28 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	24.28 ± 0.61 <sup>Ba</sup>
	常压加热	17.91 ± 0.83 <sup>Bb</sup>	9.78 ± 0.18 <sup>Bc</sup>	14.78 ± 0.37 <sup>Cb</sup>	4.43 ± 0.10 <sup>Cb</sup>	28.99 ± 0.44 <sup>Cb</sup>
	高压加热	13.84 ± 0.05 <sup>Ab</sup>	8.73 ± 0.08 <sup>Ab</sup>	10.07 ± 0.47 <sup>Ba</sup>	2.92 ± 0.05 <sup>Bbc</sup>	21.72 ± 0.55 <sup>Ab</sup>
WZ2-S6	未加热	25.38 ± 1.20 <sup>Cc</sup>	19.34 ± 0.19 <sup>Cl</sup>	12.86 ± 0.17 <sup>Bc</sup>	3.62 ± 0.05 <sup>Bc</sup>	35.83 ± 0.26 <sup>Bf</sup>
	常压加热	22.12 ± 1.06 <sup>Bd</sup>	13.65 ± 0.10 <sup>Bf</sup>	19.72 ± 0.45 <sup>Cc</sup>	6.01 ± 0.28 <sup>Cl</sup>	39.37 ± 0.30 <sup>Cc</sup>
	高压加热	15.49 ± 0.94 <sup>Ac</sup>	10.27 ± 0.15 <sup>Ac</sup>	11.45 ± 0.38 <sup>Ac</sup>	2.28 ± 0.15 <sup>Aa</sup>	24.00 ± 0.21 <sup>Ad</sup>
EL5-S9	未加热	24.13 ± 1.31 <sup>Cc</sup>	15.28 ± 0.58 <sup>Bc</sup>	13.53 ± 0.49 <sup>Cl</sup>	3.35 ± 0.16 <sup>Bb</sup>	32.15 ± 0.71 <sup>Cc</sup>
	常压加热	14.31 ± 0.88 <sup>Ba</sup>	7.55 ± 0.26 <sup>Ab</sup>	11.10 ± 0.23 <sup>Ba</sup>	3.69 ± 0.10 <sup>Ca</sup>	22.34 ± 0.58 <sup>Ba</sup>
	高压加热	12.65 ± 0.11 <sup>Aa</sup>	7.64 ± 0.15 <sup>Aa</sup>	10.09 ± 0.27 <sup>Aa</sup>	2.80 ± 0.07 <sup>Ab</sup>	20.53 ± 0.10 <sup>Aa</sup>
HQ-S9	未加热	18.70 ± 0.57 <sup>Ca</sup>	14.14 ± 0.38 <sup>Cab</sup>	10.03 ± 0.46 <sup>Ab</sup>	2.36 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	26.53 ± 0.78 <sup>Cb</sup>
	常压加热	14.26 ± 0.66 <sup>Ba</sup>	6.65 ± 0.05 <sup>Aa</sup>	11.33 ± 0.17 <sup>Ba</sup>	4.06 ± 0.05 <sup>Cab</sup>	22.04 ± 0.13 <sup>Ba</sup>
	高压加热	12.02 ± 0.27 <sup>Aa</sup>	7.54 ± 0.29 <sup>Ba</sup>	9.84 ± 0.12 <sup>Aa</sup>	2.87 ± 0.17 <sup>Bb</sup>	20.25 ± 0.23 <sup>Aa</sup>
WZ2-S9	未加热	21.46 ± 0.71 <sup>Bb</sup>	13.68 ± 0.54 <sup>Ba</sup>	12.66 ± 0.37 <sup>Bc</sup>	3.93 ± 0.07 <sup>Bd</sup>	30.27 ± 0.95 <sup>Bd</sup>
	常压加热	20.65 ± 0.11 <sup>Bc</sup>	10.67 ± 0.16 <sup>Ac</sup>	18.00 ± 0.15 <sup>Cl</sup>	6.48 ± 0.41 <sup>Cc</sup>	35.15 ± 0.53 <sup>Cl</sup>
	高压加热	18.04 ± 1.10 <sup>Ad</sup>	10.46 ± 0.50 <sup>Ac</sup>	10.87 ± 0.16 <sup>Ab</sup>	3.08 ± 0.04 <sup>Ac</sup>	24.41 ± 0.32 <sup>Ad</sup>

注:不同大写字母表示同一品种、不同热处理方式的显著性差异( $P<0.05$ );不同小写字母表示不同品种、相同热处理方式的显著性差异( $P<0.05$ )。

表2 热处理对莲藕中游离黄酮含量及其消化释放的影响

Table 2 Effects of heating treatment on the free flavonoid content of lotus roots and its release by simulated digestion

