挤出过程中板栗全粉-瓜尔胶-阿魏酸复合体系的加工特性变化

李蕊，郑波，饶晨露，陈玲*

（华南理工大学食品科学与工程学院，广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室，华南理工大学淀粉与植物蛋白深加工教育部工程研究中心，广东广州 510640）

摘要：板栗产品的营养与品质可由板栗全粉的加工及消化特性决定，该研究提出利用挤出处理协同常见食品添加剂瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉进行改性，对其冻融稳定性、吸水性、吸油性、流变学特性以及体外消化特性进行了系统探究。结果显示，挤出协同瓜尔胶提高了板栗全粉的冻融稳定性、吸水性及水溶性，降低了吸油性、起糊温度，增大了崩解值并可调控其糊稳定性。在流变性质方面，挤出协同瓜尔胶作用有助于提高板栗全粉储藏过程中的凝胶刚性，但随着其添加量的增加凝胶刚性减弱。而进一步向体系中引入阿魏酸会增大峰值黏度、起糊温度、崩解值，但对板栗全粉的冻融稳定性、吸水性、水溶性、吸油性影响较小。同时挤出协同 3 wt.%瓜尔胶及 3 wt.%阿魏酸可使板栗全粉的抗消化组分增加 27.00%~32.10%。研究结果表明挤出协同瓜尔胶及阿魏酸处理可有效改变板栗全粉的加工特性，可为新型板栗食品的创制提供基础数据。

关键词：板栗全粉；挤出处理；瓜尔胶；阿魏酸；加工特性

文章编号：1673-9078(2023)09-168-174 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.9.1152

Changes in the Processing Properties of A Whole Chestnut Flour-Guar Gum-Ferulic Acid Complex System during Extrusion

LI Rui, ZHENG Bo, RAO Chenlu, CHEN Ling*

(School of Food Science and Engineering, Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Engineering Research Center of Starch and Vegetable Protein Processing Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The nutritional value and quality of chestnut products can be determined by the processing and digestion properties of the whole chestnut flour. In this study, the properties of the whole chestnut flour was modified *via* extrusion combined with the addition of the common food additive, guar gum, and ferulic acid. The freeze-thaw stability, water absorption, oil absorption, rheological properties and *in vitro* digestibility were systematically investigated. The results showed that extrusion combined with the use of guar gum enhanced the freeze-thaw stability, water absorption and water solubility of the whole chestnut powder, decreased its oil absorption, gelatinization temperature, increased breakdown value, while redulating its paste stability. As for the rheological properties, extrusion along with guar gum helped improve the rigidity of gel during the storage of whole chestnut flour, but with the increase of addition amount, the gel rigidity decreased. Further introduction of ferulic acid into the system increased the peak viscosity, pasting temperature and breakdown value, though having relatively small impacts on freeze-thaw stability, water absorption, water solubility and oil absorption. Meanwhile, extrusion along with addition of 3 wt.% guar gum and 3 wt.% ferulic acid increased the anti-digestibility components of the whole chestnut flour by 27.00%~32.10%. The results of this study showed

引文格式：

李蕊,郑波,饶晨露,等.挤出过程中板栗全粉-瓜尔胶-阿魏酸复合体系的加工特性变化[J].现代食品科技,2023,39(9):168-174

LI Rui, ZHENG Bo, RAO Chenlu, et al. Changes in the processing properties of a whole chestnut flour-guar gum-ferulic acid complex system during extrusion [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 168-174

收稿日期：2022-09-12

基金项目：国家重点研发计划项目（2019YFD1002300）

作者简介：李蕊（1997-），女，硕士研究生，研究方向：淀粉功能化修饰与营养调控，E-mail：1329955489@qq.com

通讯作者：陈玲（1961-），女，博士，教授，研究方向：淀粉功能化修饰与营养调控，E-mail：felchen@scut.edu.cn

that extrusion combined with the addition of guar gum and ferulic acid can effectively influence the processing properties of whole chestnut flour, and provide basic data for the creation of novel chestnut foods.

