

文章编号:2095-7386(2023)05-0001-10

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2023.05.001

多酚强化莲藕营养粉的制备与食用品质

李舒玥¹, 吴昊怡¹, 易 阳^{1,2}, 孙 莹^{1,2}, 彭凯迪^{1,2}, 江雪玉^{1,2}

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023;

2. 武汉轻工大学 农产品加工与转化湖北省重点实验室, 武汉 430023)

摘 要:研究莲藕的多酚营养强化及制粉工艺,并评价藕粉的品质特征。考察添加量和温度对藕汁和藕渣吸附茶多酚的影响,以多酚吸附率为指标优化藕汁粉(Lotus root powder 1, LRP-1)和藕渣粉(LRP-2)的制备工艺。同时,将藕汁回添于藕渣制备多酚强化莲藕粉(LRP-3),并以 LRP-1 和 LRP-2 等质量混合制备复合粉(LRP-4)。4 种营养强化粉的淀粉、膳食纤维、酚类物质等含量存在明显差异,相较于直接冷冻干燥制备的全藕粉(LRP-0),其结合酚和结合黄酮含量显著增加($P < 0.05$)。通过体外模拟消化发现,4 种营养强化粉在消化过程中的多酚类物质释放充分,但黄酮类物质未完全消化释放,尤其是 LRP-2 的黄酮保留率达 37.66%。与 LRP-0 相比,营养强化粉的成糊温度及能量降低,具有较高的峰值黏度($P < 0.05$)。LRP-3 在胃肠消化过程中的多酚和黄酮缓释效果明显,其冲调性和稳定性优于纯藕粉。结果表明,多酚添加能有效提升莲藕全粉的营养价值和食用品质。

关键词:莲藕;营养强化;工艺;消化特性;糊化特性

中图分类号:TS 213

文献标识码:A

Preparation and quality evaluation of nutritional Lotus Root Powder supplemented with polyphenols

LI Shuyue¹, WU Haoyi¹, YI Yang^{1,2}, SUN Ying^{1,2}, PENG Kaidi^{1,2}, JIANG Xueyu^{1,2}

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products,
Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: This work aimed to investigate the polyphenol-based nutrient fortification and milling process of lotus root, as well as the quality characteristics of processed powders. The effects of addition amount and temperature on the adsorption of tea polyphenols by lotus root juice and lotus root pomace were analyzed, to optimize the preparation conditions of juice-based powder (LRP-1) and pomace-based powder (LRP-2) using the indicator of polyphenol adsorption ratio. In addition, the polyphenol-supplemented juice and pomace were mixed to prepare whole lotus root powder (LRP-3), and powder LRP-4 was obtained by mixing LRP-1 and LRP-2 in equal mass. There were significant differences in the content of starch, dietary fiber, and phenolic substances among the four nutrient-fortified powders. Compared to the whole lotus root pow-

收稿日期:2023-09-06.

作者简介:李舒玥(2000-),女,硕士研究生。E-mail:lsy306164223@163.com.

通信作者:易阳(1986-),男,教授,博士。E-mail:yiy86@whpu.edu.cn.

基金项目:湖北省重点研发计划项目(编号:2022BBA0023, 2021BED006).

der (LRP-0) directly prepared by freeze-drying and milling, their contents of bound phenols and bound flavonoids significantly increased ($P < 0.05$). The tests of simulated digestion *in vitro* found that polyphenols in the four nutrient-fortified powders were completely released during the digestion process, but flavonoids were not fully released. Especially, the flavonoid retention ratio of LRP-2 reached 37.66%. Compared with LRP-0, the nutrient-fortified powders showed lower temperatures and energies of gelatinization, as well as higher peak viscosities ($P < 0.05$). LRP-3 exhibited the sustained-release effect of polyphenols and flavonoids during gastrointestinal digestion *in vitro*, and its solubility and stability were better than lotus root starch. The results indicate that the supplementation of polyphenols can effectively enhance the nutritional value and edible quality of whole lotus root powder.

Key words: lotus root; nutritional fortification; technology; digestive properties; gelatinization characteristics

1 引言

藕粉通常指莲藕淀粉类产品,包括仅以莲藕为原料而加工制成的藕淀粉产品(即纯藕粉),以及纯藕粉含量不低于 50% 的速溶藕粉和调制藕粉^[1]。纯藕粉生产的资源利用率低,污水排放量大,且在加工过程中损失了莲藕内丰富的膳食纤维、酚类物质和维生素等营养成分^[2],往往需要添加其他原辅料来改善藕粉产品的营养价值和口感风味。因此,开发纯藕粉的绿色健康替代产品对于莲藕产业高质量发展具有重要的意义。

相比纯藕粉,全藕粉的加工工艺简单,几乎保留了莲藕全部的营养成分,且具有良好的冲调性和风味^[3]。不同品种莲藕的平均总酚含量和总黄酮含量分别为 1.81% 和 3.35% (食用部位鲜重),在常见的数十种蔬菜中表现出较强的抗氧化活性,但活性明显弱于山楂、冬枣、番石榴等水果^[4-6]。酚类物质对食物的抗氧化功效有重要的贡献,外源性多酚添加既可以提高淀粉类食品的营养价值,还能够影响淀粉的热稳定性和糊化特性等^[7],如茶多酚在改善小麦淀粉理化特性和面包品质等方面效果明显^[8]。当前,全藕粉的研究主要集中在其生产技术及品质特性等方面,关于多酚营养强化研究尚鲜见报道。

本文针对莲藕压榨分离的藕汁和藕渣分别进行多酚吸附强化,考察添加量和温度对其茶多酚吸附效果的影响,建立不同的工艺方案制备多酚强化莲藕粉(lotus root powder, LRP),并对营养成分、消化特性、糊化性质等品质特征进行综合评价,为高品质的莲藕全粉产品开发提供参考。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

新鲜莲藕(武植二号,生长期 6 个月)购于武汉市金水棋良农副产品有限公司,产地位于武汉市江

夏区。Folin-Phenol 试剂和 1,1-二苯-2-苦基肼(DPPH)购于北京瑞达恒辉科技发展有限公司;人工唾液、人工胃液、人工小肠液试剂,购于北京雷根生物技术有限公司;总抗氧化能力检测试剂盒(FRAP 法),购于碧云天生物科技有限公司;食品级茶多酚(纯度 98%),购于山东谷硕生物科技有限公司;总淀粉试剂盒,购于南京建成生物工程研究所。