品种	处理方式	游离黄酮含量/mg·g <sup>-1</sup> dw				
		游离态含量	唾液消化释放	胃液消化释放	肠液消化释放	消化释放总量
EL5-S6	未加热	40.43 ± 0.37 <sup>Cl</sup>	17.49 ± 0.43 <sup>Ca</sup>	5.01 ± 0.18 <sup>Cl</sup>	2.08 ± 0.28 <sup>Bab</sup>	24.59 ± 0.18 <sup>Ba</sup>
	常压加热	26.97 ± 0.72 <sup>Bb</sup>	12.06 ± 0.14 <sup>Ab</sup>	4.28 ± 0.09 <sup>Ba</sup>	1.52 ± 0.24 <sup>Ab</sup>	17.86 ± 0.22 <sup>Aa</sup>
	高压加热	20.45 ± 0.75 <sup>Ab</sup>	13.46 ± 0.33 <sup>Ba</sup>	3.21 ± 0.09 <sup>Aa</sup>	1.28 ± 0.13 <sup>Aa</sup>	17.95 ± 0.54 <sup>Aa</sup>
EL6-S6	未加热	36.82 ± 0.44 <sup>Ca</sup>	19.23 ± 0.09 <sup>Cl</sup>	3.39 ± 0.05 <sup>Aa</sup>	2.07 ± 0.79 <sup>Ab</sup>	24.69 ± 0.90 <sup>Ba</sup>
	常压加热	21.96 ± 0.37 <sup>Ba</sup>	11.66 ± 0.13 <sup>Ab</sup>	5.55 ± 0.54 <sup>Bb</sup>	1.62 ± 0.05 <sup>Ab</sup>	18.83 ± 0.65 <sup>Aa</sup>
	高压加热	18.82 ± 0.52 <sup>Ba</sup>	14.32 ± 0.66 <sup>Bbc</sup>	3.67 ± 0.09 <sup>Ab</sup>	2.16 ± 0.43 <sup>Ab</sup>	20.14 ± 0.23 <sup>Ab</sup>
WZ2-S6	未加热	56.79 ± 1.50 <sup>Cl</sup>	26.98 ± 1.02 <sup>Cl</sup>	4.77 ± 0.23 <sup>Bcl</sup>	2.74 ± 0.84 <sup>Ab</sup>	34.50 ± 0.92 <sup>Cc</sup>
	常压加热	41.92 ± 2.25 <sup>Bc</sup>	22.43 ± 0.85 <sup>Bcl</sup>	7.22 ± 0.14 <sup>Cc</sup>	2.10 ± 0.19 <sup>Ac</sup>	31.75 ± 0.86 <sup>Bc</sup>
	高压加热	31.00 ± 0.46 <sup>Bcl</sup>	20.23 ± 0.18 <sup>Bcl</sup>	3.66 ± 0.17 <sup>Ab</sup>	1.75 ± 0.23 <sup>Ab</sup>	25.64 ± 0.31 <sup>Bcl</sup>
EL5-S9	未加热	46.93 ± 0.71 <sup>Bc</sup>	25.11 ± 0.05 <sup>Cl</sup>	3.78 ± 0.13 <sup>Bb</sup>	1.24 ± 0.09 <sup>Aa</sup>	30.13 ± 0.23 <sup>Bc</sup>
	常压加热	22.69 ± 3.05 <sup>Aa</sup>	11.20 ± 0.33 <sup>Ba</sup>	6.07 ± 0.23 <sup>Cl</sup>	1.39 ± 0.05 <sup>Aa</sup>	18.65 ± 0.26 <sup>Aa</sup>
	高压加热	20.75 ± 0.10 <sup>Ab</sup>	14.20 ± 0.24 <sup>Bb</sup>	3.20 ± 0.05 <sup>Aa</sup>	1.24 ± 0.14 <sup>Aa</sup>	18.65 ± 0.41 <sup>Aa</sup>
HQ-S9	未加热	39.90 ± 0.27 <sup>Cl</sup>	22.88 ± 0.53 <sup>Cc</sup>	3.23 ± 0.09 <sup>Aa</sup>	1.26 ± 0.18 <sup>Aa</sup>	27.36 ± 0.74 <sup>Cl</sup>
	常压加热	26.89 ± 0.30 <sup>Bb</sup>	11.38 ± 0.33 <sup>Ab</sup>	4.87 ± 0.10 <sup>Ba</sup>	1.70 ± 0.18 <sup>Ab</sup>	17.94 ± 0.58 <sup>Aa</sup>
	高压加热	21.65 ± 0.10 <sup>Ac</sup>	14.86 ± 0.09 <sup>Bc</sup>	3.40 ± 0.18 <sup>Aa</sup>	1.63 ± 0.41 <sup>Ab</sup>	19.89 ± 0.60 <sup>Bb</sup>
WZ2-S9	未加热	47.06 ± 0.96 <sup>Cc</sup>	26.82 ± 1.17 <sup>Bc</sup>	4.09 ± 0.05 <sup>Bc</sup>	1.53 ± 0.18 <sup>Aa</sup>	32.44 ± 1.19 <sup>Cl</sup>
	常压加热	39.54 ± 0.10 <sup>Bc</sup>	20.69 ± 0.39 <sup>Ac</sup>	6.81 ± 0.64 <sup>Cc</sup>	2.38 ± 0.14 <sup>Bc</sup>	29.88 ± 0.91 <sup>Bb</sup>
	高压加热	21.30 ± 0.56 <sup>Abc</sup>	19.74 ± 0.09 <sup>Bcl</sup>	3.34 ± 0.09 <sup>Aa</sup>	1.70 ± 0.33 <sup>Ab</sup>	24.79 ± 0.22 <sup>Ac</sup>

注:不同大写字母表示同一品种、不同热处理方式的显著性差异( $P < 0.05$ );不同小写字母表示不同品种、相同热处理方式的显著性差异( $P < 0.05$ )。

## 2.2 热处理对莲藕中酚类物质消化释放的影响

采用体外静态消化模型研究藕粉样品消化过程中的酚类物质释放规律,发现其主要在唾液消化和胃液消化过程中大量释放。对于不同品种及不同生长期的未处理莲藕样品,多酚释放量以唾液消化(15.18±2.13)mg/g dw>胃液消化(11.23±2.09)mg/g dw>肠液消化(3.18±0.69)mg/g dw。莲藕经加热处理后,其酚类物质释放规律显著改变,以胃液消化释放量>唾液消化释放量>肠液消化释放量。其中,常压加热藕粉在口腔、胃腔和肠腔阶段的平均酚类物质释放量分别为(9.74±0.15), (15.14±0.25), (4.92±0.18)mg/g dw,而高压加热藕粉分别为(8.91±0.21), (10.44±0.25), (2.87±0.09)mg/g dw。未加热的藕粉经口腔消化阶段后,游离酚含量显著低于未消化阶段,可能是藕粉中的酚类化合物直接和唾液中的 $\alpha$ -淀粉酶结合,产生大分子聚合物,从而降低酚类化合物含量<sup>[30]</sup>。相对于口腔消化阶段,经过胃腔消化后,测得的游离酚含

