DOI:10.12441/spyswjs.20241203004 [文章编号] 1673-1689(2025)07-0041-10

茶多糖对板栗淀粉特性的影响

雷 磊 付文军 杨玲玲 刘海波 桑大席 王 清*

(信阳农林学院食品科学与工程学院,河南 信阳 464000)

摘要:【目的】改善板栗淀粉特性。**【方法】**将茶多糖以不同比例添加至板栗淀粉中,探究茶多糖对板栗淀粉持水性、消化特性、质构特性等性质的影响。**【结果】**茶多糖添加质量分数为1%时,板栗淀粉的持水性、持油性最大,之后随茶多糖添加比例的增大逐渐降低;茶多糖添加质量分数为1%~8%时,板栗淀粉的透明度逐渐增大,茶多糖添加质量分数为16%时,透明度会显著降低;适度添加茶多糖会显著增加板栗淀粉的溶解度和膨胀度;添加茶多糖可显著降低板栗淀粉的析水率,提高其冻融稳定性;板栗淀粉的黏度随茶多糖添加质量分数的增大逐渐降低;消化试验表明,板栗淀粉中慢消化淀粉和抗性淀粉质量分数随茶多糖添加质量分数增大而增加;板栗淀粉的硬度和弹性随茶多糖添加质量分数的增加逐渐降低。**【结论】**茶多糖在一定程度上可显著改善板栗淀粉的特性,该研究结果为茶多糖在板栗淀粉改性中的应用及板栗淀粉资源的开发利用提供依据。

关键词:茶多糖;板栗淀粉;持水性;消化特性;质构特性

Effects of Tea Polysaccharides on the Properties of Chestnut Starch

*LEI Lei FU Wenjun YANG Lingling LIU Haibo SANG Daxi WANG Qing**

(College of Food Science and Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to improve the properties of chestnut starch. [**Method**] Tea polysaccharides were added to chestnut starch in different proportions, and the effects of tea polysaccharides on the water-holding capacity, digestive properties, textural properties, and other properties of chestnut starch were investigated. [**Result**] The water-holding and oil-holding properties of chestnut starch were the largest when tea polysaccharides were added at 1% and then gradually decreased with the increase in the proportion of tea polysaccharides added. The transparency of chestnut starch gradually increased when tea polysaccharides were added from 1% to 8% and decreased significantly when tea polysaccharides were added at 16%. Adding tea polysaccharides at appropriate proportions significantly increased the solubility and swelling of chestnut starch. The addition of tea polysaccharides significantly reduced the water precipitation rate and improved the freeze-thaw stability of chestnut starch. The viscosity of chestnut starch gradually decreased with the increase in the proportion of tea polysaccharides added. The digestion test results indicated that the content of slowly digested starch and resistant starch in chestnut starch increased with the increase in the proportion of tea polysaccharides added. The hardness and elasticity of chestnut starch gradually decreased with the increase in the proportion of tea polysaccharides added. [**Conclusion**] Tea polysaccharides can significantly improve the properties of chestnut starch to a certain extent. The results provide a reference for the application of tea polysaccharides in the modification of chestnut starch and the development and utilization of chestnut starch resources.

Keywords: tea polysaccharide; chestnut starch; water-holding capacity; digestive property; textural property

基金项目:河南省自然科学基金面上项目(242300420173);2023年河南省本科高校产教融合研究项目(47);河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2024SJGLX0198);河南省高等学校重点科研计划项目(23A550015)。

通信作者:王清(1988—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事糖类资源开发研究。E-mail:2479902416@qq.com

收稿日期:2024-12-03 **修回日期:**2025-03-26

近年来，板栗因含有丰富的淀粉、蛋白质、必需脂质和各种生物活性物质而受到消费者的关注，被广泛用于加工多种食品，如糖炒栗子、栗子糕、栗子饮料等[1-2]。淀粉是板栗中的主要成分，决定了板栗产品的加工特性和营养功能。天然的板栗淀粉存在不易溶解、透明度低、易老化、抗剪切等缺陷，这不仅限制了板栗在食品加工领域的应用，还导致其难以贮存和深度加工[3]。因此，寻求改良板栗淀粉理化特性的方法是推广商用板栗淀粉和提高其工业应用价值的关键。

近年来，非淀粉多糖因天然、方便、无毒、环保等特性，被广泛应用于改善淀粉的功能特性，从而改善淀粉类食品的品质[4-5]。Zhang等[6]发现加入黄精多糖可降低甘薯淀粉的回生黏度，并使甘薯淀粉凝胶的硬度、黏结性和咀嚼性降低，弹性增加。Kong等[7]向玉米淀粉中加入白榕多糖，结果发现白榕多糖可抑制淀粉的短期降解，延缓其凝胶化过程，同时降低了淀粉凝胶的强度和硬度，阻止了水分的迁移。Zhang等[8]探究了西葫芦多糖对马铃薯淀粉特性的影响，结果发现淀粉的峰值黏度、衰减黏度、最终黏度和回生黏度降低，快消化淀粉含量降低，慢消化淀粉含量和抗性淀粉含量提高。茶多糖是茶叶中的天然聚合物，由单糖、糖醛酸和蛋白质组成，属于杂多糖复合物。茶多糖具有抗氧化、降血糖、免疫调节和调节肠道菌群等诸多健康功效[9-10]，因此被认为是具有良好开发和应用前景的活性物质，但是目前鲜见茶多糖在淀粉改性及加工中应用的报道。

为了改善板栗淀粉的加工特性，提高其品质和健康功效，作者将茶多糖加入板栗淀粉，探究茶多糖对板栗淀粉理化特性的影响，为茶多糖的应用及板栗淀粉的深加工利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

茶多糖：纯度≥95%，上海源叶生物科技有限公司；板栗淀粉：纯度89.23%，作者提取；板栗：信阳西亚超市；乙醇、硫酸、氢氧化钠、冰乙酸：分析纯，郑州派尼化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

质构仪：CTX型，倍迎电子科技（上海）有限公司；凯氏定氮仪：ST-04型，山东盛泰仪器有限公司；紫外可见分光光度计：A390型，翱艺仪器（上海）有限公司；傅里叶变换红外光谱仪：iS5型，美国Thermo Fisher Scientific公司；流变仪：MCR 302e型，安东帕（上海）商贸有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品的制备