2.2 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;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;Super4 型快速黏度仪:瑞典波通公司;榨汁机:江门市贝尔斯顿电器有限公司;内切式匀浆机:宁波新芝生物科技股份有限公司。

2.3 实验方法

2.3.1 莲藕的预处理

将新鲜莲藕洗净后去皮、去节、切块,用榨汁机压榨分离藕汁和藕渣。

2.3.2 藕汁的茶多酚强化单因素试验

取 100 mL 鲜藕汁,添加一定量的茶多酚(M_1 , g)混匀,在设定温度下真空加热浓缩,并定容至 50 mL;取 10 mL 浓缩液转至透析袋(截留分子量 1000 Da)中,于 190 mL 蒸馏水中透析 4 h;取透析袋外液,采用福林酚法(Folin-Ciocalteu)^[4]检测酚类物质浓度,并按总体积 200 mL 计算总游离酚质量(m_1 , g);同时,测定未添加茶多酚时,透析液中总游离酚质量(m_2 , g);茶多酚吸附量(M_2 , g)和吸附率(%).按如下公式计算:

$$\text{吸附率} = \frac{100(M_1 - M_2)}{M_1} = \frac{100[M_1 - (m_1 - m_2)]}{M_1} \quad (1)$$

(1)茶多酚添加量:在加热温度 50 °C 下,考察茶多酚添加量(0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mg/mL⁻¹)

对茶多酚吸附量和吸附率的影响。

(2) 加热温度: 添加 2 mg/mL^{-1} 茶多酚, 考察加热温度 (30、40、50、60、70 $^{\circ}\text{C}$) 对茶多酚吸附率的影响。

2.3.3 藕渣的茶多酚强化的单因素试验

取 100 g 鲜藕渣, 与 10 mL 茶多酚溶液于室温下混匀, 静置 30 min 后转入烘箱进行热风干燥。干燥结束后加入 200 mL 蒸馏水, 低速混匀 30 min, 离心后取上清液, 采用 Folin-Ciocalteu 法^[4]测定酚类物质含量, 换算总游离酚质量, 并参考 2.3.2 节公式计算茶多酚吸附量和吸附率。

(1) 茶多酚添加量: 在室温下, 考察茶多酚添加量 (0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mg/g^{-1}) 对茶多酚吸附量和吸附率的影响。

(2) 干燥温度: 添加 2 mg/g^{-1} 茶多酚, 考察干燥温度 (40、50、60、70、80 $^{\circ}\text{C}$) 对茶多酚吸附率的影响。

2.3.4 莲藕制粉工艺

(1) 全藕粉 (LRP-0): 将新鲜莲藕洗净去皮、去节、切碎, 直接冷冻干燥后粉碎过筛 (80 目)。

(2) 多酚强化藕汁粉 (LRP-1): 藕汁中添加 2 mg/mL^{-1} 茶多酚, 40 $^{\circ}\text{C}$ 真空浓缩至糊状, 转移到托盘进行 60 $^{\circ}\text{C}$ 热风干燥, 干燥结束后粉碎过筛。

(3) 多酚强化藕渣粉 (LRP-2): 藕渣按料液比 10:1 (g/mL) 添加 2 mg/g^{-1} 茶多酚, 室温混合均匀, 转移到托盘进行 60 $^{\circ}\text{C}$ 热风干燥, 干燥结束后粉碎过筛。

(4) 多酚强化全藕粉 (LRP-3): 莲藕经压榨后, 藕汁和藕渣按上述条件分别进行多酚强化, 藕汁浓缩至原 1/4 体积后回添于藕渣中, 室温混合均匀后干燥、粉碎、过筛。

(5) 多酚强化复合粉 (LRP-4): 将 LRP-1 和 LRP-2 按质量比 1:1 混合均匀。

2.3.5 可溶性糖测定

可溶性糖的提取分离方法按参考文献^[9], 稍有改动。精确称取 $1.00 \pm 0.01 \text{ g}$ 样粉置于锥形瓶中, 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。

(1) 可溶性总糖含量测定: 参考文献蒽酮-硫酸法^[9], 样粉溶液与蒽酮-硫酸试剂以体积比为 1:5 混合, 沸水浴加热 7 min, 避光冷却 20 min 后测定 620 nm 处吸光值。通过蒽酮-硫酸法测定上清液中可溶性总糖浓度 (葡萄糖当量浓度, mg/mL^{-1}),

并计算样粉 (干重) 中可溶性总糖含量 (%)。

(2) 还原糖含量测定: 参考文献二硝基水杨酸法^[10], 测定样液中还原糖浓度 (葡萄糖当量浓度, mg/mL), 并计算样粉 (干重) 中还原糖含量 (%)。

2.3.6 总淀粉含量测定

采用总淀粉测定试剂盒, 准确称取 0.1 g 样粉, 加入 0.5 mL 去离子水, 95 $^{\circ}\text{C}$ 糊化 15 min。冷却后按说明书方法检测样粉 (干重) 中总淀粉含量 (%)。

2.3.7 膳食纤维含量测定

参考 GB/T 5009.88—2014, 采用酶重量法测定样粉 (干重) 中可溶性和不溶性膳食纤维含量 (%)。

2.3.8 多酚含量测定

取 50 mg 样粉加 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。分别采用 Folin-Ciocalteu 法^[4]和硝酸铝显色法^[11]测定上清液中总酚 (没食子酸当量浓度) 和总黄酮 (芦丁当量浓度), 并计算样粉中游离酚和游离黄酮含量 (mg/g 干重)。