量小幅度降低,且经肠消化后酚类化合物的含量最低。可能因为酚类化合物对肠消化的弱碱性环境很敏感,从而降低其稳定性<sup>[31]</sup>。有研究表明软枣猕猴桃整果酚类提取物中总酚含量的变化趋势为:未消化>口腔>胃>小肠,与本研究结果一致<sup>[32]</sup>。而绿茶、橘皮、大豆的总酚提取物含量相较于未消化阶段,经口腔消化阶段后显著降低,而在胃、肠腔阶段呈先降低再升高再降低的趋势<sup>[33]</sup>。说明消化过程会使酚类物质的释放含量逐渐降低,且不同消化阶段对酚类物质释放量的影响不同。

热处理显著减少藕粉唾液消化阶段中的酚类物质释放,而常压加热可能增加胃液和肠液消化阶段的释放量。一般情况下,酚类化合物在胃部酸性条件下稳定,而且酸性条件有利于酚类化合物从与之结合的食物基质(蛋白质、淀粉、膳食纤维和木质素)中释放出来,因此胃消化液的游离酚含量升高<sup>[34]</sup>。且有文献表明,黑青稞在胃消化过程中酚类物质释放量显著升高,是由于在胃蛋白酶的

作用下有利于酚类化合物从与之结合的食物基质中释放出来,从而使可测定的游离酚含量增加<sup>[35]</sup>。特别地,EL5-S6、EL6-S6、WZ2-S6和WZ2-S9经常压热处理后的可消化释放总酚量有所增加。可能是因为热处理能够促进酚类物质与淀粉分子之间的相互作用,促使部分莲藕酚类物质在高温下与莲藕淀粉生成聚合物,导致部分游离酚转化成结合酚,再经过胃消化酶、胰酶作用及其强酸环境,结合态多酚逐渐变成游离多酚,从而导致总酚含量有所提高<sup>[36]</sup>。说明热处理能增加莲藕中酚类物质在胃液消化的释放量,且WZ2-S6在100℃常压加热的效果最好,其可消化总量最高达39.37 mg/g dw。

### 2.3 热处理对莲藕中黄酮类物质消化释放的影响

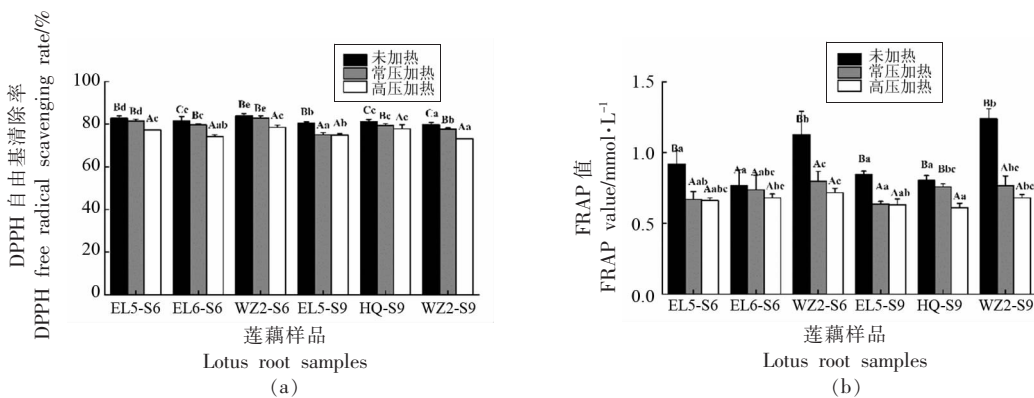
藕粉样品中黄酮类物质主要在唾液中大量释放,对于不同品种及生长期的未处理莲藕样品,黄酮类物质释放量以唾液消化(23.92±0.55)mg/g dw>胃液消化(4.04±0.12)mg/g dw>肠液消化(1.82±0.39)mg/g dw。未加热的藕粉经过口腔和胃腔消化后,黄酮类化合物的含量相较于未消化阶段都显著下降。可能是由于在胃消化的酸性环境下,藕粉中游离黄酮被降解。这与之前大多数报道一致<sup>[28-29]</sup>,由于多种反应(提取、水解、释放、降解、去糖基化、酯化、氧化和裂解),胃消化过程也会造成一定程度上黄酮类化合物的损耗。根据Spinola等<sup>[37]</sup>的研究,浆果在模拟口腔消化过程中,总黄酮被大量释放,在胃肠消化过程中,被大量降解。藕粉可消化释放总黄酮含量低于游离黄酮含

量,可能是因为肠消化液中的胰酶能够水解黄酮与食物基质相互结合的化学键,中性或偏碱性黄酮可能在肠消化液介质中稳定,部分黄酮类化合物转化成结构更稳定的衍生物,不易被分解导致部分黄酮类物质在消化过程中没有被完全释放出来<sup>[38]</sup>。

经过加热处理后的藕粉样品,其黄酮类物质释放规律没有改变,以唾液消化释放量>胃液消化释放量>肠液消化释放量。其中常压加热藕样在口腔、胃腔、肠腔的3个消化阶段的平均黄酮类物质释放量分别为(14.90±0.36),(5.80±0.29),(1.78±0.14)mg/g dw,而高压加热藕样分别为(16.13±0.26),(3.41±0.11),(1.63±0.28)mg/g dw。除EL5-S6以外,其它藕粉样品在常压加热后,胃液的释放量显著增加,可能是胃腔环境的强酸性作用,使结合黄酮分解释放,导致测定含量升高<sup>[39]</sup>。经热处理后的可消化释放总黄酮含量均下降,可能是莲藕中结合态黄酮在消化液中没有被完全释放出来,或者在加热过程中有部分黄酮类物质损失。说明热处理可以使莲藕中黄酮类物质在消化阶段的总释放量显著减少。

### 2.4 热处理对莲藕抗氧化能力的影响

不同品种及不同生长期莲藕的平均DPPH自由基清除率为81.70%(变异系数1.86%),而平均FRAP值为0.95 mmol/L(变异系数19.94%),其中WZ2-S6的FRAP总抗氧化能力显著高于其它样品( $P<0.05$ )。如图1所示,随着生长期的延长,EL5和WZ2藕的DPPH自由基清除率均显著下降( $P<$