向10 g板栗淀粉中分别加入0.1、0.2、0.4、0.8、1.6 g茶多糖制备成茶多糖-板栗淀粉样品，并混拌均匀，茶多糖的添加质量分数分别为0、1%、2%、4%、8%、16%，以不加茶多糖的淀粉作为对照。

1.3.2 持水性与持油性的测定

参照施建斌等[11]的方法并稍加修改。称取适量板栗淀粉样品m_1，按质量比1∶10加入蒸馏水（或食用大豆油），室温搅拌30 min，4 000 r/min离心10 min，弃上清液，收集沉淀并称质量m_2。持水性（WHC）、持油性（OHC）按式（1）计算。

$$W_{HC}/O_{HC}=\frac{m_2-m_1}{m_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

W_{HC}——持水性，%；

O_{HC}——持油性，%；

m_1——板栗淀粉样品质量，g；

m_2——沉淀质量，g。

1.3.3 透明度的测定

参照刘惠娟等[12]的方法并稍加修改。称取适量不同比例板栗淀粉-茶多糖复配粉，加入一定量蒸馏水，配制成质量分数6%的悬浮液，置于95 ℃水浴糊化15 min，冷却至室温。以蒸馏水为对照，在波长620 nm处测定样品的透光率，以透光率表示透明度。

1.3.4 溶解度和膨胀度的测定

参照靳宇丹等[13]的方法并稍加修改。准确称取适量样品m_0于50 mL离心管中，加入适量蒸馏水配制成质量分数1%的悬浊液，95 ℃水浴糊化30 min，冷却至室温，3 000 r/min离心20 min，取上清液于105 ℃烘箱中烘干，称质量m_1，计算其溶解度（S），同时称沉淀质量m_2，淀粉的膨胀度（E_D）按照式（2）~（3）计算。

$$S=\frac{m_1}{m_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

S——溶解度，%；

m_0——样品质量，g；

m_1——上清液干燥后质量，g。

$$E_D=\frac{m_2}{m_0(1-S)}\times 100\% \quad (3)$$

式中：

E_D——膨胀度，%；

m_0——样品质量，g；

S——溶解度，%；

m_2——沉淀质量，g。

1.3.5　冻融稳定性测定

参照孔祥如[14]的方法并稍加修改。称取适量淀粉样品于离心管G_1中，制成质量分数6%的悬浮液，沸水浴中加热搅拌20 min，确保完全糊化。样品冷却至室温后称质量G_2，置于−20 ℃冰箱中冷冻24 h。冷冻结束后将样品取出，于30 ℃水浴2 h，4 000 r/min离心10 min，去除上清液后称质量G_3。冷冻−解冻过程为1次循环，共5次循环。析水率（W_{SR}）按照式（4）计算。

$$W_{SR}=\frac{G_2-G_3}{G_2-G_1}\times 100\% \quad (4)$$

式中：

W_{SR}——析水率，%；

G_1——离心管质量，g；

G_2——离心管与样品在室温时的质量，g；

G_3——离心后离心管与样品的质量，g。

1.3.6　糊化特性的测定

参照Zhang等[8]的方法测定淀粉的糊化特性。取3.0 g淀粉样品与25.0 g蒸馏水在铝筒中混合并搅拌均匀。测试程序：温度50 ℃保持1 min，以12 ℃/min的速率加热到95 ℃，于95 ℃保持3 min，最后以12 ℃/min的速率冷却至50 ℃并保持。

1.3.7　傅里叶红外光谱测定

按照孔祥如[14]的方法并稍加修改。称取适量样品加入蒸馏水，制成质量分数6%的悬浮液，沸水浴中加热糊化20 min。将糊状样品冷却至室温后，真空冷冻干燥，研磨成粉，过100目筛。取2 mg样品与200 mg溴化钾均匀混合后压片，在4 000~500 cm^{-1}进行扫描。

1.3.8　消化特性的测定

参照康志敏等[15]的方法并稍加修改。准确称取200 mg样品于50 mL离心管中，加入5 mL蒸馏水，轻轻振荡使其混匀。沸水浴30 min使复配体系完全糊化，冷却至37 ℃，加入10 mL醋酸钠缓冲液（0.2 mol/L，pH 5.2），置于37 ℃恒温摇床中30 min。加入5 mL预先孵育过的混合酶液（猪胰酶20 U/mL、糖化酶20 U/mL），形成20 mL的反应体系。分别于0、20、120 min时取0.2 mL的消化液，加入2 mL的无水乙醇以达到灭酶的目的，随后进行离心处理，离心后取上清液测定其吸光度。快消化淀粉（RDS）、慢消化淀粉（SDS）与抗性淀粉（RS）质量分数分别按式（5）~（7）计算。

$$R_{DS}=\frac{(G_{20}-G_0)\times 0.9}{T_S}\times 100\% \quad (5)$$

式中：

R_{DS}——RDS质量分数，%；

G_{20}——样品水解20 min时生成的葡萄糖质量，mg；

G_0——样品初始葡萄糖质量，mg；

T_S——样品总淀粉质量，mg。

$$S_{DS}=\frac{(G_{120}-G_{20})\times 0.9}{T_S}\times 100\% \quad (6)$$

式中：

S_{DS}——SDS质量分数，%；

G_{120}——样品水解120 min时生成的葡萄糖质量，mg；

G_{20}——样品水解20 min时生成的葡萄糖质量，mg；

T_S——样品总淀粉质量，mg。

$$R_S=\frac{(T_S-R_{DS}-S_{DS})}{T_S}\times 100\% \quad (7)$$

R_S——RS质量分数，%；

T_S——样品总淀粉质量，mg。

S_{DS}——SDS质量分数，%；

R_{DS}——RDS质量分数，%。

1.3.9　质构特性分析

参照于中玉等[16]的方法并稍加修改，称取淀粉样品加入适量蒸馏水，制成质量分数6%的悬浮液，置于沸水浴中糊化30 min，待充分糊化后将其冷却至室温，4 ℃下冷藏24 h用于质构测定。测试条件：TPA模式，测试速率60 mm/min，压缩程度40%，触发力0.1 N。

1.3.10　流变学特性分析

参照曾琼等[17]的方法并稍加修改。称取适量淀粉样品加入蒸馏水，制成质量分数6%的悬浮液，置于沸水浴中糊化30 min，待充分糊化后将其冷却至室温，测定静态流变特性以及动态黏弹性。

