

三种食源性多酚对马铃薯淀粉理化特性的影响

陈天鸽, 李泳娴, 王露, 许敏, 黄立新, 刘磊

Effects of Three Foodborne Polyphenols on the Physicochemical Properties of Potato Starch

CHEN Tiange, LI Yongxian, WANG Lu, XU Min, HUANG Lixin, and LIU Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050136>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

阿魏酸藜麦淀粉酯Pickering乳液的制备及其抗氧化特性

Preparation of Pickering Emulsion with Ferulic Acid Quinoa Starch Ester and Its Antioxidant Properties

食品工业科技. 2020, 41(22): 14-19,26 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030293>

微波处理对三种淀粉结构及其理化特性的影响

Effects of Microwave Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Three Kinds of Starches

食品工业科技. 2024, 45(24): 90-97 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010112>

槲皮素和芦丁对小麦淀粉的消化特性及其之间相互作用的研究

Study on the Digestibility and Interaction of Quercetin and Rutin to Wheat Starch

食品工业科技. 2021, 42(5): 45-50,59 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050200>

阿魏酸对 $\cdot\text{OH}$ 诱导的肌原纤维蛋白氧化及凝胶特性的影响

Effects of Ferulic Acid on Oxidation and Gel Properties of Meat Myofibrillar Protein Induced by $\cdot\text{OH}$

食品工业科技. 2023, 44(4): 32-40 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030357>

沙蒿籽胶对马铃薯淀粉凝胶的热学性能、质构特性、流变特性的影响

Effects of *Artemisia sphaerocephala* Krasch Gumon on the Thermal, Textural and Rheological Properties of Potato Starch Gel

食品工业科技. 2021, 42(16): 66-74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120197>

玉米阿魏酸对高脂血症大鼠脂代谢和肝损伤的影响

Effect of Corn Ferulic Acid on Lipid Metabolism and Liver Injury in Hyperlipidemia Rats

食品工业科技. 2023, 44(16): 8-14 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020270>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈天鸽, 李泳娴, 王露, 等. 三种食源性多酚对马铃薯淀粉理化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 93–101. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050136

CHEN Tiange, LI Yongxian, WANG Lu, et al. Effects of Three Foodborne Polyphenols on the Physicochemical Properties of Potato Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 93–101. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050136

· 研究与探讨 ·

三种食源性多酚对马铃薯淀粉理化特性的影响

陈天鸽¹, 李泳娴¹, 王露², 许敏¹, 黄立新², 刘磊^{1,*}

(1. 五邑大学药学与食品工程学院, 广东江门 529020;

2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510641)

摘要: 马铃薯是含有多酚和淀粉的粮菜兼用型作物, 在其加工过程中多酚和淀粉会发生相互作用。为了探究不同食源性多酚对马铃薯淀粉理化性质及功能性质的影响, 以马铃薯淀粉为原料, 添加不同比例 (5%、10%、15%、20%) 的阿魏酸、没食子酸和芦丁后, 测定马铃薯淀粉溶解度、膨胀度、凝沉性、冻融稳定性、糊化特性、热力学特性和流变特性的变化。结果表明: 与原马铃薯淀粉相比, 阿魏酸和没食子酸能显著提高马铃薯淀粉的溶解度, 并降低其膨胀度 ($P<0.05$)。添加 20% 的阿魏酸和没食子酸能使马铃薯淀粉的溶解度分别提高 1.3 和 1.8 倍。三种多酚均能显著降低马铃薯淀粉的凝沉性、析水率和峰值黏度 ($P<0.05$)。阿魏酸和没食子酸均能显著降低马铃薯淀粉的起糊温度和峰值温度 ($P<0.05$), 而芦丁的影响不显著。马铃薯淀粉糊稳态流变特性测定发现多酚-淀粉糊出现了明显的剪切稀化现象, 为假塑性流体。本研究结果可为马铃薯淀粉基食品的加工提供理论参考。

关键词: 马铃薯淀粉, 阿魏酸, 没食子酸, 芦丁, 热力学特性

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)09-0093-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050136



本文网刊:

Effects of Three Foodborne Polyphenols on the Physicochemical Properties of Potato Starch

CHEN Tiange¹, LI Yongxian¹, WANG Lu², XU Min¹, HUANG Lixin², LIU Lei^{1,*}

(1. School of Pharmacy and Food Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

2. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Potatoes are a type of grain and vegetable crop that contain polyphenols and starch. The interaction between polyphenols and starch occurs during the processing of potatoes. This research was designed to investigate the effects of different foodborne polyphenols on the physicochemical and functional properties of potato starch (PS). Changes in the solubility, swelling, retrogradation, freeze-thaw stability, pasting properties, thermal, and rheological properties of potato starch were analyzed after the addition of varying concentrations (5%, 10%, 15%, 20%) of ferulic acid (FA), gallic acid (GA), and rutin (RT). The results demonstrated that ferulic acid and gallic acid significantly increased the solubility and decreased the swelling compared to the native starch ($P<0.05$). The addition of 20% ferulic acid and gallic acid resulted in a 1.3-fold and 1.8-fold increase in the solubility of potato starch, respectively. All three polyphenols could significantly reduce the retrogradation, water precipitation rate, and peak viscosity of potato starch ($P<0.05$). Thermodynamic analysis revealed that ferulic acid and gallic acid exerted a significant influence on lowering both the pasting temperature and peak temperature of potato starch ($P<0.05$), while no significant influence of rutin was observed. The rheological characteristics

收稿日期: 2024-05-15

基金项目: 广东省普通高校重点领域专项 (2024ZDZX2007); 百校联百县助力“百县千镇万村高质量发展工程”行动项目 (BQW2024001); 江门市基础与应用基础研究重点项目 (2220002000277); 广东省省科技创新战略专项资金 (“大专项+任务清单”) 项目 (江科 [2023]72 号)。

作者简介: 陈天鸽 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮油加工, E-mail: dove0217@163.com。

* 通信作者: 刘磊 (1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 功能食品, E-mail: liuleifood@163.com。

of potato starch paste in a steady-state condition indicated that the polyphenol-starch paste exhibited notable shear-thinning behavior and functioned as a pseudoplastic fluid. These findings provide a theoretical reference for the processing of potato starch-based foods.

Key words: potato starch; ferulic acid; gallic acid; rutin; thermal properties

马铃薯由于产量高,营养丰富,适应性强,是重要的粮菜兼用型作物。2015 年 1 月,我国已提出推进马铃薯主食化的战略,以马铃薯为主要原料的馒头、面食、糕点等产品渐渐进入了消费者的视野,自此马铃薯主食产品研究成为热点。在馒头、面条等马铃薯主食产品的加工过程中,其淀粉易与多酚接触并发生相互作用。这种相互作用会影响淀粉的溶解性、糊化特性、流变特性等理化特性,进而影响马铃薯产品的品质如消化特性^[1]和贮藏特性^[2]等。