注:不同大写字母表示同一品种、不同热处理方式的显著性差异( $P<0.05$ );不同小写字母表示不同品种、相同热处理方式的显著性差异( $P<0.05$ )。

图1 莲藕热处理前、后的抗氧化能力比较

Fig.1 Comparison on the antioxidant capacity of lotus roots before and after heating treatment

0.05), 而 FRAP 值则无明显变化 ( $P>0.05$ )。

热处理后莲藕的抗氧化能力呈下降趋势, 常压加热样品的 DPPH 自由基清除率和 FRAP 值分别平均减少了 2.32% 和 0.22 mmol/L, 而高压加热样品则平均减少了 3.37% 和 0.29 mmol/L。藕粉抗氧化能力下降可能归因于可提取酚类物质含量减少, 其游离酚含量和游离黄酮含量与 DPPH 自由基清除率的相关性极显著 (Pearson 相关系数分别为 0.637 和 0.685), 且与 FRAP 总抗氧化能力的相关性亦极显著 (Pearson 相关系数分别为 0.742 和 0.781)。有研究表明草莓、樱桃、橘子和苹果热处理后的总酚含量和抗氧化活性均有所下降, 而藜麦籽在高温蒸制后的总酚含量和抗氧化活性明显增加<sup>[40-41]</sup>。说明酚类物质含量和抗氧化活性密切相关, 且热处理会影响食物抗氧化活性能力, 其原因可能与酚类物质的热分解、自聚合和氧化等反应有关。

## 2.5 热处理对莲藕模拟消化过程中抗氧化水平的影响

未加热藕粉的消化液 DPPH 自由基清除能力以胃液 (86.81%) > 唾液 (18.69%) > 肠液 (14.34%);

在胃消化阶段释放的 DPPH 自由基清除率与游离酚含量相关性显著 (Pearson 相关系数为 0.307)。有研究表明大豆和橘皮的 DPPH 抗氧化能力在胃腔消化阶段最高, 这可能是因为游离酚在胃腔消化过程中溶出而释放, 结合酚经胃消化酶的作用后释放, 导致抗氧化能力升高<sup>[33]</sup>。说明胃腔消化的酸性环境和胃蛋白酶可促进抗氧化活性物质的释放。

热处理导致莲藕在胃肠消化过程中的 DPPH 自由基清除能力有所下降, 尤其是高压加热后的胃消化液的 DPPH 自由基清除能力下降达 63.34% (变异系数达 14.20%)。有研究表明加热处理降低了香菜叶总酚含量及其抗氧化活性, 可能是加热抑制了香菜中不溶性酚类化合物的释放<sup>[42]</sup>。此外, 苦瓜、小麦和绿豆经加热后, 其总多酚含量和 DPPH 自由基清除率均显著降低<sup>[43]</sup>。如表 3 所示, 相比生长期 6 个月的藕样, 生长期 9 个月的藕样加热后, 在模拟消化过程中 DPPH 自由基可清除总量明显下降, 且 DPPH 自由基可清除总量与游离酚可消化总量相关性极显著 (Pearson 相关系数为 0.766)。

表 3 热处理对莲藕体外模拟消化过程中 DPPH 自由基清除能力的影响

Table 3 Effect of heating treatment on the DPPH radical scavenging capacity of lotus roots during the simulated digestion *in vitro*

品种	处理方式	DPPH 自由基清除率/%			DPPH 自由基可清除总量/mmol·L <sup>-1</sup>
		口腔消化液	胃腔消化液	肠腔消化液	
EL5-S6	未加热	18.91 ± 3.92 <sup>Ab</sup>	81.31 ± 3.52 <sup>Ba</sup>	17.24 ± 1.42 <sup>Ba</sup>	0.47 ± 0.03 <sup>Abc</sup>
	常压加热	29.36 ± 0.86 <sup>Bl</sup>	79.34 ± 0.70 <sup>Bb</sup>	10.90 ± 3.41 <sup>Ab</sup>	0.48 ± 0.02 <sup>bl</sup>
	高压加热	23.69 ± 2.47 <sup>Ac</sup>	72.87 ± 1.69 <sup>Ac</sup>	14.73 ± 0.13 <sup>ABl</sup>	0.45 ± 0.01 <sup>Ac</sup>
EL6-S6	未加热	16.05 ± 0.40 <sup>Aa</sup>	86.75 ± 1.22 <sup>Cb</sup>	12.87 ± 2.66 <sup>Ba</sup>	0.46 ± 0.01 <sup>Bab</sup>
	常压加热	26.46 ± 3.14 <sup>Bxl</sup>	80.82 ± 0.81 <sup>Bc</sup>	4.08 ± 1.41 <sup>Aa</sup>	0.45 ± 0.11 <sup>Bc</sup>
	高压加热	18.04 ± 0.50 <sup>Aa</sup>	73.38 ± 0.40 <sup>Ac</sup>	11.96 ± 0.50 <sup>Bc</sup>	0.41 ± 0.01 <sup>Ab</sup>
WZ2-S6	未加热	16.98 ± 1.29 <sup>Aa</sup>	92.08 ± 0.55 <sup>Cc</sup>	12.62 ± 4.07 <sup>Aa</sup>	0.49 ± 0.02 <sup>Bbc</sup>
	常压加热	27.23 ± 4.60 <sup>Bxl</sup>	87.54 ± 0.29 <sup>Be</sup>	11.28 ± 1.51 <sup>Ab</sup>	0.50 ± 0.01 <sup>Bc</sup>
	高压加热	18.94 ± 0.38 <sup>Aa</sup>	67.72 ± 0.41 <sup>Ab</sup>	12.30 ± 2.38 <sup>Ac</sup>	0.40 ± 0.02 <sup>Ab</sup>
EL5-S9	未加热	21.98 ± 1.96 <sup>Ab</sup>	89.66 ± 0.56 <sup>Cbc</sup>	16.37 ± 4.18 <sup>Ba</sup>	0.51 ± 0.02 <sup>Cc</sup>
	常压加热	22.79 ± 3.32 <sup>Abc</sup>	68.71 ± 0.79 <sup>Ba</sup>	7.06 ± 0.47 <sup>Aa</sup>	0.39 ± 0.01 <sup>Bb</sup>
	高压加热	20.35 ± 0.11 <sup>Ab</sup>	56.26 ± 1.25 <sup>Aa</sup>	7.04 ± 0.54 <sup>Ab</sup>	0.33 ± 0.01 <sup>Aa</sup>
HQ-S9	未加热	18.26 ± 2.38 <sup>Ab</sup>	83.31 ± 1.84 <sup>Ca</sup>	14.48 ± 1.46 <sup>Ba</sup>	0.46 ± 0.02 <sup>Ca</sup>
	常压加热	16.36 ± 3.28 <sup>Aa</sup>	68.71 ± 1.30 <sup>Ba</sup>	5.79 ± 0.15 <sup>Aa</sup>	0.36 ± 0.01 <sup>Ba</sup>
	高压加热	19.24 ± 1.28 <sup>Aa</sup>	55.48 ± 1.31 <sup>Aa</sup>	5.53 ± 1.01 <sup>Ab</sup>	0.32 ± 0.01 <sup>Aa</sup>
WZ2-S9	未加热	19.94 ± 3.06 <sup>Ab</sup>	87.77 ± 0.32 <sup>Cb</sup>	12.45 ± 1.58 <sup>Ba</sup>	0.48 ± 0.01 <sup>Cbc</sup>
	常压加热	18.01 ± 3.22 <sup>Ab</sup>	85.90 ± 0.46 <sup>Bl</sup>	11.13 ± 0.20 <sup>Bb</sup>	0.46 ± 0.01 <sup>Bcl</sup>
	高压加热	22.43 ± 1.06 <sup>Abc</sup>	54.31 ± 0.60 <sup>Aa</sup>	3.82 ± 1.18 <sup>Aa</sup>	0.32 ± 0.01 <sup>Aa</sup>