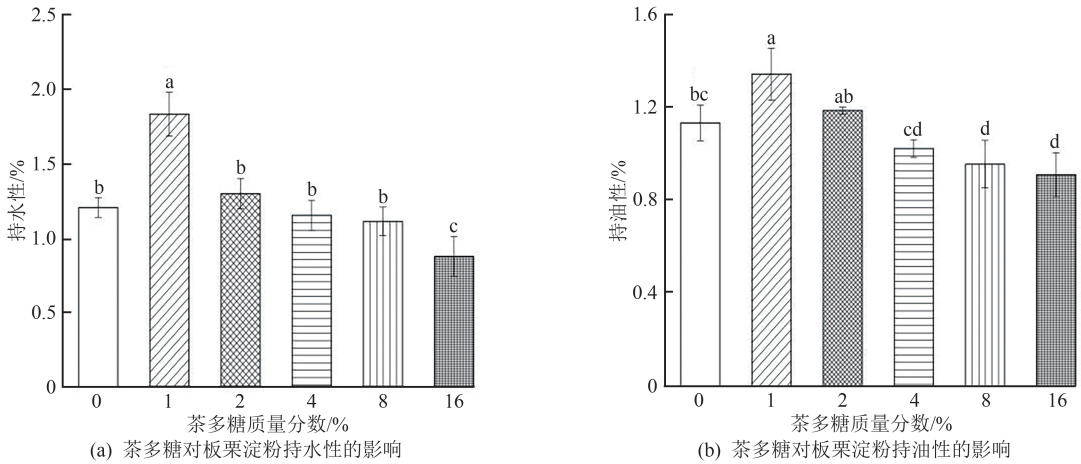
1.4　**数据处理**

每个试验设置3次平行，试验结果以平均值±标准差表示。利用软件SPSS 2022进行数据处理，采用软件Origin 2018制图。

2 结果与讨论

2.1 茶多糖添加质量分数对板栗淀粉持水性与持油性的影响

持水性是由于淀粉分子链中存在亲水性基团而具有保持水分的能力，其对淀粉类食品的色泽、口感和营养等品质具有重要影响[18]。不同板栗淀粉样品持水性见图1(a)。通过添加适量的茶多糖可以提高板栗淀粉的持水性，不同板栗淀粉样品的持水性见图1(a)。未添加茶多糖时，板栗淀粉的持水性为(1.20±0.07)%。茶多糖添加质量分数为1%时，板栗淀粉的持水性显著高于空白组(P<0.05)，为(1.83±0.15)%。茶多糖添加质量分数为2%时，其持水性为(1.30±0.10)%，与空白组无显著差异(P>0.05)。随着茶多糖质量分数的增加，板栗淀粉持水性逐渐降低，可以看出添加过量茶多糖会使持水性下降。这一现象发生的原因可能是由于茶多糖通过氢基、羧基等官能团与板栗淀粉中的水分子形成氢键，从而增强其持水性[19]，但过量的茶多糖在淀粉表面形成了物理屏障，阻碍了水分子的运动，反而降低了板栗淀粉的持水性。淀粉的吸油能力主要是由于其在毛细管吸引下能够与油脂以物理吸附的方式结合[18]。与板栗淀粉持水性能相似，添加适量的茶多糖可以提高板栗淀粉的持油性。如图1(b)所示，当茶多糖添加质量分数为1%时，板栗淀粉的吸油能力最好，为(1.34±0.11)%，显著高于空白组的(1.13±0.08)%。当添加过量茶多糖时，板栗淀粉持油性逐渐降低。淀粉吸油能力主要依赖于淀粉内部结构和形状大小，过量的茶多糖可能会导致淀粉结构特征发生变化，从而影响其对油脂的吸附[20]。



(a) 茶多糖对板栗淀粉持水性的影响 (b) 茶多糖对板栗淀粉持油性的影响

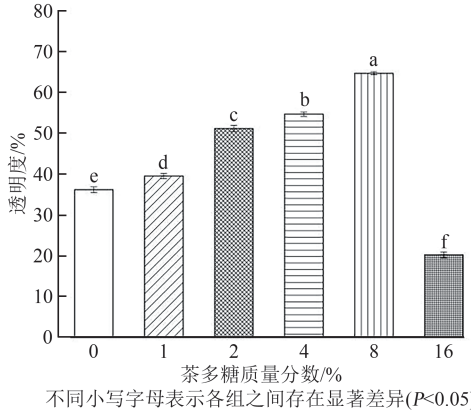
不同小写字母表示各组之间存在显著差异(P<0.05)。

图1 茶多糖添加量对板栗淀粉持水性与持油性的影响

Fig. 1 Effects of tea polysaccharides on the water-holding and oil-holding properties of chestnut starch

2.2 茶多糖添加质量分数对板栗淀粉透明度的影响

透明度是淀粉分子在水中溶胀、分散程度的体现，客观上反映出淀粉产品质量的优劣[16]。如果淀粉分子在吸水和受热的过程中完全膨胀，糊化后淀粉分子之间不会发生缔合作用，那么淀粉糊中没有残存的淀粉颗粒，也没有回生后形成的凝胶束，淀粉糊非常透明[21]。图2显示了茶多糖对糊化板栗淀粉透明度的影响。随着茶多糖质量分数的增加，复配体系的透明度呈现先上升后下降的趋势，当茶多糖添加质量分数为8%时，糊化板栗淀粉的透明度最高，为(64.72±0.39)%，且显著高于其他组(P<0.05)。这可能是由于适量的茶多糖会促进水分子进入淀粉分子内部，使其结构充分