近年来,多酚与淀粉的相互作用已经受到越来越多科研人员的关注。Li 等^[3]研究发现,槲皮素能显著降低淀粉的溶解度、溶胀性。He 等^[4]研究发现,当苦荞麦淀粉添加入槲皮素后,其峰值黏度、谷值黏度和终值黏度增加。然而,也有研究报道阿魏酸能降低大米淀粉的糊化温度和焓值^[5]。Zhu 等^[6]报道绿茶多酚提取物对小麦淀粉的起糊温度和峰值温度无显著影响。以上研究说明不同多酚对淀粉的理化性质会产生不同程度的影响,可能是由于研究中使用的多酚和淀粉来源不同,也可能是由于多酚的添加量和加工条件不同导致的^[7]。已有研究报道马铃薯中含有阿魏酸、没食子酸和芦丁等酚类物质^[8-10]。多酚类物质具有抗氧化、降血糖、抗炎症等生物活性^[11-13]。现代流行病学研究表明长期食用富含多酚的谷物和蔬菜能降低心血管疾病、癌症等慢性病的发病率^[14-15]。在马铃薯的加工过程中,这三种多酚如何影响马铃薯淀粉的理化特性尚不清楚,仍然有待更深入的研究。探明这三种多酚与马铃薯淀粉的相互作用,明确其对马铃薯淀粉理化特性的影响规律,可以为马铃薯淀粉基食品的研发与生产提供理论参考。

本文以马铃薯淀粉为对象,探究三种不同食源性多酚包括阿魏酸(Ferulic acid, FA)、没食子酸(Gallic acid, GA)和芦丁(Rutin, RT)对马铃薯淀粉溶解度、膨胀度、凝沉性、冻融稳定性、糊化特性、热力学特性和流变特性的影响,为研发马铃薯淀粉基食品提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

马铃薯淀粉 分析纯,北大荒马铃薯集团有限公司;阿魏酸、没食子酸、芦丁 分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司。

DHG-9070 烘箱 上海一恒科学仪器有限公司;TDL-5-A 低速离心机 上海安亭仪器厂;KH20R 高速离心机 湖南凯达科学仪器有限公司;SHA-B 水浴振荡器 金坛市医疗仪器厂;Starch Master 2 快速黏度测定仪 瑞典 Perten 公司;DSC200F3 差示扫

描量热仪、AR1500EX 流变仪 美国 TA 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 溶解度与膨胀度的测定 准确称取 500 mg 马铃薯淀粉于离心管中,分别称取占淀粉质量 0%、5%、10%、15% 和 20% 的阿魏酸、芦丁和没食子酸并加入至各离心管中,加入 25 mL 去离子水,充分涡旋混匀,在 95 ℃ 的水浴条件下加热 20 min,以 2 min 为时间间隔进行间歇式涡旋搅拌。取出离心管并在冷水中冷却 20 min 至室温,2000 r/min 离心 30 min。离心后将上清液转移至铝盒中,置于 105 ℃ 烘箱中烘干至恒重,计算得到溶解度与膨胀度。公式如下:

$$\text{溶解度 } S(\%) = \frac{A}{W} \times 100$$

$$\text{膨胀度 } B(\%) = \frac{P}{W(100-S)} \times 100$$

式中: A 表示上清液烘干恒重后的质量, g; W 表示马铃薯淀粉的质量, g; P 表示离心后沉淀物的质量, g。

1.2.2 凝沉性的测定 准确称取马铃薯淀粉 1.0 g(干重)于烧杯中,再加入按照淀粉干重质量的 0%、5%、10%、15% 和 20% 称取 0、50、100、150、200 mg 的多酚,加入 100 mL 去离子水并于 95 ℃ 下加热 20 min,冷却至室温后取 25 mL 淀粉糊于具塞试管中静置,以不加多酚的淀粉样品作为对照,每个样品平行量取 3 份,在 12 h 内每隔 1 h 记录 1 次上清液体积分数(%)。

1.2.3 冻融稳定性的测定 准确称取马铃薯淀粉 1.0 g(干重)于烧杯中,再加入按照淀粉干重质量的 0%、5%、10%、15% 和 20% 称取 0、50、100、150、200 mg 的多酚,加入 500 mL 去离子水混合均匀后在 95 ℃ 条件下充分糊化 20 min,冷却至室温,置于 -18 ℃ 冷冻 22 h,取出后于 30 ℃ 环境下解冻 2 h。解冻后的样品在 8000 r/min 的转速下离心 20 min,弃去上清液后称取沉积物质量,此记为一次冷冻循环,每个样品进行 5 次冷冻循环。样品析水率按照公式进行计算。

$$\text{析水率}(\%) = \frac{\text{淀粉糊质量} - \text{沉积物质量}}{\text{淀粉糊质量}} \times 100$$

1.2.4 糊化特性的测定 参考 Li 等^[16]方法适当改进测定马铃薯淀粉糊化特性。准确称取干基质量为 2.0 g 的马铃薯淀粉于铝筒中,再称取质量为 0、100、200、300 和 400 mg 的多酚加入到铝筒中,使得多酚含量为淀粉含量的 0%、5%、10%、15% 和 20%,

在铝筒中加入去离子水使得样品混合液总重为 28 g。以不加多酚样品作为对照样品。将样品置于快速黏度测定仪中进行测定,设置测定程序,压下塔帽开始测定。测定程序为:将仪器在 50 ℃ 下进行预热,预热结束后在 50 ℃ 下进行搅拌(960 r/min)与平衡(160 r/min)操作,平衡时间为 1 min;平衡结束后以 12 ℃/min 的速度将温度升至 95 ℃,并保持 150 s,期间搅拌桨以 160 r/min 的转速持续搅拌;糊化结束后再以 12 ℃/min 的速率将温度降至 50 ℃,在 50 ℃ 的条件下保持 2 min 后,停止搅拌。记录相应的糊化曲线及特征值。

1.2.5 热力学特性的测定 参考 Xiao 等^[17]方法适当改进测定马铃薯淀粉热力学特性。准确称取 2.0 mg 马铃薯淀粉于铝坩埚中,再加入按照淀粉干重质量的 0%、5%、10%、15% 和 20% 称取 0、0.1、0.2、0.3、0.4 mg 的多酚,按 1:2(w:w)加入蒸馏水,充分混合均匀,并用坩埚压盖密封平衡 24 h,后置于差示扫描量热仪进行测定,条件为以 10 ℃/min 的升温速率从 30 ℃ 加热到 90 ℃,每个样品平行测定三次,记录样品的起糊温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)和吸热焓值(ΔH)。

1.2.6 流变特性的测定

1.2.6.1 稳态剪切流变特性测试 准确称取 70 mg 淀粉(干重)于离心管中,再加入按照淀粉干重质量的 0%、5%、10%、15% 和 20% 称取 0、3.5、7.0、10.5、14.0 mg 的多酚,加入 0.7 mL 蒸馏水,充分涡旋混匀,于 95 ℃ 糊化 20 min。冷却至室温后将样品加载至流变仪的热台上进行测定。采用直径为 40 mm 的平板,设置间隙 1 mm。测试条件如下:测试温度为 25 ℃,剪切速率范围为 0.1~500 s⁻¹,测定剪切过程中剪切应力的变化。将实验所得数据利用幂律方程流变模型进行拟合,方程式如下所示:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

式中: η 为剪切黏度,Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率,s⁻¹;K为稠度系数;n为幂律指数。

1.2.6.2 动态流变特性测试 将 1.2.6.1 制得的样品冷却至室温后,将样品加载至流变仪的热台上,采用直径为 40 mm 的平板,平板间距设置为 1 mm。测试条件如下:测试温度为 25 ℃,应变为 1%,扫描频率范围为 0.1~20 Hz。测定频率变化过程中储能模量 G' 、损耗模量 G'' 和损耗因子 $\tan \delta$ 等参数的变化。