注: 不同大写字母表示同一品种、不同热处理方式的显著性差异 ( $P<0.05$ ); 不同小写字母表示不同品种、相同热处理方式的显著性差异 ( $P<0.05$ )。

未加热藕粉消化液的 FRAP 抗氧化能力以唾液 (0.84 mmol/L) > 胃液 (0.29 mmol/L) > 肠液 (0.26 mmol/L); 其中 WZ2 藕的 FRAP 值显著高于其它藕样 ( $P < 0.05$ )。莲藕在口腔消化阶段释放的 FRAP 值与游离酚含量和游离黄酮含量相关性极显著 (Pearson 相关系数为 0.715 和 0.735), 有研究表明, 酸浆茎在模拟消化后, 消化液  $Fe^{3+}$  还原能力变强, 尤其在含有  $\alpha$ -淀粉酶的口腔消化过程中的还原能力最强<sup>[44]</sup>。

热处理导致莲藕在胃消化过程中的 FRAP 值升高, 尤其是常压加热后的 FRAP 值上升达 0.41 mmol/L (变异系数达 20.48%)。有研究表明加热处

理会提高甜玉米的 FRAP 值, 可能是高温处理促进了酚类物质和其它内部分子的相互协同作用, 从而显著提高其抗氧化活性<sup>[45]</sup>。如表 4 所示, 相比生长期 6 个月的藕样, 生长期 9 个月的藕样加热后在模拟消化过程中  $Fe^{3+}$  可还原总量明显下降, 且  $Fe^{3+}$  可还原总量与游离黄酮可消化总量相关性极显著 (Pearson 相关系数为 0.797)。由此看出, 酚类物质含量与抗氧化活性之间的相关性, 除了与抗氧化活性的测定方法有关, 还可能与加热导致酚类物质的成分、游离或结合状态及消化液等有关<sup>[46]</sup>。

表 4 热处理对莲藕体外模拟消化过程中 FRAP 抗氧化能力的影响

Table 4 Effect of heating treatment on the FRAP capacity of lotus roots during the simulated digestion *in vitro*

品种	处理方式	FRAP 抗氧化能力 / mmol · L <sup>-1</sup>			可还原 Fe <sup>3+</sup> 总量 / mmol · L <sup>-1</sup>
		口腔消化液	胃腔消化液	肠腔消化液	
EL5-S6	未加热	0.70 ± 0.17 <sup>Ab</sup>	0.28 ± 0.02 <sup>Ba</sup>	0.27 ± 0.02 <sup>Ba</sup>	1.24 ± 0.18 <sup>Abc</sup>
	常压加热	0.49 ± 0.03 <sup>Bd</sup>	0.37 ± 0.02 <sup>Bb</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	1.11 ± 0.06 <sup>Ad</sup>
	高压加热	0.74 ± 0.02 <sup>Ac</sup>	0.34 ± 0.02 <sup>Ac</sup>	0.23 ± 0.03 <sup>Abd</sup>	1.31 ± 0.06 <sup>Ac</sup>
EL6-S6	未加热	0.76 ± 0.06 <sup>Aa</sup>	0.22 ± 0.02 <sup>Cb</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>Ba</sup>	1.22 ± 0.07 <sup>Bab</sup>
	常压加热	0.58 ± 0.03 <sup>Bcd</sup>	0.37 ± 0.03 <sup>Bc</sup>	0.22 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	1.18 ± 0.07 <sup>Bc</sup>
	高压加热	0.69 ± 0.03 <sup>Aa</sup>	0.35 ± 0.02 <sup>Ac</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>Bc</sup>	1.29 ± 0.06 <sup>Ab</sup>
WZ2-S6	未加热	1.11 ± 0.05 <sup>Aa</sup>	0.37 ± 0.02 <sup>Cc</sup>	0.28 ± 0.03 <sup>Aa</sup>	1.75 ± 0.06 <sup>Bbc</sup>
	常压加热	0.69 ± 0.04 <sup>Bcd</sup>	0.51 ± 0.02 <sup>Bc</sup>	0.27 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	1.46 ± 0.06 <sup>Bc</sup>
	高压加热	0.73 ± 0.04 <sup>Aa</sup>	0.42 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	0.25 ± 0.02 <sup>Ac</sup>	1.40 ± 0.07 <sup>Ab</sup>
EL5-S9	未加热	0.87 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>Cbc</sup>	0.27 ± 0.02 <sup>Ba</sup>	1.51 ± 0.06 <sup>Cc</sup>
	常压加热	0.40 ± 0.02 <sup>Abc</sup>	0.37 ± 0.02 <sup>Ba</sup>	0.24 ± 0.03 <sup>Aa</sup>	1.01 ± 0.06 <sup>Bb</sup>
	高压加热	0.60 ± 0.04 <sup>Ab</sup>	0.38 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	1.22 ± 0.07 <sup>Aa</sup>
HQ-S9	未加热	0.74 ± 0.08 <sup>Ab</sup>	0.25 ± 0.02 <sup>Ca</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>Ba</sup>	1.23 ± 0.09 <sup>Ca</sup>
	常压加热	0.49 ± 0.04 <sup>Aa</sup>	0.30 ± 0.05 <sup>Ba</sup>	0.21 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	1.01 ± 0.06 <sup>Ba</sup>
	高压加热	0.58 ± 0.03 <sup>Aa</sup>	0.34 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	1.16 ± 0.07 <sup>Aa</sup>
WZ2-S9	未加热	1.07 ± 0.03 <sup>Ab</sup>	0.29 ± 0.03 <sup>Cb</sup>	0.25 ± 0.03 <sup>Ba</sup>	1.61 ± 0.06 <sup>Cc</sup>
	常压加热	0.53 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	0.51 ± 0.01 <sup>Bd</sup>	0.26 ± 0.03 <sup>Bb</sup>	1.30 ± 0.01 <sup>Bcd</sup>
	高压加热	0.71 ± 0.02 <sup>Abc</sup>	0.37 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	0.25 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	1.33 ± 0.07 <sup>Aa</sup>