不同小写字母表示各组之间存在显著差异(P<0.05)。

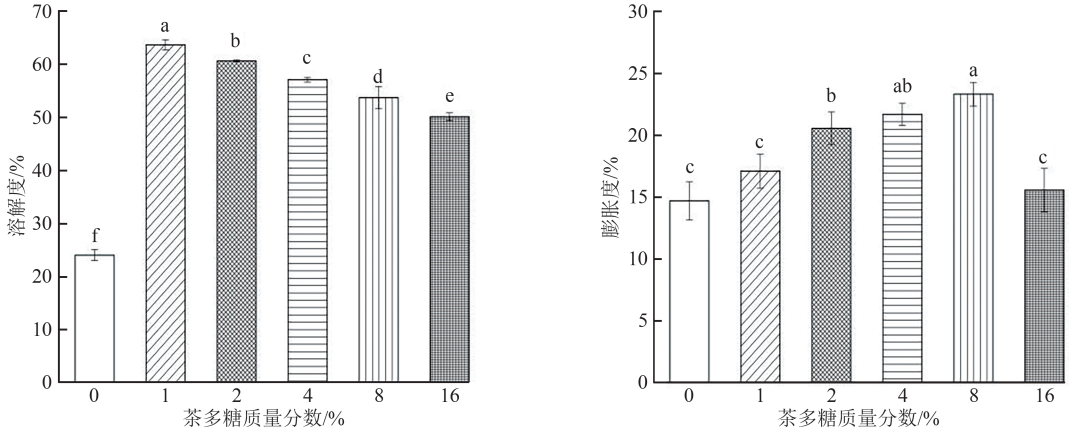
图2 茶多糖添加质量分数对糊化板栗淀粉透明度的影响

Fig. 2 Effect of tea polysaccharides mass fraction on the transparency of chestnut starch paste

膨胀，体积增大[22]。当茶多糖添加质量分数为16%时，糊化淀粉透明度下降，这可能是因为过量茶多糖附着在板栗淀粉颗粒表面，阻碍淀粉颗粒完全膨胀糊化，导致淀粉糊中残存淀粉颗粒，从而造成淀粉糊透明度下降[23]。

2.3　茶多糖添加质量分数对板栗淀粉溶解度和膨胀度的影响

淀粉的溶解度与膨胀度反映了淀粉分子在糊化过程中的吸水溶解能力[24]。如图3(a)所示，添加茶多糖后，板栗淀粉的溶解度显著增加(P<0.05)，但随着茶多糖添加质量分数的增加，板栗淀粉的溶解度会下降。当茶多糖添加质量分数为1%时，板栗淀粉的溶解度最高，为(63.67±0.95)%。当茶多糖添加质量分数为16%时，板栗淀粉的溶解度为(50.07±0.76)%。溶解度的增加可能是由于茶多糖的添加使水分子更易渗透到淀粉颗粒内部，通过氢键与游离的羟基结合，同时形成比淀粉更具水亲和力的游离糖基[20]。如图3(b)所示，适当添加茶多糖可以提高板栗淀粉的膨胀度。当添加质量分数为8%的茶多糖时，板栗淀粉的膨胀度最高，为(23.29±0.96)%。当茶多糖添加质量分数超过8%时，板栗淀粉的膨胀度就会下降。这可能是由于茶多糖过量添加会导致其包裹在淀粉周围，与淀粉分子形成竞争，抑制了淀粉的吸水膨胀。



(a) 茶多糖对糊化板栗淀粉溶解度的影响　(b) 茶多糖对糊化板栗淀粉膨胀度的影响

不同小写字母表示各组之间存在显著差异(P<0.05)。

图3　茶多糖添加质量分数对糊化板栗淀粉溶解度和膨胀度的影响

Fig. 3　Effects of tea polysaccharides mass fraction on the solubility and swelling of chestnut starch paste

2.4　茶多糖添加质量分数对糊化板栗淀粉冻融稳定性的影响

糊化淀粉经过冻融后，其结构会变为海绵状，水分从内部析出。以析水率表示淀粉的冻融稳定性，析水率越小，则冻融稳定性越好[25]。茶多糖对糊化板栗淀粉冻融稳定性的影响见表1。未添加茶多糖的糊化板栗淀粉的析水率随着冻融循环次数的增多逐渐增大，这可能是在反复冻融过程中，板栗淀粉颗粒结构遭到一定程度的破坏，致使其冻融稳定性下降。与空白组相比，冻融循环1次时，随着茶多糖添加量的增大，析水率逐渐减小，说明茶多糖的加入能有效提高淀粉的冻融稳定性。随着循环次数的增加，茶多糖添加量对糊化板栗淀粉析水率的影响更为明显，这可能是茶多糖分子缠绕镶嵌在淀粉颗粒周围或分子缝隙之间，减少了反复冻融过程中水分的流失[19]。这些结果说明茶多糖的添加能有效降低糊化板栗淀粉的析水率，提高其冻融稳定性，可以作为改善板栗淀粉冻融稳定性的方法。

2.5　茶多糖添加质量分数对板栗淀粉糊化特性的影响

糊化特性可以反映淀粉在加热过程中的黏度变化及凝胶化状态[6]。茶多糖对板栗淀粉糊化特性的影响见表2。茶多糖添加质量分数为1%时，板栗淀粉的黏度等参数与对照组无显著性差异。随着茶多糖添加质量分数的增加，板栗淀粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度呈逐渐降低的趋势。板栗淀粉黏度的下降说明茶多糖的添加抑制了淀粉颗粒的溶胀能力，这可能是由于茶多糖具有一定的吸水能力，在糊化过程中与淀粉颗粒竞争获得水分子，导致淀粉颗粒的溶胀减弱。衰减值反映淀粉在糊化过程中的损伤趋势和易分解程度，回生值与直链淀粉重排再结

晶及淀粉颗粒状态逆转趋势有关[8,26]。板栗淀粉的衰减值、回生值随茶多糖添加质量分数的增加逐渐减小，说明茶多糖可以有效提高板栗淀粉颗粒状态的稳定性，这可能是由于茶多糖在淀粉颗粒表面形成包裹或与淀粉分子缠绕，增加了其结构致密性。糊化温度随茶多糖质量分数的增加呈现升高趋势，这可能是由于茶多糖吸收了水分，导致淀粉需要更多的热量完成糊化过程，所以糊化温度上升。

表 1　茶多糖添加质量分数对糊化板栗淀粉冻融稳定性的影响

Table 1　Effect of tea polysaccharides mass fraction on the freeze-thaw stability of chestnut starch paste