离心去除上清液后, 保留样粉底物, 按参考文献方法提取结合酚^[12-13]。取 100 mg 置于锥形瓶中, 添加 10 mL 的 NaOH 溶液 (2 mol/L), 于室温下磁力搅拌水解 3 h。采用 10 000 r/min 离心 15 min, 保留上清液备用。用 6 mol/L HCl 将上清液 pH 调整为 2~3 后, 加入 20 mL 乙酸乙酯振荡, 再浸提 10 min 萃取, 萃取 3 次, 保留上清液, 合并萃取相。通过 45 $^{\circ}\text{C}$ 真空旋转蒸发除去乙酸乙酯, 浓缩至干后用 50% 甲醇定容至 10 mL, 即得到结合态酚类提取液, 分别测定样粉中结合酚和结合黄酮含量 (mg/g 干重)。

2.3.9 消化特性分析

(1) 体外模拟多室消化: 样粉的体外模拟消化按参考文献方法操作^[14], 并稍作修改。称取 100 mg 样粉, 加入 10 mL 人工唾液, 充分混匀后置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 振荡消化 10 min。模拟口腔消化结束后, 于 4 $^{\circ}\text{C}$ 10 000 r/min 下离心 15 min 分离口腔消化样液。于离心后的沉淀中加入 10 mL 人工胃液, 充分混匀后置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 振荡消化 2 h, 离心分离胃消化样液。最后在沉淀物中加入 10 mL 人工肠液, 充分混匀后置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 振荡消化 1.5 h, 离心得到肠消化样液。测定三种消化样液中的总酚和总黄酮含量。

(2) 体外模拟单室消化: 样粉的单室消化特性按参考文献方法测定^[15], 并稍作修改。取 100 mg 样粉, 分别加入 10 mL 人工胃液或人工肠液, 充分混匀后置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 振荡消化 0~3 h。模拟胃肠消化结

束后,于 4 ℃ 离心(10 000 r/min, 15 min)分离消化样液,测定其中总酚和总黄酮含量。

2.3.10 糊化性质分析

参考 Punia^[16]的方法,采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)测定样粉的热力学性质。称取 3 mg 样粉(≥ 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。升温速率为 10 ℃/min,测定范围为 20~120 ℃。

样粉的糊化性质测定参考 Liu^[17]的方法。称取 3 g 样粉于快速黏度仪(rapid visco analyzer, RVA)的专用铝罐中,加入 25 mL 去离子水。测定程序为:50 ℃ 运行 2 min,以 12 ℃/min 的速率从 50 ℃ 加热至 95 ℃,在 95 ℃ 下保温 2.5 min,再以同样的速率降至 50 ℃。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。

2.3.11 冲调性评价

(1)润湿性测定:在 250 mL 烧杯中加入 200 mL 去离子水,称取 0.5 g 样粉均匀的平铺于水面上,测定从样品加入到样品完全沉降所需要的时间(s)^[18]。

(2)分散性和稳定性测定:取 5 g 样粉放于 100 mL 烧杯中,加入 50 mL 去离子水,使用内切式匀浆机,以 10 000 r/min 记录从搅拌开始到样品全部分散所需要的时间(s)。然后将搅拌均匀的液体进行静置,同时计时,待液体完全分层后停止计时,以此作为样品分散稳定时间(s)^[18]。

(3)透光度测定:准确称取 1 g 样粉,加入 100 mL 去离子水,置于 85 ℃ 恒温加热磁力搅拌器,以

500 r/min 转速搅拌糊化 30 min。冷却至室温,测定其在波长 620 nm 处的透光率^[19]。

2.4 数据分析

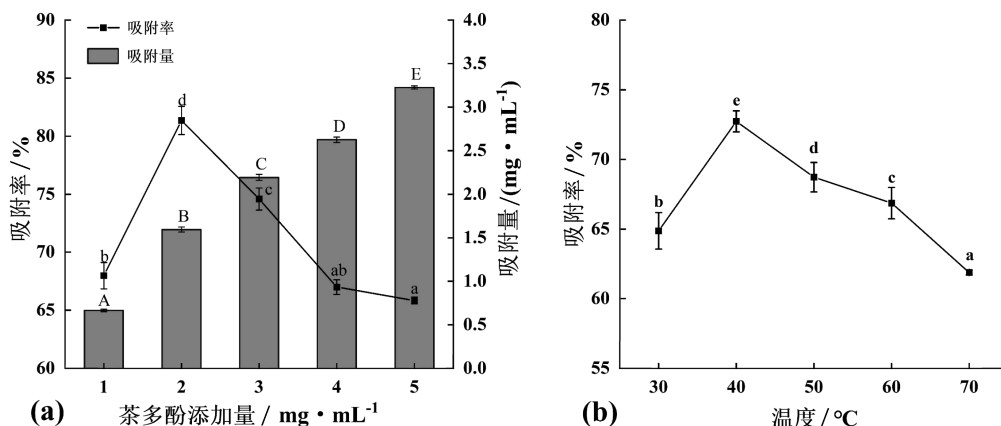
采用 SPSS 23.0 软件分析实验数据,结果用“平均值 $\pm$ 标准偏差”(n=3)表示,并以 Origin 8.5 软件作图。组间数据在 0.05 水平的显著性差异通过 SPSS26.0 软件采用 Duncan(D)进行分析。

3 结果与分析

3.1 藕汁的茶多酚吸附能力

添加量和温度对藕汁的茶多酚吸附影响如图 1 所示。由图 1(a)可知,随着茶多酚添加量的增加,其吸附量不断上升($P<0.05$),但吸附率先升后降的趋势,并在添加量 2 mg/mL⁻¹ 时获得最大吸附率(81.36%);茶多酚添加量在 5 mg/mL⁻¹ 时,其吸附量最高(3.23 mg/mL⁻¹),但吸附率最低(65.83%)。

由图 1(b)可知,随着温度的升高,茶多酚的吸附率先升后降,并在 40 ℃ 时获得最高吸附率(72.73%)。而在 70 ℃ 时茶多酚吸附率最低,仅 61.87%。有文献表明^[20-21],热加工方式能调控淀粉与多酚之间的相互作用,通过促进淀粉的糊化膨胀或破裂,从而加强多酚进入结构或接触吸附形成非包合型复合物;在此过程中,氢键作为主要作用力,适宜的温度可以促进多酚和淀粉的非共价结合,温度过高则会造成复合物热降解或酚类化合物氧化,导致吸附量降低。因此在茶多酚添加量为 2 mg/mL⁻¹ 和加热温度为 40 ℃ 时,可有效提升其在藕汁中的吸附效率。