注: 不同大写字母表示同一品种、不同热处理方式的显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 不同小写字母表示不同品种、相同热处理方式的显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

### 3 结论

莲藕中富含酚类物质, 表现出良好的抗氧化能力。热处理导致莲藕中游离酚和游离黄酮含量减少, 并伴随抗氧化能力的降低。未加热的莲藕在口腔、胃腔、肠腔消化过程中酚类物质的释放量逐渐减少。而莲藕经热处理后, 消化过程中的酚类物

质主要在唾液和胃液消化过程中大量释放。其中在胃腔消化过程中游离酚释放含量升高, 而游离黄酮释放含量显著降低, 且热处理导致消化液的抗氧化能力变化与酚类物质含量的变化有关。由此说明, 热处理会改变莲藕中酚类物质和黄酮类物质的生物可及性及消化释放规律, 并可能影响

其营养功效。然而,对于未消化组分在大肠中的微生物酵解利用情况有待进一步探究。热处理是莲藕烹饪和产品加工的常规手段,继续深入解析加热对莲藕营养成分组成、结构、生物利用与功效的影响,对指导产品加工工艺优化有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 周玮婧,李书艺,王文娟. 莲藕节中多酚提取物体外抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2016, 41(12): 158-162.  
ZHOU W J, LI S Y, WANG W J. *In vitro* determination of antioxidant activity of polyphenol from lotus rhizome node[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(12): 158-162.
- [2] 孙杰,陆双双,徐燕燕,等. 莲藕不同部位酚类物质含量、组成及抗氧化活性比较[J]. 武汉轻工大学学报, 2015, 34(2): 20-25.  
SUN J, LU S S, XU Y Y, et al. Comparison on the content, composition and antioxidant activity of phenolics among different parts of lotus root[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2015, 34(2): 20-25.
- [3] 谢君,周白雪,闵婷,等. 莲藕不同极性酚类物质组成分析及抗氧化活性评价[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 189-192.  
XIE J, ZHOU B X, MIN T, et al. Composition analysis and antioxidant activity evaluation of different polar phenols in lotus root[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(17): 189-192.
- [4] 郝转,刘安琪,王志平. 莲藕多酚抗氧化特性的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(12): 4-6.  
HAO Z, LIU A Q, WANG Z P. Research progress on antioxidant properties of lotus rhizome polyphenol [J]. Grain and Fat, 2017, 30(12): 4-6.
- [5] 朱晓平. 《中国药膳大辞典》《中医食疗方全录》药膳食疗常用中药应用情况研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.  
ZHU X P. A study on documentary origins and uses of traditional Chinese medicines commonly adopted for medicated diet & food therapy listed in chinese medicated diet dictionary and full recording of food therapy recipes of the traditional Chinese medicine [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2006.
- [6] 罗丽,王顺民,徐为雯,等. 超声-热处理鲜切莲藕贮藏期间品质变化的研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(24): 203-210.  
LUO L, WANG S M, XU W W, et al. Study the quality change of fresh-cut lotus root during storage with ultrasound-heat treatment[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(24): 203-210.
- [7] 代雨杉,马秀菊,毕秀芳. 超声波结合热处理对莲藕多酚氧化酶和过氧化物酶钝化效果研究[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(5): 20-26.  
DAI Y S, MA X J, BI X F. Study on the inactivation of polyphenol oxidase and peroxidase in lotus root by heat treatment and ultrasound[J]. Packaging & Food Machinery, 2021, 39(5): 20-26.
- [8] 谢玮. 不同品种莲藕细胞壁组分与热处理后质地差异关系研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.  
XIE W. Study on the relationship between cell wall components and texture variation of different cultivars lotus rhizomes after thermal pre-treatment [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [9] 罗庆. 不同品种莲藕的风味特性及加工稳定性研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015.  
LUO Q. Study on the flavor characteristics and processing stability of different varieties of lotus root[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2015.
- [10] NICOLI M C, ANESE M, PARPINEL M T. Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 1999, 10(3): 94-100.
- [11] 马占倩,吴娜娜,易翠平,等. 热加工过程对植物酚类物质结构、含量及抗氧化活性影响研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 152-159.  
MA Z Q, WU N N, YI C P, et al. Advances in studies on the effects of thermal processing on the structure, content and antioxidant activity of phenolic compounds in plants [J]. Food and Machinery, 2018, 34(12): 152-159.
- [12] 周浩宇,俞明君,聂远洋,等. 热加工方式对香菇营养特性和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 106-114.  
ZHOU Y H, YU M J, NIE Y Y, et al. Effects of heat processing methods on nutritional properties and antioxidant activity of *Lentinus edodes*[J]. Food Science, 2021, 42(15): 106-114.
- [13] 马艺超. 不同热加工对苦荞制品功能成分、质构及体外消化的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.  
MA Y C. Effects of thermal processing on functional