1.3 数据处理

实验数据表现形式为平均值±标准差,采用 Origin 9.0 软件对实验数据进行制图,使用 SPSS 软件 Duncan 检验法对数值进行差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 三种多酚对马铃薯淀粉溶解度与膨胀度的影响

多酚对马铃薯淀粉溶解度的影响如图 1 所示。

由图可知,添加阿魏酸和没食子酸后,马铃薯淀粉的溶解度显著升高($P<0.05$),且其溶解度随多酚含量比例的增加而增加。当阿魏酸的添加量为 15% 时,马铃薯淀粉的溶解度由原来的 10.37% 升高至 23.96%。当没食子酸的添加量为 20% 时,马铃薯淀粉的溶解度为 29.46%。这说明高添加量的酚酸能够有效增加马铃薯淀粉的溶解度。韩雪琴等^[18]也研究发现当没食子酸的添加量为 20% 时,大米淀粉的溶解度由 5.98% 升高至 18.73%。有研究发现^[19],酚酸溶于水后会降低淀粉糊的 pH,对淀粉的溶解性产生影响。另一方面,淀粉溶解度增加与多酚的分子结构有关^[20]。多酚具有大量的羟基,溶于水后与马铃薯淀粉通过氢键相互作用,促进了可溶性淀粉的析出,因此增加了淀粉的溶解性。芦丁对马铃薯淀粉溶解度的增加作用并不明显,5% 低添加量芦丁对淀粉溶解度有轻微的增加作用。这主要是由于芦丁的溶解性很低,难以干扰淀粉分子与水的相互作用。

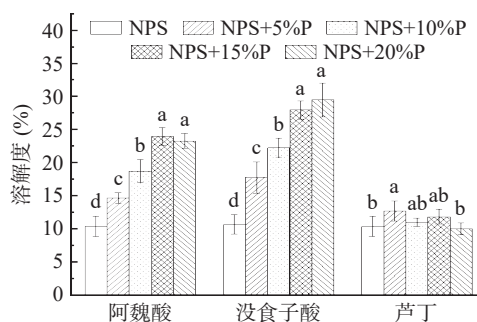


图 1 不同多酚对马铃薯淀粉溶解度的影响

Fig.1 Effects of different polyphenols on the solubility of potato starch

注: NPS: 原马铃薯淀粉; P: 多酚; 图中不同字母表示有显著性差异($P<0.05$), 图 2、图 4 同。

多酚对马铃薯淀粉膨胀度的影响如图 2 所示。由图可知,阿魏酸和没食子酸显著降低了马铃薯淀粉的膨胀度($P<0.05$)。当阿魏酸浓度增大时,其抑制作用愈发显著,而没食子酸对马铃薯淀粉膨胀度的降低无明显浓度效应。淀粉膨胀度降低可能是由于多酚分子上的羟基与马铃薯淀粉中的直链淀粉或支链淀粉的外链结合形成络合物,从而抑制淀粉颗粒糊化膨

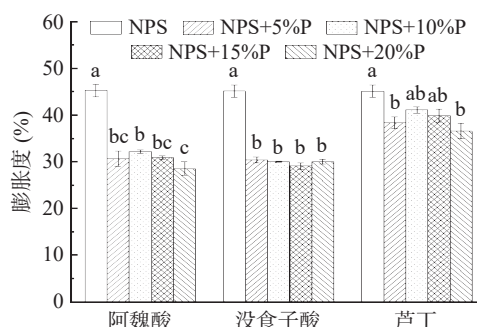


图 2 不同多酚对马铃薯淀粉膨胀度的影响

Fig.2 Effects of different polyphenols on the swelling of potato starch

胀^[21]。芦丁对马铃薯淀粉膨胀度影响较小,这可能是由于芦丁的溶解性差,难以与淀粉分子形成氢键而发生相互作用,进而对淀粉膨胀度的影响较小。

2.2 三种多酚对马铃薯淀粉凝沉性的影响

多酚对马铃薯淀粉凝沉性的影响如图 3 所示。淀粉上清液体积分数常用来表征淀粉的凝沉性,上清液体积分数减少,表明凝沉性降低,由图可知,在 12 h 内,多酚的添加明显减少了马铃薯淀粉糊的上清液体积,表明多酚能够有效减少马铃薯淀粉糊的凝沉性。5% 的阿魏酸与没食子酸能显著降低马铃薯淀粉糊的凝沉性。随着阿魏酸与没食子酸添加量的增高,其对马铃薯淀粉糊凝沉性的抑制作用减弱,但样品糊的上清液的体积分数仍小于原淀粉糊液。不同于阿魏酸和没食子酸,随着芦丁添加量的增加,马铃薯淀粉糊的上清液体积分数减少,凝沉性降低。当芦丁添加量为 5% 时,其 4 h 以后样品糊的沉降曲线,与原淀粉的沉降曲线接近,变化的趋势相似,沉降

曲线在 6 h 后逐渐趋于平缓;随着芦丁的添加量的增加,样品糊的沉降速率不断减少;添加量为 15% 或 20% 时,马铃薯淀粉糊沉降速率变化较小,沉降曲线基本呈现直线的变化形态。

淀粉糊化过程中多酚分子能够与马铃薯淀粉通过氢键发生相互作用而降低马铃薯淀粉的凝沉性。张龙^[22]也有类似的报道,研究发现加入茶多酚后,马铃薯淀粉的凝沉性降低。没食子酸和阿魏酸的添加量能够对马铃薯淀粉的凝沉性产生影响,可能是因为多酚添加量的增加,使淀粉糊的酸度增加,从而降低了淀粉糊的凝沉稳定性。李樊^[23]研究了 pH 对锥栗淀粉的凝沉稳定性的影响,发现其淀粉糊的凝沉稳定性会随糊液 pH 减小而变差。多酚的添加可能会改变淀粉凝胶体系中的水分分布、电负性以及 pH 等因素,从而导致不同多酚对淀粉凝沉特性的影响有显著差异。马铃薯淀粉糊凝沉性的降低,有利于延长马铃薯淀粉类食物的货期,对马铃薯淀粉储藏期间的品质有利。

2.3 三种多酚对马铃薯淀粉冻融稳定性的影响

多酚对马铃薯淀粉冻融稳定性的影响如图 4 所示。由图可知,加入多酚后,马铃薯淀粉凝胶的析水率的增速减缓,说明多酚对马铃薯淀粉凝胶的析水率有一定的抑制作用。对于原马铃薯淀粉而言,随着冻融次数的增加,淀粉的析水率逐渐增加。与原马铃薯淀粉相比,当阿魏酸的添加量为 5% 时,马铃薯淀粉冻融析水率的变化不显著,而随着阿魏酸添加量逐渐增加,其析水率越低,在经过 5 次冻融循环后,阿魏酸添加量为 20% 的马铃薯淀粉凝胶的析水率为 49.48%。说明高添加量的阿魏酸能有效减少马铃薯淀粉凝胶的析水率,与原马铃薯淀粉相比,降低了 17.05%,提高了淀粉的冻融稳定性。随着没食子酸添加量增加,马铃薯淀粉析水率先降低后趋于稳定。当芦丁添加量为 5% 或 10% 时,经过 1 次冻融处理后,马铃薯淀粉冻融析水率的变化不显著,当继续进行冻融处理时,与原马铃薯淀粉相比,体系析水率显著降低,冻融稳定性提高。由此可知,低添加量的芦丁对淀粉冻融稳定性的影响与其冻融次数的增加有关。