茶多糖添加质量分数/%	析水率/%				
	循环 1 次	循环 2 次	循环 3 次	循环 4 次	循环 5 次
0	48.23 ± 0.54^{Ad}	48.74 ± 0.62^{Ad}	50.81 ± 0.44^{Ac}	52.57 ± 0.38^{Ab}	55.39 ± 0.45^{Aa}
1	48.03 ± 0.49^{Ac}	48.13 ± 0.32^{Ac}	50.08 ± 0.67^{Ab}	50.67 ± 0.61^{Bb}	53.78 ± 0.37^{Ba}
2	46.39 ± 0.31^{Bd}	46.46 ± 0.48^{Bd}	47.65 ± 0.25^{Bc}	49.33 ± 0.56^{Bb}	51.64 ± 0.33^{Ca}
4	43.26 ± 0.43^{Cc}	43.96 ± 0.55^{Cc}	46.35 ± 0.58^{Bb}	47.68 ± 0.41^{Ca}	48.13 ± 0.41^{Da}
8	41.03 ± 0.33^{Dc}	41.11 ± 0.59^{Dc}	41.07 ± 0.25^{Cc}	43.33 ± 0.26^{Db}	46.50 ± 0.35^{Ea}
16	37.73 ± 0.29^{Ec}	37.32 ± 0.42^{Ec}	37.02 ± 0.38^{Dc}	38.52 ± 0.48^{Eb}	40.94 ± 0.36^{Fa}

注：不同大写字母表示组间存在显著差异（$P<0.05$）；不同小写字母表示组内存在显著差异（$P<0.05$）。

表 2　茶多糖添加质量分数对板栗淀粉糊化特性的影响

Table 2　Effects of tea polysaccharides mass fraction on the pasting properties of chestnut starch

茶多糖添加质量分数/%	峰值黏度/（mPa·s）	谷值黏度/（mPa·s）	衰减值/（mPa·s）	最终黏度/（mPa·s）	回生值/（mPa·s）	糊化温度/℃
0	$2\,486.17\pm8.52^{a}$	$1\,694.26\pm11.14^{a}$	791.91 ± 7.86^{a}	$2\,946.83\pm12.84^{a}$	$1\,252.57\pm11.26^{a}$	69.82 ± 0.08^{c}
1	$2\,465.63\pm10.83^{a}$	$1\,689.84\pm12.26^{a}$	775.79 ± 9.24^{a}	$2\,928.58\pm10.74^{a}$	$1\,238.74\pm12.18^{a}$	69.88 ± 0.07^{c}
2	$2\,238.46\pm7.64^{b}$	$1\,523.64\pm10.38^{b}$	714.82 ± 10.17^{b}	$2\,754.62\pm13.52^{b}$	$1\,230.98\pm9.92^{a}$	70.06 ± 0.06^{b}
4	$2\,116.37\pm11.18^{c}$	$1\,475.26\pm13.42^{b}$	641.11 ± 9.28^{c}	$2\,615.34\pm9.28^{c}$	$1\,140.08\pm9.58^{b}$	70.10 ± 0.06^{b}
8	$2\,012.14\pm9.16^{d}$	$1\,389.83\pm9.84^{c}$	622.31 ± 10.36^{c}	$2\,446.82\pm14.16^{d}$	$1\,056.99\pm10.42^{c}$	70.28 ± 0.09^{a}
16	$1\,894.26\pm11.02^{e}$	$1\,316.57\pm10.73^{d}$	577.69 ± 8.74^{d}	$2\,253.27\pm9.35^{e}$	936.70 ± 8.64^{d}	70.36 ± 0.11^{a}

注：不同小写字母表示各组之间存在显著差异（$P<0.05$）。

2.6　红外吸收光谱

碳水化合物之间的相互作用力可通过红外光谱图的峰强度、峰形、谱带频率等参数来分析。如图 4 所示，3 380 cm^{-1} 附近的吸收峰是由 O—H 伸缩振动引起的，而 2 930 cm^{-1} 附近的吸收峰则是由 C—H 伸缩振动引起的，这 2 个吸收峰是淀粉的典型特征峰[27]。1 460、1 050 cm^{-1} 附近的吸收峰分别是由 C—O—H 基团的变形振动和 C—O—C 不对称伸缩振动引起的[12]。883 cm^{-1} 附近的特征峰表明板栗淀粉糖苷键类型属于 α 构型。与板栗淀粉相比，不同比例的板栗淀粉-茶多糖复配体系均无新的吸收峰出现，说明茶多糖与板栗淀粉间未出现共价结合，茶多糖对板栗淀粉的结构和官能团没有明显影响。当茶多糖添加质量分数为 2% 时，红外吸收峰出现了红移现象，这可能是适量茶多糖的加入改变了板栗淀粉分子的空间位阻且影响了分子间的相互作用力。在茶多糖添加质量分数为 4% 时，红外吸收峰在 3 380cm^{-1} 附近吸收强度增加，这可能是茶多糖分子的嵌入使分子间的范德华力和氢键作用增强[28]。

2.7　茶多糖添加质量分数对板栗淀粉消化特性的影响

淀粉的消化特性是衡量淀粉食用品质的一个重要参数，茶多糖对板栗淀粉消化特性的影响见表 3。天然板栗淀粉的快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉质量分数分别为 77.43%、4.26%、18.31%。随着茶多糖添加质量分数的增加，板栗淀粉中快消化淀粉质量分数逐渐减少，而慢消化淀粉和抗性淀粉的质量分数逐渐增加，表明茶多糖在一定程度上可以有效抑制板栗淀粉的消化。原因可能是茶多糖分散包裹在板栗淀粉分子的表面，减小

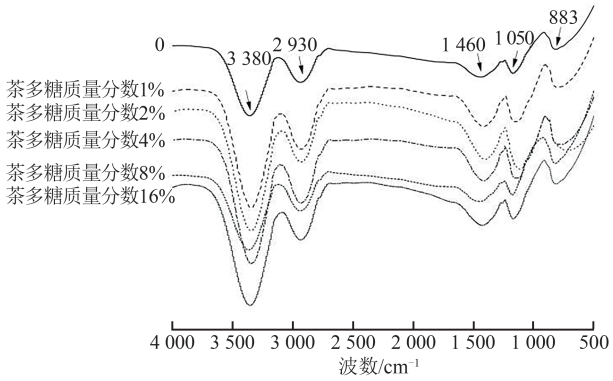


图4　茶多糖-板栗淀粉混合体系红外光谱

Fig. 4　Infrared spectra of tea polysaccharide-chestnut starch complex systems

表3　茶多糖添加质量分数对板栗快消化淀粉、慢消化淀粉以及抗性淀粉的影响

Table 3　Effects of tea polysaccharides mass fraction on fast digested, slowly digested, and resistant starch in chestnut