注:不同大写或小写字母表示不同样品之间的显著性差异($P<0.05$)

图 1 添加量及温度对藕汁茶多酚吸附能力的影响

Fig. 1 Effects of addition amount and temperature on the adsorption capacity of tea polyphenols in lotus root juice

3.2 藕渣的茶多酚吸附能力

茶多酚添加量和温度对藕渣的茶多酚吸附影响如图 2 所示。由图 2(a)可知,随着茶多酚添加量由 1 mg/g⁻¹增加至 3 mg/g⁻¹,其吸附量显著上升($P<0.05$),但添加量进一步增大并未提升茶多酚的吸附量($P>0.05$),吸附量稳定于 1.76~1.88 mg/g⁻¹。吸附率呈先上升后下降趋势,并在添加量为 2 mg/g⁻¹时获得最大吸附率(68.94%);茶多酚添加量在 5 mg/g⁻¹时,其吸附率最低为 38.36%。

由图 2(b)可知,随着温度的升高,茶多酚的吸附率先升后降,并在 60 ℃时获得最高吸附率

(79.43%)。藕渣中含有大量膳食纤维,对多酚有一定的吸附能力,由于结合酚与游离酚存在动态平衡,因此通过调节游离酚的浓度,在一定浓度范围内可使得膳食纤维对茶多酚吸附能力提高^[22]。温度升高引起茶多酚分子运动加剧,削弱氢键结合作用,最终降低茶多酚的吸收效果。刘通讯^[23]等研究温度对普洱茶多酚物质的影响发现,在 60 ℃以上时茶多酚、儿茶素、茶褐素含量明显较低。说明温度不仅对藕渣中淀粉、膳食纤维与茶多酚结合产生影响,而且高温会加速茶多酚的氧化降解、缩合等反应,导致吸附率降低。因此,在添加量为 2 mg/g⁻¹和反应温度为 60 ℃时有利于藕渣对茶多酚的吸附。

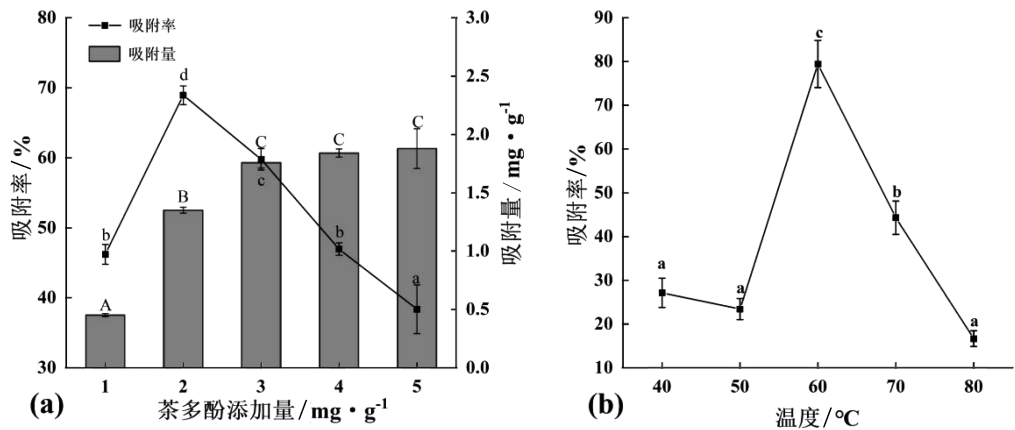


图 2 添加量及温度对藕渣茶多酚吸附能力的影响

Fig. 2 Effect of addition amount and temperature on the adsorption capacity of tea polyphenols from lotus root residue

3.3 多酚强化莲藕粉的营养组成比较

根据单因素实验结果,制备不同藕粉样品,测定其营养组成成分,结果如表 1 所示。碳水化合物是样粉中的主要营养组分,以可溶性总糖、淀粉、膳食纤维为主,其中多糖可能为主要可溶性成分^[24]。与冷冻干燥制备的全藕粉 LRP-0 相比,LRP-3 中可溶性总糖和淀粉含量显著降低,而还原糖含量显著增加,可能与制粉过程中可溶性多糖和淀粉的受热分解或损耗有关^[25]。此外,淀粉和可溶性多糖可能受热溶胀后发生交联,导致可溶性膳食纤维含量减少。同时,热处理促进外源茶多酚与莲藕淀粉、膳食纤维

的聚合,因此,营养强化粉中结合酚和结合黄酮含量均显著高于 LRP-0($P<0.05$),其中 LRP-3 中结合酚(7.56 mg/g⁻¹)及结合黄酮含量(14.54 mg/g⁻¹)最高。藕汁粉(LRP-1)中不溶性膳食纤维含量最低($P<0.05$),但其他营养成分均显著高于其他样粉,说明莲藕在压榨过程中可溶性营养物质主要析出于藕汁中,而不溶性物质如膳食纤维则大量存在于藕渣粉(LRP-2)中。因此,组合两者工艺制备回添粉(LRP-3)和复合粉(LRP-4)从而均衡藕粉中的营养成分。

表 1 多酚强化莲藕粉的营养组成

Table 1 Nutritional composition of lotus root powders supplemented with polyphenols

营养成分	LRP-0	LRP-1	LRP-2	LRP-3	LRP-4
可溶性总糖/%	23.75±2.77 ^b	24.92±1.38 ^c	21.35±0.08 ^a	19.66±0.08 ^a	20.65±0.39 ^a
还原糖/%	1.96±0.15 ^a	3.22±0.02 ^c	3.05±0.04 ^b	3.06±0.01 ^b	3.08±0.01 ^b
淀粉/%	42.47±1.87 ^c	59.56±0.05 ^d	32.92±0.15 ^a	39.88±0.07 ^b	42.47±0.04 ^c