Key words: wholechestnut powder; extrusion; guar gum; ferulic acid; processing properties

板栗是一类种植、食用历史悠久的坚果，因特殊的口感质地和营养特性而广受喜爱。在营养功能上，板栗中主要的营养成分为淀粉，占据50%的干物质[1]。由于板栗中蛋白含量较少，因此可利用板栗粉开发无麸质食品，以满足患有乳糜泻疾病的群体对食品的需求。此外，板栗中还富含的多酚类物质，具有良好的抗氧化、抗肿瘤、抗菌活性[2]，并有助于抵抗胃炎发生[3]。目前板栗食品主要有板栗面包、板栗薯片、板栗蛋糕、板栗面条等，其因独特的营养和风味深受消费者欢迎。

在板栗食品的实际生产和应用中，不同板栗制品对板栗全粉的加工特性有不同的要求[4]。如对于板栗酱、板栗奶茶等产品而言，板栗全粉的黏度是影响其品质的关键因素，合适的黏度能确保其具有合适的流动性，避免沉淀和分层现象等问题[5]。而对于烘焙产品，板栗全粉的糊化温度是影响产品品质的关键因素，同时在后期保存中板栗全粉的冻融稳定性、吸水和吸油性对品质的影响也不可忽视。因此，研究板栗全粉的加工特性对科学设计高品质健康板栗食品十分关键。

瓜尔胶和阿魏酸是烘焙类食品中常见的食品添加剂，研究显示添加瓜尔胶和阿魏酸可显著调控淀粉的回生及消化性能，赋予淀粉基食品更好的加工品质及营养功能，如延缓淀粉回生[6,7]、提高淀粉抗消化性能等[8]，但目前利用瓜尔胶或阿魏酸调控板栗全粉加工特性及消化性能暂未见报道。因此，本论文结合现代分析技术系统探究挤出处理协同瓜尔胶以及进一步添加阿魏酸对板栗全粉冻融稳定性、吸水性、水溶性、吸油性、糊性质、流变特性等加工特性以及体外消化特性的影响规律，为实现高品质健康板栗制品的创制提供理论依据和基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

板栗全粉，陕西冠晨生物科技有限公司；瓜尔胶，陕西森弗生物技术有限公司；阿魏酸，陕西森弗生物技术有限公司；大豆油，益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司；猪胰 α-淀粉酶，美国 Sigma 公司；淀粉葡萄糖苷酶，美国 Sigma 公司；GOPOD 试剂盒，爱尔兰 Megazyme 公司；无水乙醇、三水合乙酸钠、冰醋酸、氢氧化钠、无水氯化钙均为分析纯。

1.2 仪器与设备

微型双螺杆挤出机，德国 Haake 公司；高速粉碎机，天津市泰斯特仪器有限公司；快速水分测定仪，德国 Sartorius 公司；冰箱，无锡松下冷机有限公司；Brabender 黏度仪，德国 Brabender 公司；高速离心机，湖南湘仪实验仪器有限公司；数显恒温水浴振荡器，金坛峥嵘仪器有限公司；真空冷冻干燥机，上海爱朗仪器有限公司；紫外可见分光光度计，美国 UNICO 公司；旋转流变仪，奥地利 Anton Paar 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

将 100 g（干基）板栗全粉与瓜尔胶、阿魏酸（添加量为板栗粉干基的 1 wt.%或 3 wt.%）混合均匀，而后调节体系水分含量至 40%，于 4 ℃平衡水分 48 h，充分混匀。采用微型双螺杆挤出机处理样品，挤出温度为 80 ℃，螺杆转速为 150 r/min。挤出后的样品置于-80 ℃冷冻 24 h 后进行冷冻干燥、磨碎、过 80 目筛以备用。所得复合物分别为挤出板栗全粉-1 wt.%瓜尔胶复合物（1% GG-CP）、挤出板栗全粉-3 wt.%瓜尔胶复合物（3% GG-CP）、挤出板栗全粉-1 wt.%阿魏酸-1 wt.%瓜尔胶复合物（1% FA-1% GG-CP）和挤出板栗全粉-3 wt.%阿魏酸-3 wt.%瓜尔胶复合物（3% FA-3% GG-CP），以及未添加瓜尔胶及阿魏酸的挤出板栗全粉（E-CP）和板栗全粉（CP）。