析水率是评价淀粉冻融稳定性的重要指标。本研究中的阿魏酸、没食子酸和芦丁均能降低马铃薯淀粉的析水率,提升其冻融稳定性。这一方面是由于多酚具有羟基,能与水分子形成结合水,导致淀粉分子周围自由水含量较低^[24],从而使得马铃薯淀粉的析水率降低;另一方面多酚阻止了淀粉分子间的重排,延缓了淀粉的老化,增强了淀粉的持水力^[25],进而增强了马铃薯淀粉的冻融稳定性。这与 Wu 等^[26]研究结果相一致,随着茶多酚添加量的增加,大米淀粉析水率逐渐降低,表明茶多酚的加入能够显著提高大米淀粉的冻融稳定性。也有研究报道^[27]红树莓多酚能增强大米淀粉的冻融稳定性,并且存在量效关系。以

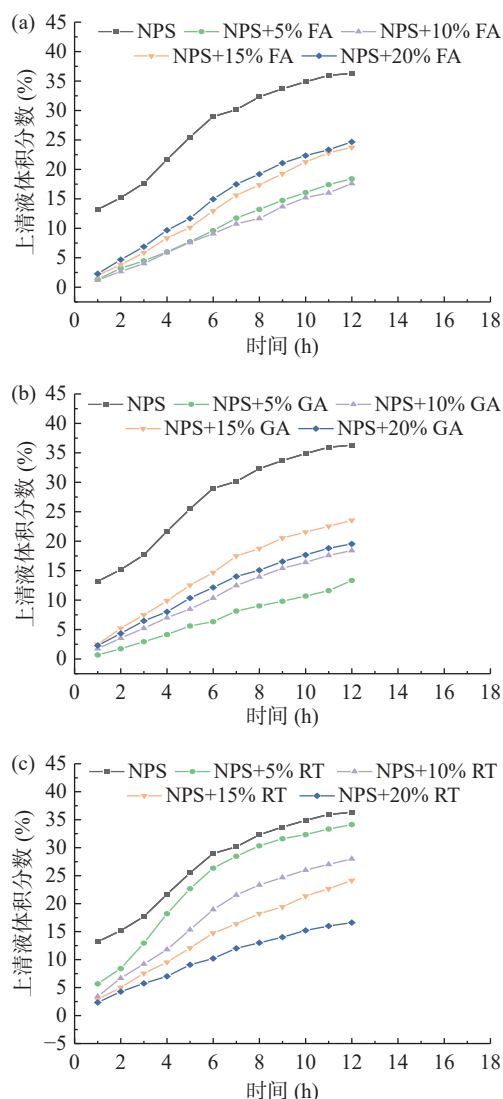


图 3 不同多酚对马铃薯淀粉糊凝沉性的影响

Fig.3 Effects of different polyphenols on the sinking properties of potato starch

注: (a)阿魏酸; (b)没食子酸; (c)芦丁; 图 4、图 5 同。

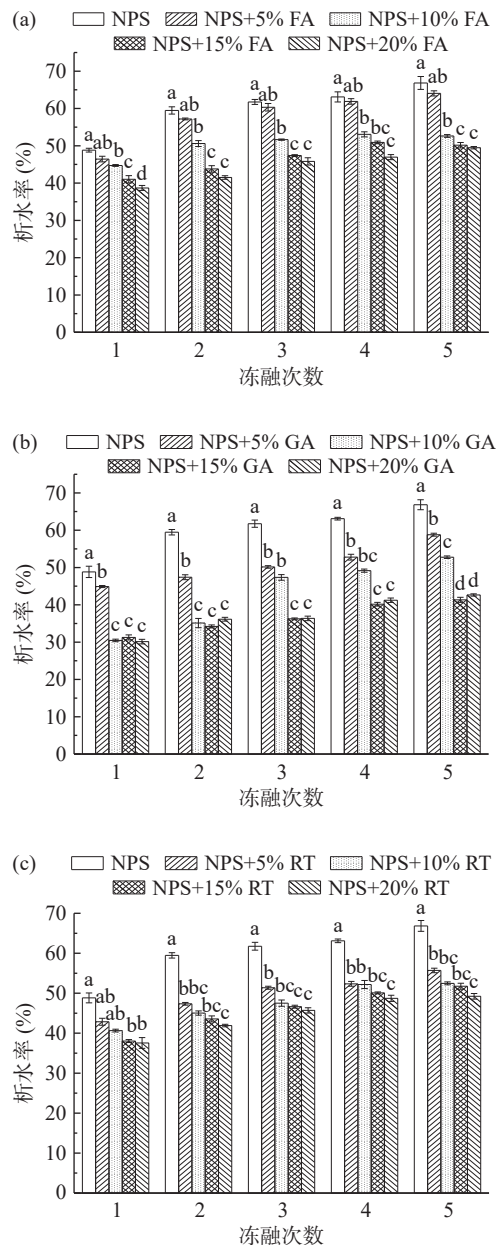


图 4 不同多酚对马铃薯淀粉冻融稳定性的影响
Fig.4 Effects of different polyphenols on the freeze-thaw stability of potato starch

马铃薯为原料加工生产的速冻面条、速冻水饺等食品在生产、储存、运输、配送、销售周期中受到环境温度波动的影响,会经历反复的冻融过程。因此,本研究结果表明添加没食子酸是提高马铃薯淀粉基冷冻食品的冻融稳定性的一种有效方法。

2.4 三种多酚对马铃薯淀粉糊化特性的影响

多酚对马铃薯淀粉糊化特性的影响如表 1 所示。由表可知,与原马铃薯淀粉相比,多酚的加入使得马铃薯淀粉糊化温度发生了轻微的变化。其中,没食子酸对马铃薯淀粉的影响最为显著,在添加量为 20% 时,马铃薯淀粉的起糊温度从 71.7 ℃ 降至 68.6 ℃。随着阿魏酸与没食子酸添加量的增加,马铃薯淀粉的峰值黏度整体呈下降趋势,而随着芦丁添加量的增加,马铃薯淀粉的峰值黏度出现回升。酚酸的加入使得马铃薯淀粉的谷值黏度与终值黏度均有所下降,芦丁则使马铃薯淀粉的终值黏度增加。多酚的添加量对淀粉糊化特性具有显著的影响,可能是由于多酚与淀粉间的氢键、范德华力及疏水相互作用等分子间作用力,导致淀粉颗粒缔合强度受到影响以及多酚的添加对淀粉糊的 pH 有影响^[28-29]。有研究表明,阿魏酸和没食子酸加入能够使得淀粉乳 pH 下降,淀粉在较低的 pH 环境(pH 为 3.0~3.4)中受热易发生降解,使其特征黏度值发生较大幅度的下降^[30]。

崩解值为峰值黏度与谷值黏度之间的差值,可用于表示淀粉糊的热糊稳定性,崩解值越低,其热糊稳定性越强^[31]。与原淀粉相比(2062 cP),添加多酚后,马铃薯淀粉糊的崩解值显著下降($P<0.05$),其中阿魏酸与没食子酸的作用效果较好,其崩解值分别下降至 836~1045 cP、965~1119 cP 范围内,这表明多酚的加入可以增加马铃薯淀粉糊的热糊稳定性。