续表

营养成分	LRP-0	LRP-1	LRP-2	LRP-3	LRP-4
不溶性膳食纤维/%	29.01±2.32 ^b	7.74±0.33 ^a	38.27±0.91 ^d	37.46±2.06 ^d	30.74±2.00 ^c
可溶性膳食纤维/%	21.79±1.41 ^b	21.70±1.41 ^b	18.30±0.04 ^a	16.61±0.07 ^a	17.58±0.39 ^a
游离酚/mg·g ⁻¹	17.95±1.16 ^b	38.17±1.65 ^c	15.19±0.83 ^a	21.50±1.13 ^c	27.59±1.92 ^d
结合酚/mg·g ⁻¹	1.16±0.21 ^a	4.46±0.34 ^c	3.90±0.19 ^b	7.56±0.22 ^d	4.38±0.34 ^c
总酚/mg·g ⁻¹	19.11±0.91 ^a	42.63±1.31 ^d	19.09±0.99 ^a	29.06±0.92 ^b	31.98±1.60 ^c
游离黄酮/mg·g ⁻¹	36.82±0.65 ^a	66.19±3.94 ^d	36.17±0.58 ^a	39.43±1.05 ^b	51.40±1.14 ^c
结合黄酮/mg·g ⁻¹	5.18±1.07 ^a	9.31±1.16 ^c	7.60±0.82 ^b	14.54±2.21 ^d	9.90±1.21 ^c
总黄酮/mg·g ⁻¹	42.00±1.32 ^a	75.51±3.31 ^c	43.78±0.74 ^b	53.98±3.15 ^c	61.29±0.58 ^d

注:不同小写字母表示不同样品之间的显著性差异($P<0.05$),下表同。

3.4 多酚强化莲藕粉的消化特性比较

由表 2 可知,LRP-0 中酚类物质在不同部位消化释放量为胃液>唾液>肠液;其他莲藕粉的酚类物质释放量为胃液>肠液>唾液。在胃液消化过程中,LRP-1 酚类物质释放量最高达 20.01 mg/g⁻¹。而在肠液消化过程中,LRP-3 酚类物质释放量最多,达到 11.08 mg/g⁻¹,不添加茶多酚的 LRP-0 酚类物质在肠液中消化释放量仅有 4.34 mg/g⁻¹。茶多酚可能与藕粉中的淀粉、膳食纤维相结合,减少酚类物质在唾液、胃液中的释放,从而递送更多酚类物质进入结肠中发挥其健康功效^[26]。5 种样粉中的酚类物质消化释放总量均高于消化前总酚含量,可能是酚类物质在真空和加热的作用下与莲藕淀粉、膳食纤维等生成聚合物,提高其稳定性并延长活性物质的释放,再经过胃消化酶、胰酶作用及其酸性环境使聚合物重组降解,从而导致消化释放总量有所提高^[27-28]。

5 种样粉中的黄酮类物质在唾液消化过程的释放量均大于胃液和肠液的消化释放量,其中 LRP-1 最高达 38.36 mg/g⁻¹。Spinola^[14] 研究发现,浆果中黄酮类物质在口腔中受唾液淀粉酶的影响更容易释放。添加茶多酚后的莲藕粉在肠液消化中的黄酮类物质释放量显著提升,尤其是 LRP-3 黄酮释放量(6.48 mg/g⁻¹)为 LRP-0 的 2.8 倍。特别的,在胃液和肠液消化过程中,LRP-2、LRP-3 黄酮类物质释放量总和达到其消化释放总量的 45.21%、45.59%。而 5 种样粉中的黄酮类物质消化释放总量低于消化前总黄酮含量,可能是由于胰酶可以水解黄酮类物质与食物基质之间的化学键,使得中性或偏碱性的黄酮类物质在肠消化液介质中得以稳定,部分黄酮类物质得以转化成结构更加稳定的衍生物,使其不易被分解,导致部分黄酮类物质在消化过程中没有被完全释放出来^[29-30]。

表 2 多酚强化莲藕粉的消化特性

Table 2 Digestive characteristics of lotus root powders fortified with polyphenols

模拟消化		LRP-0	LRP-1	LRP-2	LRP-3	LRP-4
总酚/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	唾液消化释放	8.01 ± 0.06^c	15.62 ± 0.46^c	3.15 ± 0.27^a	7.32 ± 0.48^b	11.08 ± 0.53^d
	胃液消化释放	11.21 ± 0.38^a	20.01 ± 0.61^d	12.63 ± 0.88^a	14.74 ± 0.88^b	17.14 ± 0.85^c
	肠液消化释放	6.01 ± 0.08^a	8.72 ± 0.66^d	6.73 ± 0.61^b	11.08 ± 0.22^c	7.03 ± 0.33^c
	消化释放总量	25.21 ± 0.32^b	44.35 ± 1.72^c	22.51 ± 1.75^a	33.13 ± 1.57^c	35.25 ± 1.72^d
总黄酮/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	唾液消化释放	24.64 ± 0.49^b	38.36 ± 1.05^c	14.97 ± 1.31^a	26.13 ± 2.48^c	32.01 ± 0.40^d
	胃液消化释放	9.42 ± 0.49^b	19.88 ± 0.42^d	8.72 ± 0.52^a	13.58 ± 0.80^c	11.87 ± 0.58^b
	肠液消化释放	2.31 ± 0.56^a	5.73 ± 1.14^d	3.59 ± 0.40^b	6.48 ± 1.14^c	4.24 ± 1.34^c
	消化释放总量	36.37 ± 0.64^b	63.98 ± 2.61^c	27.29 ± 2.23^a	46.19 ± 4.42^c	48.12 ± 2.32^d