茶多糖添加质量分数/%	快消化淀粉质量分数/%	慢消化淀粉质量分数/%	抗性淀粉质量分数/%
0	77.43±0.65^{a}	4.26±0.22^{e}	18.31±0.53^{f}
1	76.11±0.57^{ab}	4.59±0.12^{e}	19.30±0.48^{e}
2	73.61±0.68^{b}	5.78±0.43^{d}	20.31±0.17^{d}
4	71.68±0.38^{c}	6.84±0.34^{c}	21.48±0.25^{c}
8	69.82±0.43^{d}	7.99±0.19^{b}	22.19±0.27^{b}
16	61.62±0.27^{e}	10.62±0.33^{a}	27.76±0.07^{a}

注：不同小写字母表示各组之间存在显著差异（P<0.05）。

了酶与淀粉分子的接触面积，有效阻止了酶与淀粉分子表面活性位点的结合，从而减缓了淀粉的消化过程[29]。随着茶多糖添加质量分数的增加，这种抑制效果更为明显。这些结果说明茶多糖可以作为调节板栗淀粉消化特性的手段，应用于抗性淀粉的加工生产。

2.8　茶多糖添加质量分数对糊化板栗淀粉质构特性的影响

茶多糖对糊化板栗淀粉质构特性的影响见表4。淀粉颗粒分散相和连续相之间相互作用是影响其质构特性的主要因素[16]。茶多糖添加质量分数为1%时，板栗淀粉的硬度和弹性与对照组相比无显著性变化（P≥0.05）。随着茶多糖添加质量分数的增加，板栗淀粉的硬度和弹性呈现逐渐降低的趋势。淀粉硬度下降可能是因为茶多糖分子包裹在板栗淀粉颗粒表面，限制了直链淀粉的重排，导致凝胶网络结构松散，淀粉硬度下降；而板栗淀粉弹性下降可能是因为茶多糖吸水后具有较好的流动性，对板栗淀粉颗粒之间的相互作用起到一定的缓冲作用，致使其在质构探头挤压下弹性降低。在茶多糖添加质量分数为1%、2%、4%、8%时，板栗淀粉的黏附性和内聚性并无显著差异，在茶多糖添加质量分数为16%时，板栗淀粉的黏附性和内聚性显著增大，说明添加大量茶多糖才会影响板栗淀粉的黏附性和内聚性，这可能与茶多糖质量分数对板栗淀粉分子结构及理化特性影响的程度有关。

表4　茶多糖添加质量分数对糊化板栗淀粉质构特性的影响

Table 4　Effects of tea polysaccharides mass fraction on the textural properties of chestnut starch paste

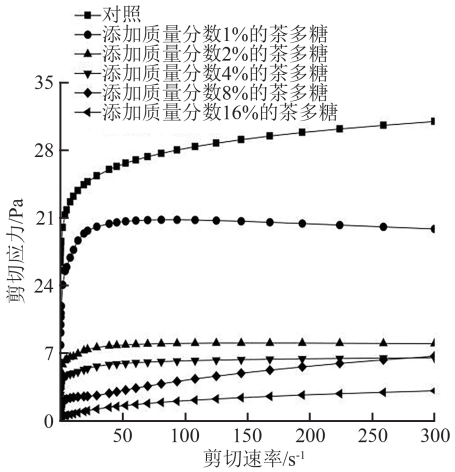
茶多糖添加质量分数/%	硬度/N	弹性/mm	黏附性	内聚性/%
0	0.91±0.19^{a}	7.13±0.19^{a}	0.20±0.02^{b}	0.60±0.13^{b}
1	0.86±0.14^{a}	6.71±0.38^{a}	0.19±0.02^{b}	0.55±0.10^{b}
2	0.56±0.11^{b}	6.14±0.13^{b}	0.18±0.03^{b}	0.55±0.05^{b}
4	0.42±0.00^{c}	6.07±0.08^{b}	0.17±0.03^{b}	0.50±0.04^{b}
8	0.30±0.04^{d}	5.15±0.35^{c}	0.18±0.00^{b}	0.56±0.01^{b}
16	0.15±0.00^{e}	3.55±0.20^{d}	0.33±0.02^{a}	0.84±0.06^{a}

注：不同小写字母表示各组之间存在显著差异（P<0.05）。

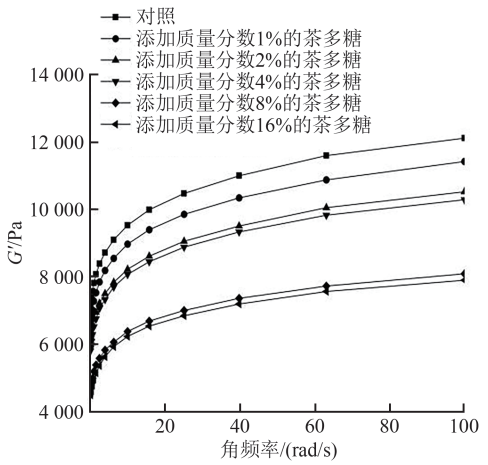
2.9　茶多糖添加质量分数对糊化板栗淀粉流变学特性的影响

由图5（a）可知，茶多糖-板栗淀粉混合体系是典型的非牛顿流体，几乎所有样品的剪切应力随着剪切速率的增加而增大。添加茶多糖降低了淀粉糊的黏度，导致其剪切应力减小。这可能是因为茶多糖与淀粉（直链淀粉）分子之间相互作用从而抑制氢键的形成。此外，茶多糖会包裹在淀粉颗粒周围，减少了淀粉对水分子的利用，从而抑制淀粉颗粒的膨胀[30]。随着茶多糖添加质量分数的增加。大量的茶多糖分散在淀粉分子网状结构中，降低了糊化淀粉的结构强度，导致表观黏度降低，剪切应力减小[31]。动态流变特性是指材料在交变应力下的机械反应，对食品加工与质量控制有重要影响。储能模量（G'）是弹性模量，数值越大，表明在外力压缩后的恢复力越强；损耗模量（G''）是黏性模量，数值越大其抵抗流动的能力越强[32]。从图5（b）~（c）可知，随着角频率的增加，复配体系的G'和G''逐渐增加，且在同一频率下，G'明显大于G''，因此茶多糖-板栗淀粉混合体系均