- components, texture of Tartary buckwheat products and simulated digestion *in vitro* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [14] 王智能, 王允, 吴光旭, 等. 体外模拟胃肠消化对不同热处理荷叶中酚类物质释放量及抗氧化活性的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(10): 1975–1982.  
WANG Z N, WANG Y, WU G X, et al. Effects of simulated *in vitro* gastrointestinal digestion on phenolics release and antioxidant activity in different heat treatment lotus leaves[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(10): 1975–1982.
- [15] 忻晓庭, 刘大群, 郑美瑜, 等. 热风干燥温度对冰菜干燥动力学、多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 148–156.  
XIN X T, LIU D Q, ZHENG M Y, et al. Effects of hot air drying temperature on drying kinetics, polyphenol content and antioxidant activity of frozen vegetable [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 148–156.
- [16] 蒋娟, 姜丽, 傅淋然, 等. 鲜切莲藕褐变期间酚类提取及其对自由基的清除能力(英文)[J]. 食品科学, 2013, 34(15): 32–37.  
JIANG J, JIANG L, FU L R, et al. Study on the extraction of phenols in fresh-cut lotus root during browning and the effect on scavenging free radicals [J]. Food Science, 2013, 34(15): 32–37.
- [17] 刘珮, 王建辉, 吴佳丽, 等. 莲藕脆片组合干燥过程中的抗氧化性变化研究[J]. 天津农学院学报, 2016, 23(3): 6–10.  
LIU P, WANG J H, WU J L, et al. Changes in antioxidant activity of lotus root chips during combination drying[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2016, 23(3): 6–10.
- [18] 易阳, 艾有伟, 王宏勋. 莲藕总黄酮的超声波提取工艺优化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(13): 207–212.  
YI Y, AI Y W, WANG H X. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of total flavonoids from lotus root[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(13): 207–212.
- [19] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTOS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent[J]. Methods in Enzymology, 1999, 299: 152–178.
- [20] JIA Z S, TANG M C, WU J M. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals[J]. Food Chemistry, 1999, 64(4): 555–559.
- [21] YI Y, ZHONG Z T, HUANG F, et al. Structural and biological properties of polysaccharides from lotus root[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 454–461.
- [22] BRAND-WILLIAMS W, CUVELIER M E, BERSET C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity[J]. LWT—Food Science and Technology, 1995, 28: 25–30.
- [23] YI Y, SUN J, XIE J, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of lotus root varieties[J]. Molecules, 2016, 21(7): 863.
- [24] 娄新曼, 林雅文, 彭飞, 等. 超高压及热处理对浑浊型山楂(*Crataegus pinnatifida*)果汁中酚类化合物组成、抗氧化活性及其体外模拟消化过程释放/转化影响研究[C]. 中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集, 2020: 418–419.  
LOU X M, LIN Y W, PENG F, et al. Effect of high pressure processing and thermal processing on phenolic profiles and antioxidant activity from cloudy Chinese organic hawthorn berry (*Crataegus pinnatifida*) juice and influence on the release and transformation of antioxidant phenolics during *in vitro* gastrointestinal digestion[C]. Abstracts of the 17<sup>th</sup> Annual Meeting of CIFST, 2020: 418–419.
- [25] AHMED D, ASHIQ N. *In vitro* analysis of anti-diabetic and anti-oxidative potential of pedicles of fruit-vegetable bottle gourd[J]. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 2018, 31(6): 2497–2501.
- [26] 刘婷婷, 包佳微, 李嘉欣, 等. 加工方式对豆类中酚类物质的影响研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(4): 56–62.  
LIU T T, BAO J W, LI J X, et al. Research progress on effects of processing methods on phenolic compounds in beans[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019, 31(4): 56–62.
- [27] SIEMINSKA-KUCZER A, SZYMANSKA-CHARGO M, ZDUNEK A. Recent advances in interactions between polyphenols and plant cell wall polysaccharides as studied using an adsorption technique[J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt.B): 1–11.
- [28] RENARD C, WATRELOT A, BOURYELLE C L. Interactions between polyphenols and polysaccharides: Mechanisms and consequences in food pro-