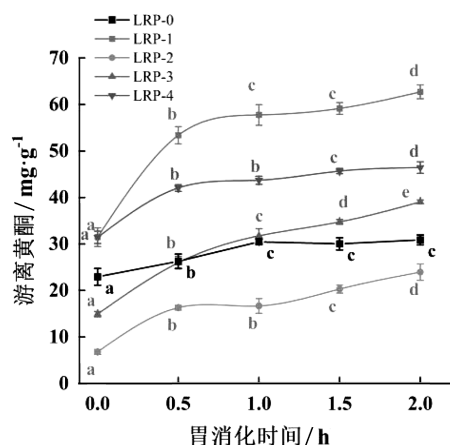
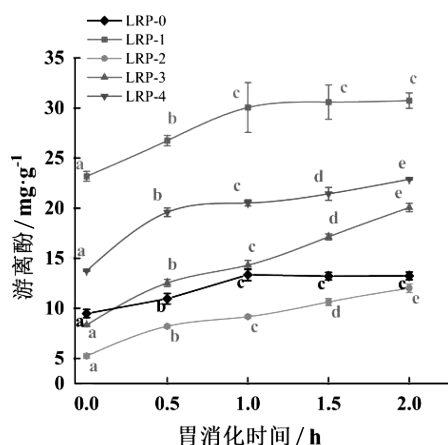
3.5 多酚强化莲藕粉的胃肠消化曲线

不同样粉在胃液消化过程中的酚类和黄酮类物质的释放规律如图 3 所示。LRP-0 与 LRP-1 在 0.5 h 和 1.0 h 后的游离酚释放量基本保持不变,释放量为总酚含量的 73.6% 和 71.4%。LRP-2、LRP-3 和 LRP-4 在 0~2 h 内的酚类物质释放量持续上升,其中 LRP-3 的游离酚释放量由 9.55 mg/g⁻¹ 增

长至 21.27 mg/g⁻¹,占总酚含量的 73.3%。在胃液消化 0.5 h 内,LRP-0、LRP-1 和 LRP-4 的游离黄酮释放量均显著升高,直至 1.5 h 时基本释放完全,与帅聪等^[31]研究结论相似,即覆盆子在胃消化 0.5 h 内总黄酮基本释放完全。而 LRP-3 的黄酮类物质在消化的 2 h 内稳定缓释达 39.06 mg/g⁻¹,占总黄酮含量的 74.7%。结果表明,在多酚强化莲藕粉制

备中, 热加工促进了淀粉和膳食纤维与茶多酚的相互作用, 提高莲藕粉中酚类、黄酮类物质的稳定

性^[20,32], 使其在 0~2 h 可以缓慢持续释放。



注: 不同小写字母表示同一样品在不同消化时间的显著性差异 ($P < 0.05$)。下图同。

图 3 不同莲藕粉在胃消化过程中游离酚和游离黄酮的释放量

Fig. 3 Release of free phenols and free flavonoids in different lotus root powders during gastric digestion

不同样粉在肠液消化过程中的酚类、黄酮类物质释放规律如图 4 所示。与 LRP-0 相比, 4 种莲藕粉的游离酚和游离黄酮在 0~3 h 内均保持平缓增长释放, 其中 LRP-1 在 0.5 h~3 h 内黄酮类物质释放量持续上升, 为总黄酮含量的 84.7%。在肠液消化 0~3 h 内, LRP-3 的游离酚释放量由 14.23 mg/g⁻¹ 增长至 22.35 mg/g⁻¹, 为总酚含量的 76.9%; LRP-3 的黄酮类物质在消化的 1.5~2.5 h 内稳定缓释达

35.48 mg/g⁻¹, 占总黄酮含量的 66.9%, 并未释放完全。Thomas^[33] 发现智利红草莓总黄酮含量在肠消化阶段释放了 90.9%, 且游离黄酮含量在肠消化过程中显著降低。综上表明 4 种莲藕粉的游离酚和游离黄酮能够在 1.5~3 h 内持续释放, 而未释放的酚类物质可以到达结肠并通过肠道微生物群分解和代谢, 从而提高人体的健康水平^[34-35]。

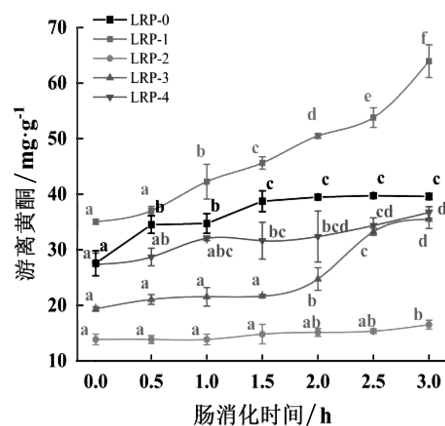
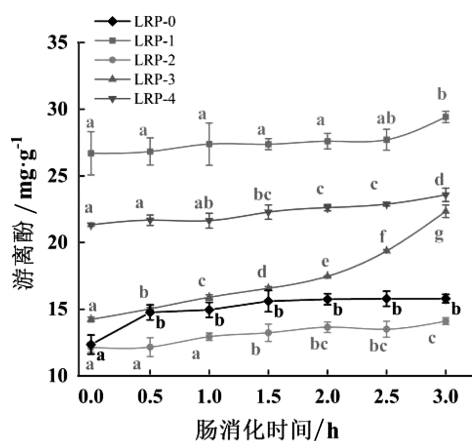


图 4 不同莲藕粉在小肠消化过程中游离酚和游离黄酮的释放量

Fig. 4 Release of free phenols and free flavone in different lotus root powders during intestinal digestion

3.6 多酚强化莲藕粉的糊化特性

热力学特性中的起止温度表示晶体糊化温度, 糊化温度越高则淀粉晶体结构越完整且不易被破坏。焓变值的变化会影响淀粉双螺旋结构的破坏程度, 当焓变值较高时, 表明糊化充分需要较高能

量^[36]。5 种样粉表现出不同的热力学特性, 这可能是由于其淀粉的形状、大小、直链淀粉含量以及晶型结构的差异导致^[37]。由表 3 可知, 相较于 LRP-0, 多酚强化莲藕粉的糊化温度与焓变值均下降, 说明茶多酚的添加可以使莲藕粉中淀粉加速吸水溶胀,

在较低的能量下就糊化充分。其中,LRP-2 的峰值温度和焓变量均最低,而 LRP-1 的焓变值最高达到 20.33 J/g,可能是 LRP-1 含有较高的酚类物质含