回生值为终值黏度与谷值黏度的差值,可用于表征淀粉糊的短期回生程度以及淀粉糊的冷稳定性,可作为淀粉老化趋势的指标^[32]。从表 1 可看出,加入除 5% 添加量外的阿魏酸与没食子酸后,马铃薯淀

表 1 不同多酚对马铃薯淀粉的糊化特性的影响

Table 1 Effects of different polyphenols on the pasting properties of potato starch

样品	起糊温度(℃)	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	终值黏度(cP)	崩解值(cP)	回生值(cP)
NPS	71.70±0.21 ^{ab}	4353±20.97 ^a	2291±10.25 ^a	2648±17.92 ^e	2062±14.25 ^a	357±16.55 ^e
NPS+5% FA	71.00±0.06 ^b	2637±13.00 ^e	1801±15.03 ^e	2261±15.57 ^f	836±13.51 ^m	460±13.60 ^e
NPS+10% FA	70.90±0.05 ^c	2490±13.51 ^h	1608±22.31 ^g	1924±23.51 ⁱ	882±21.53 ^l	316±24.69 ^h
NPS+15% FA	70.90±0.10 ^c	2397±15.51 ^k	1502±27.02 ^h	1778±13.21 ^j	895±14.04 ^k	276±10.24 ⁱ
NPS+20% FA	70.85±0.60 ^{cd}	2472±24.51 ⁱ	1427±33.06 ^j	2140±14.51 ^g	1045±12.65 ^b	213±11.52 ^j
NPS+5% GA	70.90±0.10 ^c	2654±27.25 ^f	1639±22.52 ^f	2041±14.16 ^h	1015±23.05 ⁱ	402±15.13 ^f
NPS+10% GA	70.10±0.15 ^d	2414±12.08 ^j	1449±24.04 ⁱ	1757±33.06 ^k	965±22.52 ^j	308±13.51 ⁱ
NPS+15% GA	69.30±0.31 ^e	2384±16.66 ^k	1265±32.12 ^k	1513±24.58 ^l	1119±23.51 ^f	248±13.41 ^k
NPS+20% GA	68.60±0.18 ^f	2272±22.65 ^l	1176±15.03 ^l	1494±13.61 ^m	1096±15.57 ^g	318±15.68 ^h
NPS+5% RT	71.00±0.10 ^b	3883±18.51 ^e	2207±16.11 ^c	2677±17.64 ^d	1676±32.54 ^e	470±14.16 ^d
NPS+10% RT	71.90±0.79 ^a	3915±25.51 ^d	2142±22.08 ^d	2722±14.04 ^c	1773±13.06 ^d	580±12.15 ^b
NPS+15% RT	71.80±0.65 ^a	4058±14.04 ^c	2222±13.21 ^b	2823±24.72 ^a	1836±21.53 ^c	601±13.46 ^a
NPS+20% RT	71.90±0.75 ^a	4232±24.93 ^b	2220±16.25 ^b	2780±7.35 ^b	2012±23.48 ^b	560±9.68 ^c

注: NPS: 原马铃薯淀粉; FA: 阿魏酸; GA: 没食子酸; RT: 芦丁; 同列不同字母表示有显著性差异($P<0.05$), 表2、表3同。

粉糊的回生值降低,表明阿魏酸与没食子酸对于马铃薯淀粉的回生有明显的延缓作用,这可能是多酚与淀粉之间的氢键发生作用,阻碍了淀粉分子链的交联和缠绕^[33]。而芦丁的加入使得马铃薯淀粉回生值增加,这可能是因为在弱酸性条件下,对马铃薯淀粉的短期回生具有一定的促进作用。闻燕等^[34]发现,在 pH 为 5.0 的条件下,马铃薯直链淀粉分子上的羟基会发生部分质子化,减弱了对淀粉分子间以及分子内的氢键的破坏作用,有利于双螺旋结构的形成。总体而言,三种多酚由于结构和溶解性的差异对马铃薯淀粉糊化特性产生影响的作用和方式也存在差异。

2.5 三种多酚对马铃薯淀粉热力学特性的影响

三种多酚对马铃薯淀粉的热力学特性的影响如表 2 所示。由表可知,不同的多酚对马铃薯淀粉热力学性质具有不同的影响。添加阿魏酸后,马铃薯淀粉的起糊温度出现略微下降,但阿魏酸添加量对其影响较小。没食子酸对马铃薯淀粉的起糊温度的影响更加显著,且随没食子酸添加量的增加,起糊温度的降幅增大。当没食子酸添加量为 20% 时,马铃薯淀粉的起糊温度降低了 7.52 °C。当添加阿魏酸和没食子酸后,马铃薯淀粉的峰值温度和终止温度都呈下降趋势,且具有浓度依赖性。在体系中加入芦丁后,马铃薯淀粉的起糊温度和峰值温度出现略微增加,但体系的终止温度降低。三种多酚的加入使得马铃薯淀粉体系的吸热焓值下降,体系焓值随着阿魏酸添加量增加而降低。当没食子酸和芦丁的添加量增加时,焓值呈现先下降后上升的趋势。添加芦丁后,体系糊化焓值降低至 2.44~3.78 J·g⁻¹ 范围内,较原淀粉降低了 34.7%~57.85%。

表 2 不同多酚对马铃薯淀粉的热力学特性的影响

Table 2 Effects of different polyphenols on the thermodynamic properties of potato starch

样品	起糊温度 (°C)	峰值温度 (°C)	终止温度 (°C)	吸热焓值 (J·g ⁻¹)
NPS	57.80±0.21 ^{cd}	68.89±0.30 ^a	79.05±0.12 ^a	5.79±0.01 ^a
NPS+5% FA	56.55±0.83 ^f	67.65±0.15 ^b	75.43±0.21 ^{bc}	3.81±0.15 ^c
NPS+10% FA	57.63±0.34 ^{de}	67.57±0.07 ^b	74.83±0.50 ^{cd}	3.58±0.52 ^{cde}
NPS+15% FA	58.25±0.38 ^{bcd}	67.39±0.26 ^b	74.24±0.33 ^d	3.32±0.24 ^{cde}
NPS+20% FA	57.44±0.31 ^{ef}	67.19±0.32 ^b	73.97±0.18 ^d	2.91±0.06 ^{ef}
NPS+5% GA	53.70±0.33 ^g	64.91±0.07 ^c	74.61±0.56 ^{cd}	4.73±0.17 ^b
NPS+10% GA	52.01±0.16 ^h	63.42±0.53 ^{cd}	71.09±0.31 ^e	3.25±0.42 ^{de}
NPS+15% GA	51.63±0.26 ^h	62.34±1.64 ^d	69.97±0.42 ^f	2.37±0.16 ^g
NPS+20% GA	50.28±0.16 ⁱ	59.11±4.50 ^e	69.09±1.79 ^f	3.24±0.15 ^{de}
NPS+5% RT	58.65±0.58 ^{abc}	69.11±0.13 ^a	76.57±0.41 ^b	3.78±0.07 ^{cd}
NPS+10% RT	58.99±0.37 ^{ab}	69.24±0.22 ^a	76.17±0.58 ^b	3.15±0.60 ^e
NPS+15% RT	59.49±0.49 ^a	69.14±0.11 ^a	74.75±0.10 ^{cd}	2.44±0.27 ^{fg}
NPS+20% RT	58.84±0.20 ^{abc}	69.21±0.19 ^a	75.69±0.18 ^{bc}	3.03±0.11 ^e