- cessing and digestion[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 60: 43-51.
- [29] 赵蓓蓓, 贾祥泽, 孙思薇, 等. 淀粉-多酚复合物理化及功能特性的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 297-303.
- ZHAO B B, JIA X Z, SUN S W, et al. Advances in physicochemical and functional properties of starch-polyphenol complex[J]. Food Science, 2018, 39(13): 297-303.
- [30] 丁阳平, 张曦, 周洁, 等. 没食子酸及其衍生物对 $\alpha$ -淀粉酶作用机制研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(2): 167-169.
- DING Y P, ZHANG X, ZHOU J, et al. The mechanism of gallic acid and its derivatives on  $\alpha$ -amylase [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(2): 167-169.
- [31] ORTEGA N, MARIA A, ROMERO M P, et al. Matrix composition effect on the digestibility of carob flour phenols by an *in-vitro* digestion model [J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 65-71.
- [32] 李斌, 张继月, 耿丽娟, 等. 软枣猕猴桃在体外模拟消化过程中酚类物质及抗氧化活性的变化规律[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 196-205.
- LI B, ZHANG J Y, GENG L J, et al. Changes of phenolics and antioxidant activities of kiwi berry (*Actinidia arguta*) during *in vitro* digestion[J]. Food Science, 2021, 42(23): 196-205.
- [33] 谢乐怡, 张兵, 李红艳. 绿茶、橘皮、大豆中酚类物质体外消化前后稳定性及抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 374-382.
- XIE L Y, ZHANG B, LI H Y. Study on the stability and antioxidant activity of phenolics in green tea, citrus peel and soybean before and after *in vitro* digestion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 374-382.
- [34] ZHU F. Interactions between starch and phenolic compound[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43(2): 129-143.
- [35] 张杰, 党斌, 张文刚, 等. 不同加工方式对体外模拟胃肠消化黑青稞酚类物质含量及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 78-86.
- ZHANG J, DANG B, ZHANG W G, et al. Effects of different processing methods on phenolic content and antioxidant activity of black hullless barley *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. Food Science, 2022, 43(21): 78-86.
- [36] DENG N, DENG Z, TANG C, et al. Formation, structure and properties of the starch-polyphenol inclusion complex: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 667-675.
- [37] SPINOLA V, LLORENT-MARTINEZ E J, CASTILHO P C. Antioxidant polyphenols of Madeira sorrel (*Rumex maderensis*) how do they survive to *in vitro* simulated gastrointestinal digestion [J]. Food Chemistry, 2018, 259: 105-112.
- [38] 饶雪甜, 曾新安, 林松毅, 等. 黑果腺肋花楸在体外模拟消化过程中酚类物质及抗氧化性的变化规律[J]. 现代食品科技, 2020, 36(12): 77-83.
- RAO X T, ZENG X A, LIN S Y, et al. Changing trends in the phenolic substances and antioxidant activities of chokeberry (*Aronia melanocarpa*) subjected to *in vitro* simulated digestion [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(12): 77-83.
- [39] SPINOLA V, PINTO J, LORENT-MARTNEZ E J, et al. Changes in the phenolic compositions of *E-laeagnus umbellata* and *Sambucus lanceolata* after *in vitro* gastrointestinal digestion and evaluation of their potential anti-diabetic properties[J]. Food Research International, 2019, 122: 283-294.
- [40] NICKEL J, SPANIER L P, BOTELHO F T, et al. Effect of different types of processing on the total phenolic compound content, antioxidant capacity, and saponin content of *Chenopodium quinoa* Willd grains[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 139-143.
- [41] RABABAH T M, AL-U'DATT M, AL-MAHASNEH M, et al. Effect of jam processing and storage on phytochemicals and physicochemical properties of cherry at different temperatures[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(1): 247-254.
- [42] SORAYA H, HOCINE R, KHODIR M. Effect of oven and microwave drying on phenolic compounds and antioxidant capacity of coriander leaves[J]. International Food Research Journal, 2017, 24(2): 503-509.
- [43] HITHAMANI G, SRINIVASAN K. Bioaccessibility of polyphenols from wheat (*Triticum aestivum*), sorghum (*Sorghum bicolor*), green gram (*Vigna radiata*), and chickpea (*Cicer arietinum*) as influenced by domestic food processing[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2014, 62(46): 11170-11179.
- [44] 李成华, 薛长松, 张伟豪. 半仿生法提取酸浆茎活性成分及抗氧化性规律[J]. 扬州大学学报(农业与生

命科学版), 2020, 41(5): 57-61.

LI C H, XUE C S, ZHANG W H. Use the method of semi-bionic to extract active ingredients from stem of *Physali alkekengi* L. and to study the antioxidant activity[J]. Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences), 2020, 41(5): 57-61.

[45] 黄龙, 张名位, 邓媛元, 等. 热处理对甜玉米酚类物质含量及抗氧化能力的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(9): 88-92.

HUANG L, ZHANG M W, DENG Y Y, et al. In-

fluences of heat treatments on the polyphenolic content and antioxidant activities of sweet corn [J]. Guangdong Agricultural Science, 2011, 38(9): 88-92.

[46] JAYAWARDENA N, WATAWANA M I, WAISUNDARA V Y. The total antioxidant capacity, total phenolics content and starch hydrolase inhibitory activity of fruit juices following pepsin (gastric) and pancreatic (duodenal) digestion[J]. Journal fur Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2015, 10(4): 349-357.

### Effects of Heat Treatment on the Digestive Release and Antioxidant Activity of Phenolic Compounds in Lotus Root

Wu Haoyi<sup>1</sup>, Wu Jinjin<sup>1</sup>, Yi Yang<sup>1\*</sup>, Sun Ying<sup>1</sup>, Wang Hongxun<sup>2</sup>, Peng Kaidi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Food Science and Engineering, Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023

<sup>2</sup>School of Life Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023)

**Abstract** The present study aimed to investigate the impact of heat treatment on the nutritional characteristics of fresh lotus root, considering its different varieties and growth stages. Specifically, the alterations in phenolic content, digestive features, and *in vitro* antioxidant capacity induced by steam heating were studied. The results showed that heat treatment led to a significant reduction in free phenols and free flavonoids in lotus roots ( $P < 0.05$ ), accompanied by a decrease in DPPH free radical scavenging ability and FRAP total antioxidant capacity. Notably, high-pressure heating resulted in a greater reduction compared to atmospheric heating. Furthermore, heat treatment significantly influenced the release of phenolic compounds during simulated digestion processes of lotus root. In unheat treated samples, the average amounts of released phenolic compounds were 15.18 mg/g dw in saliva, 11.23 mg/g dw in gastric juice, and 3.18 mg/g dw in intestinal juice; whereas for atmospheric heated samples these values were respectively 9.74, 15.14 mg/g dw and 4.92 mg/g dw. The order of DPPH free radical scavenging ability was found to be gastric juice > saliva > intestinal juice; while for FRAP antioxidant ability it was saliva > gastric juice > intestinal juice. Overall, the results suggest that heat treatment can modify the nutrient properties of lotus root by influencing the digestion process and release of phenolic compounds. These findings provide valuable insights for quality control during thermal processing of lotus root.

**Keywords** lotus root; heat treatment; simulated digestion; phenolic compounds; antioxidant activity