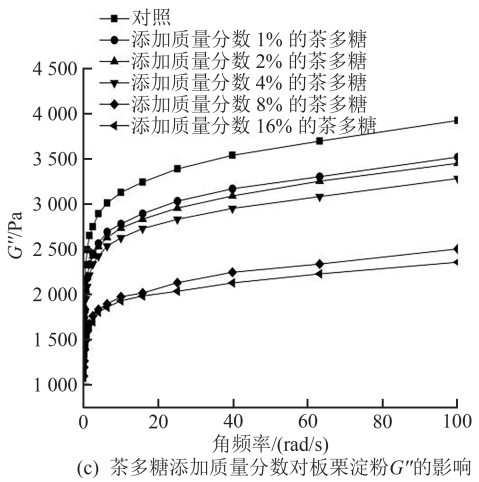
以弹性性质为主，这是聚合物典型的凝胶网络动态黏弹性流变图谱[33]。G'和G''均随着茶多糖添加质量分数的增加逐渐降低，这可能是因为大量茶多糖的添加使淀粉分子间相互作用降低，糊化淀粉网状结构松散，弹性与黏性均降低。从图5（d）可以看出，添加茶多糖后tan δ有所增加，表明糊化板栗淀粉的黏性增加，但tan δ均小于1，表明糊化板栗淀粉还是以弹性为主。



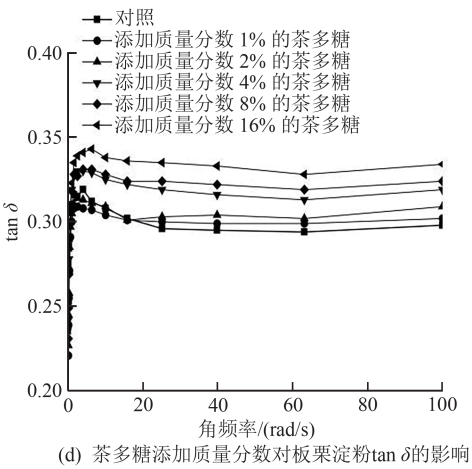
(a) 茶多糖添加质量分数对板栗淀粉溶解度的影响



(b) 茶多糖添加质量分数对板栗淀粉G'的影响



(c) 茶多糖添加质量分数对板栗淀粉G''的影响



(d) 茶多糖添加质量分数对板栗淀粉tan δ的影响

图5 茶多糖对板栗淀粉糊流变学特性的影响

Fig. 5 Effects of tea polysaccharides on the rheological properties of chestnut starch paste

3 结论

作者探究了添加不同质量分数的茶多糖对板栗淀粉特性的影响。茶多糖添加质量分数为1%时，板栗淀粉的持水性、持油性、溶解度显著提高且保持最大；板栗淀粉的透明度和膨胀度随茶多糖质量分数的增大呈先增后减的趋势，在茶多糖添加质量分数为8%时最大；茶多糖的添加可显著降低板栗淀粉的析水率，提高其冻融稳定性；板栗淀粉的黏度、硬度、弹性随茶多糖添加质量分数的增加逐渐降低；板栗淀粉的慢消化淀粉、抗性淀粉质量分数随茶多糖质量分数的增加逐渐增大，说明适度添加茶多糖在一定程度上可显著改善板栗淀粉的特性。改性后的板栗淀粉可作为降低黏度的食品添加剂，还可应用于高持水性食品、低GI功能食品的开发以及包裹药物分子的壁材等。目前茶多糖对板栗淀粉理化特性的影响机制尚不完全明确，后续研究可以借助低场核磁共振、X射线衍射、拉曼光谱等手段进一步了解茶多糖对板栗淀粉结构的影响及两者的相互作用机理，阐明茶多糖影响板栗淀粉特性的作用机制，为板栗淀粉资源的开发及深加工提供理论依据。

参考文献

[1] LI R，SHARMA A K，ZHU J C，et al. Nutritional biology of chestnuts：a perspective review[J]. Food Chemistry，2022，395：133575.

[2] 高春慧，苏玉，刘时瑜，等. 板栗加工过程中褐变控制工艺优化及指标分析[J]. 食品与机械，2025，41(1)：225-233.
GAO C H，SU Y，LIU S Y，et al. Optimization of browning control process in chestnut processing and analysis of its indicators[J]. Food & Machinery，2025，41(1)：225-233.(in Chinese)

[3] LIU W M，ZHANG Y T，WANG R R，et al. Chestnut starch modification with dry heat treatment and addition of xanthan gum：gelatinization，structural and functional properties[J]. Food Hydrocolloids，2022，124：107205.

[4] LAN G W，XIE S M，DUAN Q F，et al. Effect of soybean polysaccharide and soybean oil on gelatinization and retrogradation properties of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，264：130772.

[5] 陈林林，郝熙，李昕彤，等. 非淀粉多糖对淀粉特性影响的研究进展[J]. 食品工业科技，2024，45(10)：386-394.
CHEN L L，HAO X，LI X T，et al. Research progress on the effect of non-starch polysaccharides on starch properties[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(10)：386-394.(in Chinese)

[6] ZHANG M Y，GOLDING J B，PRISTIJONO P，et al. Effects of Huangjing polysaccharides on the properties of sweet potato starch[J]. LWT-Food Science and Technology，2024，204：116474.

[7] KONG J，MO S R，HU J R，et al. Effects of *Ficus pumila* Linn. polysaccharide on physicochemical and digestive properties of corn starch[J]. Food Bioscience，2024，58：103811.

[8] ZHANG Y，WANG Y M，YANG B J，et al. Effects of zucchini polysaccharide on pasting，rheology，structural properties and *in vitro* digestibility of potato starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2023，253：127077.

[9] HUANG R，YU H F. Extraction methods，chemical compositions，molecular structure，health functions，and potential applications of tea polysaccharides as a promising biomaterial：a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，277：134150.