以上结果表明,阿魏酸和没食子酸的添加有助于马铃薯淀粉的糊化的发生,降低了马铃薯淀粉的稳定性。芦丁虽然对马铃薯淀粉的糊化温度的下降没有明显的促进作用,但是能够有效降低马铃薯淀粉的糊化焓值。马铃薯淀粉的糊化焓值降低可能归因于

多酚分子的羟基促进了淀粉晶体的破坏,有报道称,酚类化合物的羟基会与淀粉的无定形区和晶体基质相互作用,从而削弱淀粉颗粒分子内的结合力,降低了淀粉的稳定性^[6]。

2.6 三种多酚对马铃薯淀粉的流变特性的影响

2.6.1 多酚对马铃薯淀粉稳态流变特性的影响 多酚对马铃薯淀粉的稳态流变特性曲线的影响如图 5 所示。由图可知,随着没食子酸和阿魏酸添加量的增大,样品的表观黏度减小,而芦丁的加入导致了马铃薯淀粉表观黏度的增大。

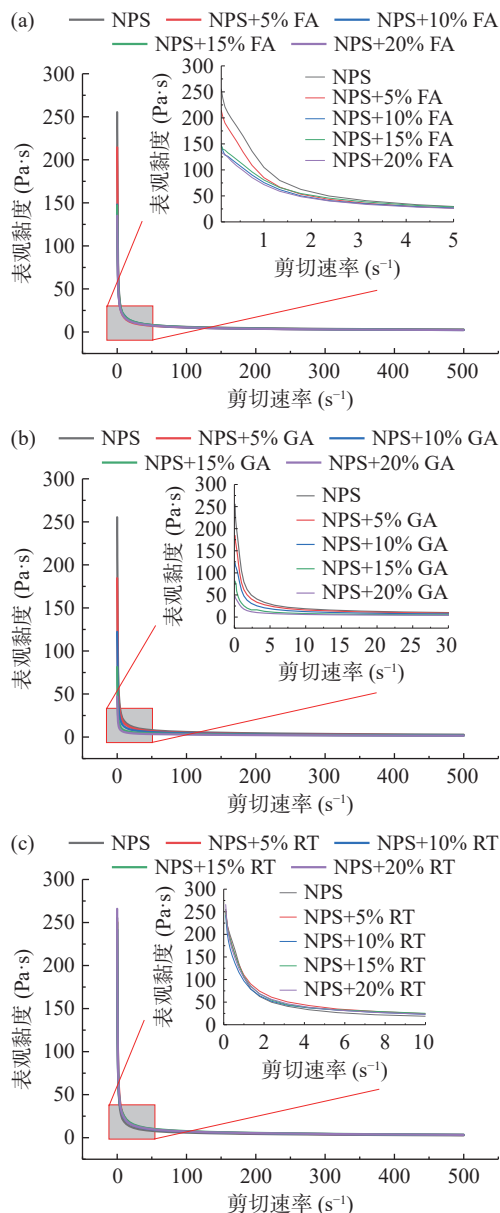


图 5 不同多酚对马铃薯淀粉的表观黏度的影响

Fig.5 Effects of different polyphenols on the apparent viscosity of potato starch

多酚与马铃薯淀粉复合体系的 Herschel-Buckley 模型拟合如表 3 所示。利用 Herschel-Buckley 模型对淀粉的稳态流变行为进行拟合,可以得到流体的稠度系数 K 与流体指数 n。稠度系数 K 与流体的表观黏度相关,K 值越大,黏度越高。流体指数 n 则

表 3 多酚与马铃薯淀粉复合体系的 Herschel-Buckley 模型拟合

Table 3 Herschel-Buckley models for downward steady shear properties of potato starch with different polyphenols

样品	K	n	R ²
NPS	42.585±3.05 ^f	0.553±0.011 ^c	0.9978
NPS+5% FA	41.206±2.107 ^e	0.537±0.008 ^d	0.9988
NPS+10% FA	40.748±1.833 ^b	0.463±0.005 ^l	0.9996
NPS+15% FA	39.479±1.842 ^b	0.474±0.005 ^k	0.9996
NPS+20% FA	42.398±1.633 ^f	0.479±0.004 ^j	0.9995
NPS+5% GA	45.596±1.932 ^e	0.499±0.013 ⁱ	0.9991
NPS+10% GA	35.479±2.117 ⁱ	0.528±0.009 ^e	0.9984
NPS+15% GA	22.583±1.733 ^j	0.579±0.010 ^b	0.9976
NPS+20% GA	15.550±1.071 ^k	0.623±0.011 ^a	0.9982
NPS+5% RT	65.98±3.156 ^b	0.509±0.008 ^h	0.9989
NPS+10% RT	62.044±2.714 ^c	0.521±0.007 ^f	0.9991
NPS+15% RT	69.353±2.977 ^a	0.513±0.007 ^g	0.9991
NPS+20% RT	60.737±3.186 ^d	0.529±0.009 ^e	0.9988

反映了流体与牛顿流体的接近程度。 n 值等于 1 时, 流体为牛顿流体; n 值越小, 流体越显示出假塑性流体的特征。由表可知, 各样品拟合系数 R^2 均在 0.998~0.999 之间, 拟合效果较好。天然马铃薯淀粉以及各多酚-马铃薯淀粉复合物, 其淀粉糊的流体指数均小于 1, 说明流体为典型的假塑性流体, 具有剪切变稀的性质^[35]。Chou 等^[36] 也有类似的报道, 发现玉米、小麦、大米淀粉以及苹果多酚-淀粉复合物, 其淀粉糊的流体指数均在 0 和 1 之间, 符合剪切变稀的性质, 并被鉴定为假塑性流体。

2.6.2 多酚对马铃薯淀粉动态黏弹性特性的影响
阿魏酸、没食子酸和芦丁与马铃薯淀粉体系在不同频率下的黏弹性变化由图 6~图 8 所示。由图可知, 随着扫描频率的增加, 芦丁与马铃薯淀粉体系的 G' 和 G'' 增加, 且 G' 大于 G'' , 即 $\tan \delta$ 始终小于 1, 淀粉体系的弹性强于黏性。这是由于淀粉糊在老化过

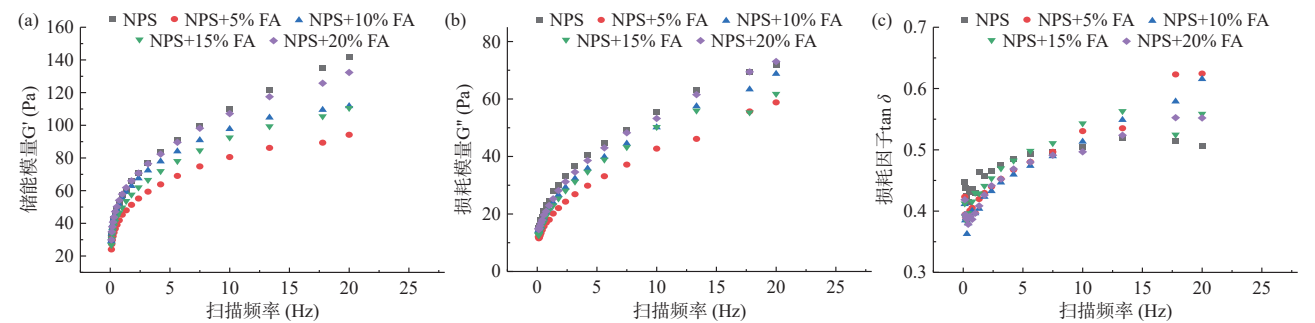


图 6 阿魏酸-马铃薯淀粉体系在不同频率下的黏弹性变化
Fig.6 Viscoelastic change of FA-PS system at different frequencies
注: (a) G' ; (b) G'' ; (c) $\tan \delta$; 图 7、图 8 同。