量,在糊化过程中多酚与淀粉发生相互作用,形成了更多结合力较强的短程有序结构,使其需要更高的温度膨胀糊化^[38],继而峰值温度和焓变值升高。

表 3 多酚强化莲藕粉的热力学特性

Table 3 Thermodynamic characteristics of different lotus root powders

热力学特性	LRP-0	LRP-1	LRP-2	LRP-3	LRP-4
起始温度/℃	62.55±2.13 ^c	62.56±3.82 ^c	57.59±1.14 ^a	59.45±0.32 ^b	63.01±1.93 ^c
峰值温度/℃	66.27±3.06 ^b	68.62±2.75 ^c	62.91±2.45 ^a	66.16±1.36 ^b	66.26±1.60 ^b
终止温度/℃	73.00±4.00 ^c	72.21±2.05 ^c	65.73±1.90 ^a	71.53±1.82 ^c	68.36±2.11 ^b
焓变值/J·g	27.22±1.97 ^c	20.33±5.74 ^d	6.95±1.45 ^a	8.66±0.76 ^b	9.06±1.17 ^c

淀粉在一定温度下能够吸水膨胀形成均匀的糊状溶液,其黏度的升高为糊化最直接的表现^[39]。峰值黏度的大小与淀粉颗粒的膨胀性能呈正相关,衰减值与淀粉颗粒的稳定性呈反比,回生值越大则表明淀粉越易老化^[40]。由表 4 可知,相较于 LRP-0,LRP-1 的糊化特征指数均显著降低,说明茶多酚的添加提高了其热稳定性,且与淀粉发生相互作用抑制了淀粉的回生,延缓老化。而其他莲藕粉的衰减

值和回生值显著上升($P<0.05$)。LRP-2 的峰值黏度(11 200 cP)和衰减值(7153 cP)最高,可能由于其中富含的不溶性膳食纤维通过非共价键与淀粉发生相互作用,显著提高了 LRP-2 的黏度,使其具有较好的膨胀性能^[32],但回生值达到了 1 907 cP,表明其稳定性差、易老化。因此推测在多酚强化莲藕粉中除了淀粉-多酚体系还可能

表 4 多酚强化莲藕粉的糊化特性(RVA)

Table 4 Gelatinization characteristics (RVA) of lotus root powders fortified with polyphenols

糊化特性	LRP-0	LRP-1	LRP-2	LRP-3	LRP-4
峰值黏度/cP	4 282±42 ^b	2 423±8 ^a	11 200±51 ^c	8 369±40 ^d	5 749±70 ^c
谷值黏度/cP	1 322±21 ^b	1 111±27 ^a	4 049±30 ^c	2 828±10 ^d	2 092±3 ^c
衰减值/cP	2 960±26 ^b	1 313±17 ^a	7 153±80 ^c	5 540±50 ^d	3 659±71 ^c
最终黏度/cP	1 665±24 ^b	1 409±27 ^a	5 954±12 ^c	3 694±9 ^d	2 770±2 ^c
回生值/cP	343±22 ^b	299±2 ^a	1 907±16 ^c	867±2 ^d	680±2 ^c

3.7 多酚强化莲藕粉的冲调性

LRP-3 中富含膳食纤维,淀粉及总糖含量偏低,酚类物质含量高且模拟胃肠消化过程中持续缓释,具有易糊化、黏度高等特性。因此,选择 LRP-3 样粉与纯藕粉对比,评价其冲调特性。润湿性和分散性是淀粉速溶类产品冲调性能的主要指标,时间越短,干粉的润湿性及分散性越好;分散稳定性时间越长则表明冲调后的稳定性越好^[18]。由表 5 可知,纯藕粉的润湿性小,但其分散性和分散稳定性均不如 LRP-3 样粉。LRP-3 样粉润湿性增加可能是因

为淀粉与茶多酚、膳食纤维等分子以氢键形成的复合物在溶于水时仍处于较稳定状态^[32],虽然能吸水润湿,但阻碍了淀粉分子的进一步溶胀,降低了水分渗透的速度^[42]。淀粉复合物导致 LRP-3 的润湿性降低但提高了其分散稳定性。纯藕粉与 LRP-3 样粉的透光度存在差异,可能是 LRP-3 本身富含不溶性膳食纤维降低了其透明度,以及茶多酚与糊化后分散于溶液中的淀粉分子链发生聚合,阻碍了光线的透过,从而透光度降低^[42]。

表 5 多酚强化莲藕粉的冲调性指标

Table 5 Flushing indexes of lotus root powders fortified with polyphenols

样品	润湿性/s	分散性/s	分散稳定性/s	透光度/A
纯藕粉	26.58±1.32	13.17±1.05	137.66±5.22	0.155±0.01
LRP-3	65.81±0.51	12.94±0.75	198.23±7.49	0.557±0.03

4 结论

以莲藕为原材料,采用单因素实验,确定了多酚营养强化莲藕粉工艺,并对在最佳工艺条件下制备的

4 种强化莲藕粉的综合品质进行分析。结果显示,制备多酚营养强化莲藕粉的最优工艺条件为:藕汁的茶多酚最佳添加量为 2 mg/mL⁻¹及最适浓缩温度为 40 ℃;藕渣的茶多酚最佳添加量为 2 mg/mL⁻¹及最