[10] 童鑫怡，韦铮，陈梅，等. 茶多糖-茶多酚对*D*-半乳糖诱导的小鼠脑组织氧化损伤的改善作用[J]. 食品工业科技，2022，43(16)：377-383.
TONG X Y，WEI Z，CHEN M，et al. Effect of tea polysaccharide-tea polyphenol on improving *D*-galactose-induced oxidative damage of brain in mice[J]. Science and Technology of Food Industry，2022，43(16)：377-383.(in Chinese)

[11] 施建斌，隋勇，蔡沙，等. 不同干燥工艺制备板栗全粉的理化特性和风味比较[J]. 现代食品科技，2022，38(5)：81-86，198.
SHI J B，SUI Y，CAI S，et al. Comparison of the physicochemical properties and flavors of whole chestnut powder produced by different drying processes[J]. Modern Food Science and Technology，2022，38(5)：81-86，198.(in Chinese)

[12] 刘惠娟，赵春燕，龚加顺. 蕉芋淀粉和玉米淀粉理化特性对比分析[J]. 食品科技，2022，47(3)：271-277.
LIU H J，ZHAO C Y，GONG J S. Comparative analysis of starch physicochemical properties between *Canna* edulis Ker starch and corn starch[J]. Food Science and Technology，2022，47(3)：271-277.(in Chinese)

[13] 靳宇丹，王涛，冯伟，等. 提取方法对大米淀粉结构与理化性质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(6)：31-39.
JIN Y D，WANG T，FENG W，et al. Effects of extraction methods on structural and physicochemical properties of rice starches[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(6)：31-39.(in Chinese)

[14] 孔祥如. 蛹虫草多糖对小麦淀粉理化性质及消化特性的影响[D]. 天津：天津科技大学，2020.

[15] 康志敏，耿宁宁，何梦影，等. 砂仁多糖对小麦淀粉理化性质及消化特性的影响[J]. 食品与机械，2024，40(6)：19-24，110.
KANG Z M，GENG N N，HE M Y，et al. Effects of *Amomum villosum* polysaccharide on physicochemical and *in vitro* digestibility properties of wheat starch[J]. Food & Machinery，2024，40(6)：19-24，110.(in Chinese)

[16] 于中玉，林楠，黄佳琪，等. 木糖对糯米淀粉糊化性质的影响[J]. 粮食与油脂，2022，35(8)：26-29，51.
YU Z Y，LIN N，HUANG J Q，et al. The effect of xylose on the gelatinization properties of waxy rice starch[J]. Cereals & Oils，2022，35(8)：26-29，51.(in Chinese)

[17] 曾琼，成健，李丛冠，等. 苹果果胶改善马铃薯淀粉的糊化和流变特性[J]. 现代食品科技，2023，39(7)：75-81.
ZENG Q，CHENG J，LI C G，et al. Improving the pasting and rheological properties of potato starch using apple pectin[J]. Modern Food Science and Technology，2023，39(7)：75-81.(in Chinese)

[18] MAJEED T，WANI I A，HUSSAIN P R. Effect of dual modification of sonication and γ-irradiation on physicochemical and functional properties of lentil (*Lens culinaris* L.) starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2017，101：358-365.

[19] ALIPOUR H J，REZAEI M，SHABANPOUR B，et al.

Effects of sulfated polysaccharides from green alga *Ulva intestinalis* on physicochemical properties and microstructure of silver carp surimi [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 74: 87-96.

[20] BASHIR K, AGGARWAL M. Physicochemical, thermal and functional properties of gamma irradiated chickpea starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 97: 426-433.

[21] 焦昆鹏, 马丽苹, 张晓宇, 等. 水溶性大豆多糖对马铃薯淀粉理化性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 54-59.
JIAO K P, MA L P, ZHANG X Y, et al. Effect of soluble soybean polysaccharides on the physical and chemical properties of potato starch[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 54-59. (in Chinese)

[22] 武娜, 杨杨, 边鑫, 等. 可溶性大豆多糖对大米淀粉物化特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6140-6146.
WU N, YANG Y, BIAN X, et al. Effects of soluble soybean polysaccharides on the physical and chemical properties of rice starch[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(19): 6140-6146. (in Chinese)

[23] 张正茂, 阚玲, 王丽. 不同糯性谷物淀粉性质的比较研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(1): 51-57, 43.
ZHANG Z M, KAN L, WANG L. Comparative studies on the properties of starches from different waxy/glutinous cereals [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(1): 51-57, 43. (in Chinese)

[24] 胡方洋, 邓健, 张得祥, 等. 凯特芒果淀粉的提取及其性质研究[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(10): 163-172.
HU F Y, DENG J, ZHANG D X, et al. Study on the extraction and properties of keitt mango starch [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(10): 163-172. (in Chinese)

[25] 段春月. 板栗淀粉理化特性及老化机理研究[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2021.

[26] LIU C M, ZHANG H B, CHEN R Y, et al. Effects of creeping fig seed polysaccharide on pasting, rheological, textural properties and *in vitro* digestibility of potato starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106810.

[27] 陈龙. 普鲁兰多糖对大米淀粉性质的影响及机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.

[28] 赵辉, 张艳荣, 杨岩, 等. 滑子菇多糖对玉米淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 100-110.
ZHAO H, ZHANG Y R, YANG Y, et al. Effects of *Pholiota nameko* polysaccharide on physicochemical properties of corn starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 100-110. (in Chinese)

[29] OH J H, CHUNG J O, LEE C Y, et al. Characterized polysaccharides from green tea inhibited starch hydrolysis and glucose intestinal uptake by inducing microstructural changes of wheat starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(47): 14075-14085.

[30] GAO J Y, ZHU L, HUANG J, et al. Effect of dandelion root polysaccharide on the pasting, gelatinization, rheology, structural properties and *in vitro* digestibility of corn starch [J]. Food & Function, 2021, 12(15): 7029-7039.

[31] SUN X X, SUN Z Z, SALEH A S M, et al. Effects of various microwave intensities collaborated with different cold plasma duration time on structural, physicochemical, and digestive properties of lotus root starch[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134837.

[32] WITCZAK T, WITCZAK M, ZIOBRO R. Effect of inulin and pectin on rheological and thermal properties of potato starch paste and gel [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 124: 72-79.

[33] ZHOU D N, ZHANG B, CHEN B, et al. Effects of oligosaccharides on pasting, thermal and rheological properties of sweet potato starch[J]. Food Chemistry, 2017, 230: 516-523.

（责任编辑：李春丽）