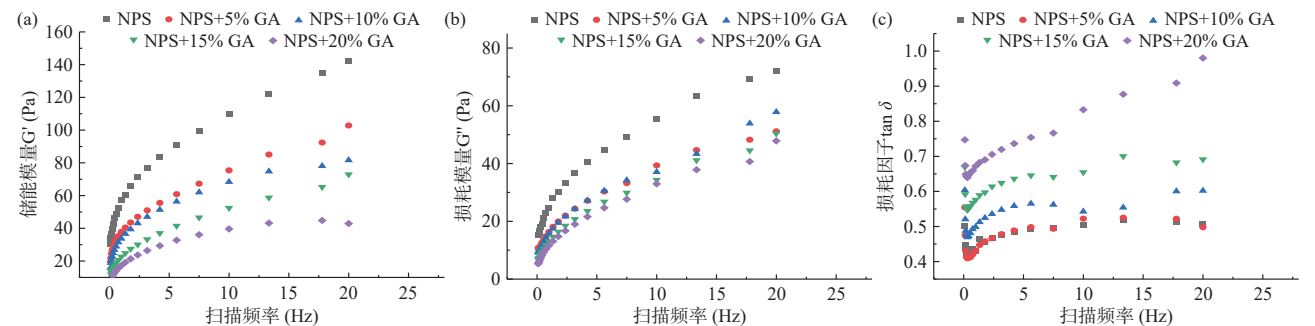


图 7 没食子酸-马铃薯淀粉体系在不同频率下的黏弹性变化
Fig.7 Viscoelastic change of GA-PS system at different frequencies

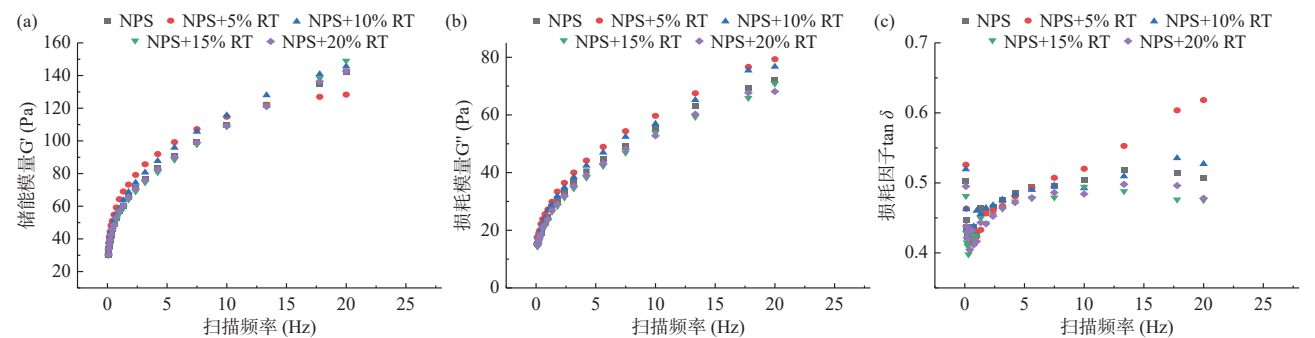


图 8 芦丁-马铃薯淀粉体系在不同频率下的黏弹性变化
Fig.8 Viscoelastic change of RT-PS system at different frequencies

程中的淀粉分子重新通过氢键结合,形成了凝胶网络结构。多酚的加入对马铃薯淀粉的黏弹性产生了一定的影响。5%添加量的芦丁能够降低体系的 G' 并使 G'' 、 $\tan \delta$ 值增加,但添加量在 10% 以上的芦丁使得淀粉体系的 G' 和 $\tan \delta$ 的数值降低,可能是因为高添加量的芦丁会抑制淀粉糊的凝沉并抑制其凝胶形成稳定的网络结构。

与芦丁相比,阿魏酸与没食子酸的加入对淀粉体系影响较大。体系加入没食子酸后,其 G' 和 G'' 均降低,且与多酚添加量呈现明显的负相关,而 $\tan \delta$ 与多酚添加量呈正相关,说明没食子酸对马铃薯淀粉弹性的降低具有更加显著的效果。Li 等^[37]也有类似的报道,发现茶多酚可以降低茶多酚-淀粉复合物的 G' 和 G'' 值,削弱了淀粉凝胶的黏弹性。阿魏酸也能降低马铃薯淀粉的弹性与黏性,但其作用效果随阿魏酸的添加量的增加而受到削弱。低添加量条件下的阿魏酸更有助于 $\tan \delta$ 值的增加。这可能是由于多酚与淀粉可以发生氢键连接,从而减少了淀粉之间的氢键的形成,导致体系 G' 值的降低。

3 结论

本文研究了阿魏酸、没食子酸和芦丁三个食源性多酚对马铃薯淀粉理化特性的影响。结果表明,与原马铃薯淀粉相比,添加阿魏酸和没食子酸能显著提高马铃薯淀粉的溶解度($P<0.05$),20% 的没食子酸能使马铃薯淀粉的溶解度提高 1.8 倍。阿魏酸和没食子酸能显著降低马铃薯淀粉的膨胀度($P<0.05$),而芦丁却无显著影响。冻融稳定性的研究表明,经过 5 次冻融循环后,马铃薯淀粉凝胶的析水率增加了 17.81%,而添加 20% 的没食子酸对析水率的增加表现出了较好的抑制效果。此外,阿魏酸和没食子酸显著降低了马铃薯淀粉的峰值黏度($P<0.05$)及其它特征黏度值,提高了其热糊黏度稳定性。没食子酸能够显著降低马铃薯淀粉糊的糊化温度($P<0.05$),而芦丁的影响较轻微。马铃薯淀粉糊稳态流变特性测定发现多酚-淀粉糊出现了明显的剪切稀化现象,为假塑性流体。综上所述,由于多酚结构和溶解性的不同,三种多酚对马铃薯淀粉理化特性的影响存在明显差异。本研究结果可为马铃薯淀粉基食品的研发与生产提供理论参考。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 李驰,姚佳,韩乔,等. 马铃薯淀粉消化特性及多酚对其影响研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(12): 221-227. [LI C, YAO J, HAN Q, et al. Research progress on the digestive characteristics of potato starch and the effects of plant polyphenols on it[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(12): 221-227.]

[2] 高浩祥,陈南,徐乾达,等. 茶多酚在油炸过程中对马铃薯片

品质及其贮藏稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 20-25. [GAO H X, CHEN N, XU Q D, et al. Effect of tea polyphenols on the quality and storage stability of potato chips during frying[J]. Science and Technology of the Food Industry, 2020, 41(9): 20-25.]

[3] LI Y, GAO S, JI X, et al. Evaluation studies on effects of quercetin with different concentrations on the physicochemical properties and *in vitro* digestibility of tartary buckwheat starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 1729-1737.