适干燥温度为 60 ℃。在此工艺条件下,制备添加茶多酚的 4 种莲藕粉,与直接冷冻干燥后粉碎制备的全藕粉相比,多酚强化工艺显著提高莲藕粉中总酚和总黄酮含量以及稳定性,使更多酚类物质在胃肠道中缓慢持续释放;同时改善了莲藕粉的冲调性,显著提高了其黏度和冲调稳定性。相关结果对多酚营养强化淀粉类食品的品质提供研究参考。研究发现茶多酚强化对莲藕粉的消化特征及糊化特性的影响,涉及多酚、淀粉、膳食纤维等多组分间的分子相互作用,其品质影响机制还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 全国食品工业标准化技术委员会. 藕粉质量通则:GB/T 25733—2022[S]. 北京:中国标准出版社,2022.
- [2] 齐建设,齐一乔,易宗初,等. 2014 年度中国莲藕淀粉市场分析[J]. 蔬菜,2014(12):26-29.
- [3] 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.
- [4] Yi Y, Sun J, Xie J, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of lotus root varieties [J]. *Molecules* (Basel, Switzerland), 2016, 21 (7):863.
- [5] 郭长江,韦京豫,杨继军,等. 66 种蔬菜、水果抗氧化活性的比较研究[J]. 营养学报,2003 (2):203-207.
- [6] 江筠,傅明,李乐,等. 常见蔬菜及淀粉类食物抗氧化活性初探[J]. 南开大学学报(自然科学版),2006(5):63-68.
- [7] 陈南,高浩祥,何强,等. 植物多酚与淀粉的分子相互作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023,44(2):497-505.
- [8] 陈南,陈龙,何强,等. 茶多酚对小麦淀粉理化特性和面包品质的影响及机理[J]. 食品科学, 2021,42(21):8-16.
- [9] 张召,易阳,彭凯迪,等. 莲藕多糖的碱法提取工艺优化与抗氧化活性评价[J]. 食品安全质量检测学报,2023,14(2):256-263.
- [10] 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.
- [11] Guo X, Wu C, Ma Y, et al. Comparison of milling fractions of tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties [J]. *Food Research International*, 2012, 49 (1):53-59.
- [12] Li S, Li J, Zhu Z, et al. Soluble dietary fiber and polyphenol complex in lotus root: Preparation, interaction and identification [J]. *Food Chemistry*, 2020, 314:126219.
- [13] 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.
- [14] Spínola V, Pinto J, Llorent-martínez J E, et al. Changes in the phenolic compositions of *Elaeagnus umbellata* and *Sambucus lanceolata* after *in vitro* gastrointestinal digestion and evaluation of their potential anti-diabetic properties [J]. *Food Research International*, 2019, 122(8):283-294.
- [15] Ye Z, Cao C, Liu Y, et al. Triglyceride structure modulates gastrointestinal digestion fates of lipids: A comparative study between typical edible oils and triglycerides using fully designed *in vitro* digestion model [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(24):6227-6238.
- [16] 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(1):584-590.
- [17] Liu D, Li Z., Fan Z, et al. Effect of soybean soluble polysaccharide on the pasting, gels, and rheological properties of kudzu and lotus starches [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89(5):443-452.
- [18] 卢成特,苏小军,李清明,等. 淀粉类速溶即食粉的研究进展[J]. 食品工业,2019,40(3): 258-262.
- [19] 唐小闲,汤泉,段振华,等. 不同干燥方式对莲藕淀粉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019,40(6):26-30.
- [20] 李钦,栗瑜婉,饶雷,等. 食品加工方式调控淀粉与多酚相互作用的研究进展[J]. 食品工业科技,2022,43(22):481-490.
- [21] Nan D, Zhong D, Can T, et al. Formation, structure and properties of the starch-poly-

- phenol inclusion complex: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 667-675.
- [22] Liu Y, Ying D, Sanguansri L, et al. Adsorption of catechin onto cellulose and its mechanism study: Kinetic models, characterization and molecular simulation [J]. Food Research International, 2018, 112(10): 225-232.
- [23] 刘通讯, 谭梦珠. 不同干燥温度对普洱茶多酚类物质和香气成分的影响 [J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 264-271, 143.
- [24] 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.
- [25] 阿丽努尔·阿不都热衣木, 张珍珍, 黄亚东, 等. 干制红枣可溶性糖含量变化动态模型的构建 [J]. 新疆农业科学, 2021, 58(7): 1342-1354.
- [26] 李玉壬, 王瑞, 王旭捷, 等. 茶多酚在模拟胃肠消化过程中含量及活性的变化规律 [J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 115-120+22.
- [27] 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.
- [28] Spínola V, Llorent-martínez J E, Castilho C P. Antioxidant polyphenols of madeira sorrel (*Rumex maderensis*): How do they survive to *in vitro* simulated gastrointestinal digestion? [J]. Food Chemistry, 2018, 259: 105-112.
- [29] 徐洪宇, 蒯宜蕴, 詹壮壮, 等. 果皮中酚类物质含量、抗氧化活性及在体外消化过程中成分的变化 [J]. 食品科学, 2019, 40(15): 23-30.
- [30] 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.
- [31] 师聪, 陈学红, 李茹, 等. 体外模拟胃肠消化对覆盆子抗氧化成分及其活性的影响 [J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 83-90.
- [32] 王磊鑫, 吕莹果, 吴娜娜, 等. 膳食纤维对淀粉性质的影响研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2020, 35(6): 173-181.
- [33] Thomas-valdes S, Theoduloz C, Jimenez-aspee F, et al. Effect of simulated gastrointestinal digestion on polyphenols and bioactivity of the native chilean red strawberry (*Fragaria chiloensis ssp. chiloensis f. patagonica*) [J]. Food Research International, 2019, 123 (11): 106-114.
- [34] 李欣, 李志江, 张洪微. 高粱淀粉对多酚在消化过程中释放和抗氧化性的影响 [J]. 粮食与油脂, 2023, 36(6): 16-20.
- [35] Lucas-gonzález R, Ángel Pérez-álvarez J, Moscaritolo S, et al. Evaluation of polyphenol bioaccessibility and kinetic of starch digestion of spaghetti with persimmon (*Diospyros kaki*) flours coproducts during *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128-142.
- [36] 倪德让, 孔祥礼, 孙崇德, 等. 红缨子高粱淀粉分子结构及糊化特性研究 [J]. 中国酿造, 2019, 38(12): 75-79.
- [37] Cheng W, Sun Y, Xia X, et al. Effects of β -amylase treatment conditions on the gelatinization and retrogradation characteristics of wheat starch [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124(3): 107286.
- [38] 万芊. 多酚与玉米淀粉的相互作用及其对淀粉消化和加工特性的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- [39] 岳红亮, 张梦龙, 程新杰, 等. RVA 谱特征值的影响因素及其与稻米食味品质的关系综述 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 16-22.
- [40] Li H, Zhai F Y, Zhu X X, et al. Physicochemical properties and structure of modified potato starch granules and their complex with tea polyphenols [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 166: 521-528.
- [41] Zheng J, Huang S, Zhao R Y, et al. Effect of four viscous soluble dietary fibers on the physicochemical, structural properties, and *in vitro* digestibility of rice starch: a comparison study [J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130181.
- [42] 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.