[4] HE C, ZHANG Z, LIU H, et al. Effect of rutin and quercetin on the physicochemical properties of tartary buckwheat starch[J]. Starch-Stärke, 2018, 70(1-2): 1700038.

[5] KARUNARATNE, RUSIRU, FAN Z. Physicochemical interactions of maize starch with ferulic acid[J]. Food Chemistry, 2016, 199: 372-379.

[6] ZHU F, CAI Y Z, SUN M, et al. Effect of phytochemical extracts on the pasting, thermal, and gelling properties of wheat starch[J]. Food Chemistry, 2009, 112(4): 919-923.

[7] 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.]

[8] 姚佳,白泽慧,李驰,等. 马铃薯中的酚类物质及其生物活性研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(7): 160-166. [YAO J, BAI Z H, LI C, et al. Research progress on phenols and their biological activities in potatoes[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(7): 160-166.]

[9] MAKORI S I, MU T H, SUN H N. Profiling of polyphenols, flavonoids and anthocyanins in potato peel and flesh from four potato varieties[J]. Potato Research, 2022, 65(1): 193-208.

[10] 郭永福,张莉,刘汉斌,等. 马铃薯化学成分、药理活性及临床应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(36): 13-17. [GUO Y F, ZHANG L, LIU H B, et al. Advances in chemical constituents, pharmacological effects and clinical application of potato[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(36): 13-17.]

[11] RU W D, PANG Y H, GAN Y R, et al. Phenolic compounds and antioxidant activities of potato cultivars with white, yellow, red and purple flesh[J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 419.

[12] 王亚云. 紫色马铃薯花色苷提取工艺及其降血糖活性的研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016. [WANG Y Y. Studies on the extraction processes and hypoglycemic activity of anthocyanins from purple potato[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016.]

[13] WAHYUDI I A, RAMADHAN F R, WIJAYA R I K, et al. Analgesic, anti-inflammatory and anti-biofilm forming activity of potato (*Solanum tuberosum* L.) peel extract[J]. Indonesian Journal of Cancer Chemoprevention, 2020, 11(1): 30-35.

[14] TSAO R. Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols[J]. Nutrients, 2010, 2(12): 1231-1246.

[15] BHOSALE P B, HA S E, VETRIVEL P, et al. Functions of polyphenols and its anticancer properties in biomedical research: A narrative review[J]. Translational Cancer Research, 2020, 9(12): 7619-7631.

[16] LI M, PERNELL C, FERRUZZI M G. Complexation with phenolic acids affect rheological properties and digestibility of potato starch and maize amylopectin[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 77: 843-852.

- [17] XIAO H, LIN Q, LIU G, et al. Inhibitory effects of green tea polyphenols on the retrogradation of starches from different botanical sources[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2013, 6(8): 2177–2181.
- [18] 韩雪琴, 黄立新, 郝娟, 等. 没食子酸与大米淀粉的相互作用[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(10): 103–111. [HAN X Q, HUANG L X, HAO J, et al. Interactions between gallic acid and rice starch[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(10): 103–111.]
- [19] BUILDERS P F, MBAH C C, ADAMA K K, et al. Effect of pH on the physicochemical and binder properties of tigernut starch[J]. *Starch-Stärke*, 2014, 66(3–4): 281–293.
- [20] ZHU F. Interactions between starch and phenolic compound[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(2): 129–143.
- [21] 郑学玲, 张玉玉, 张杰. 青稞淀粉理化特性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(4): 30–36. [ZHEN X L, ZHANG Y Y, ZHANG J. Study on physicochemical properties of barley starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2011, 26(4): 30–36.]
- [22] 张龙. 马铃薯淀粉糊化性质及无矾马铃薯粉皮加工工艺研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. [ZHANG L. Study on the gelatinization properties of potato starch and the processing technology of non-alum potato starch sheets jelly[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.]
- [23] 李樊. 橡实淀粉凝沉特性与晶体特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013. [LI F. Study on the property of retrogradation and crystallization of acorn starches[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2013.]
- [24] 金娃, 陈威, 李松原, 等. 海藻糖对三种淀粉理化性质的影响[J]. *中国调味品*, 2021, 46(2): 152–155. [JIN W, CHEN W, LI S Y, et al. The effect of trehalose on the physical and chemical properties of three starches[J]. *China Seasoning*, 2021, 46(2): 152–155.]
- [25] 柴艳伟. 茶多酚对高直链玉米淀粉消化性的影响及机理[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [CAI Y W. The effect and mechanism of tea polyphenols on the digestibility of high amylose corn starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.]
- [26] WU Y, NIU M, XU H. Pasting behaviors, gel rheological properties, and freeze-thaw stability of rice flour and starch modified by green tea polyphenols[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 118: 108796.
- [27] 王欢, 贾强, 黄利华, 等. 红树莓多酚提取物对大米淀粉理化性质和体外消化性能的影响[J]. *食品科技*, 2021, 46(9): 265–270.
- [WANG H, JIA Q, HUANG L H, et al. Effects of polyphenol extract of red raspberry on physicochemical properties and *in vitro* digestibility of rice starch[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(9): 265–270.]
- [28] 石碧, 曾维才, 狄莹. 植物单宁化学及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020. [SHI B, ZENG W C, DI Y. Plant tannin chemistry and applications[M]. Beijing: Science Press, 2020.]
- [29] 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 and Technology*, 2021, 112: 667–675.
- [30] ALEIXANDRE A, ROSELL C M, et al. Starch gels enriched with phenolics: Effects on paste properties, structure and digestibility[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 161: 113350.
- [31] 任顺成, 孙晓莎. 芦丁和槲皮素对小麦淀粉理化特性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(2): 25–30. [REN S C, SUN X S. Effects of rutin and quercetin on the physicochemical properties of wheat starch[J]. *Food Science*, 2018, 39(2): 25–30.]
- [32] 章丽琳, 付晶晶, 张喻. 应用 RVA 仪分析凉薯淀粉的糊化特性[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(4): 38–41. [ZHANG L L, FU J J, ZHANG Y. Study on the pasting and retrogradation properties of corn starch/xanthan gum combinations[J]. *Grain and Oil*, 2017, 30(4): 38–41.]
- [33] WANG L B, WANG L J, LI Z G, et al. Diverse effects of rutin and quercetin on the pasting, rheological and structural properties of tartary buckwheat starch[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127556.
- [34] 闻燕, 唐津忠, 彭勃, 等. 盐浓度、温度和 pH 值对 NaCl 诱导的马铃薯直链淀粉自聚集行为的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(5): 14–22. [WEN Y, TANG J Z, PENG B, et al. Effects of salt concentration, temperature and pH value on the NaCl-induced self-assembly behavior of potato amylose[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(5): 14–22.]
- [35] ZHOU Y, LI A, YANG Y, et al. Effect of guar gum on gelatinization and rheological properties of castanea henryi starch[J]. *Food Science*, 2017, 38(23): 65–69.
- [36] CHOU S, MENG X, CUI H, et al. Rheological and pasting properties of maize, wheat and rice starch as affected by apple polyphenols[J]. *International Journal of Food Properties*, 2019, 22(1): 1786–1798.
- [37] LI J, SHEN M, XIAO W, et al. Regulating the physicochemical and structural properties of different starches by complexation with tea polyphenols[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 142: 108836.