1.3.2 冻融稳定性的测定

参考陈子意[9]的方法并稍作修改。准确称量 3.00 g（干基）样品于 100 mL 离心管中（离心管的质量记为 W_1），加入 30 mL 去离子水，分散均匀，于 100 ℃恒温水浴振荡 30 min，冷却至室温后于-20 ℃下储藏 20 h。室温下自然解冻 4 h，擦干外壁，记录离心管和样品的总质量为 W_2。将其于 3 000 r/min 条件下离心 20 min，弃去上清液后称量离心管和样品的总质量（$W3$），利用公式（1）计算析水率（SR）。

$$A=\frac{W_2-W_3}{W_2-W_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中:

A——析水率 SR，%;

W_1——离心管质量，g;

W_2——解冻后样品和离心管总质量，g;

W_3——倾倒上清液后样品和离心管总质量，g。

1.3.3 吸水性及水溶性的测定

参考 Horstmann 等[10]、Alam 等[11]的实验方法。称取 1.00 g（干基）样品（W_1）于 50 mL 离心管中，记录离心管和样品总质量为 W_2，加入 25.00 g 去离子水，振荡混匀，旋盖后于 100 ℃恒温水浴振荡 30 min，而后 4 000 r/min 离心 25 min，分离上清液和沉淀物。离心管在吸水纸上倒置 5 min，质量记为 W_3。上清液倒入已称重的铝盒（M_1）中，于 105 ℃的真空干燥箱中烘干至恒重，称量铝盒和样品的总质量（M_2）。吸水性指数（WAI）和水溶性指数（WSI）分别利用公式（2）和（3）进行计算。

$$B=\frac{W_3-W_2}{W_1} \quad (2)$$

$$C=\frac{M_2-M_1}{W_1}\times 100\% \quad (3)$$

式中:

B——吸水性指数 WAI;

C——水溶性指数 WSI，%;

W_1——1.00 g（干基）样品的质量，g;

W_2——加水前样品和离心管的总质量，g;

W_3——离心后沉淀物和离心管的总质量，g;

M_1——铝盒的质量，g;

M_2——烘干至恒重的铝盒和样品的总质量，g。

1.3.4 吸油性的测定

参考朱新鹏等[12]的实验方法并稍作修改，称取 1.00 g（干基）样品（W_1）于 50 mL 离心管中，离心管和样品的总质量记为 W_2，加入 10.00 g 大豆油，分散均匀，于 100 ℃下振荡加热 30 min，冷却后 4 000 r/min 离心 20 min，倾倒大豆油，倒置 5 min 后再次称质量记为 W_3，吸油性指数（OAI）利用公式（4）计算可得。

$$D=\frac{W_3-W_2}{W_1}\times 100\% \quad (4)$$

式中:

D——吸油性指数（OAI）;

W_1——样品干基质量，g;

W_2——吸附油脂前样品和离心管总质量，g;

W_3——吸附油脂后样品和离心管总质量，g。

1.3.5 糊化性质测定

采用 Brabender 黏度仪测定样品的糊化特性，操作参照饶晨露等[13]的方法：称量 10 g（干基）样品，用去离子水配置成质量分数为 10%的悬浮液。测试参数如下：测量转子速度为 250 r/min，以 7.5 ℃/min 的速度从 30 ℃升温至 95 ℃后保温 30 min，以 7.5 ℃/min 的速度降温至 50 ℃，继续保温 30 min 直至测试结束。

1.3.6 流变性质的测定

将质量分数为 10%（m/m）的样品于 100 ℃下密闭搅拌糊化 30 min，然后转移至密封袋中，于 4 ℃下储藏 1 d 和 7 d 以做流变性质测定。测试方法如下：取适量样品置于流变仪测试平板上，采用流变仪的平板-平板测量系统，平板直径 25 mm，设置间隙 1 mm，在应变值 1%的条件下进行动态流变测试，测定角频率 0.1~100 rad/s 范围内回生样品储能模量（G'）、损耗模量（G''）及损耗角正切值 $\tan\delta$ 随剪切频率变化的曲线。

1.3.7 体外消化特性的测定

基于 Englyst 等[14]的方法稍作调整来测定样品消化特性。取猪胰酶（6 g）与 40 mL 去离子水混合，4 000 r/min 离心 15 min，取上清液，添加 1.4 mL 淀粉葡萄糖苷酶和 3.6 mL 去离子水，4 ℃冷藏待用。准确称取 1 g（干基）样品于 150 mL 锥形瓶中，以不添加样品为对照组，每瓶放置 7 颗玻璃珠并添加 20 mL 醋酸钠缓冲液，涡旋混匀。每瓶中加入 5 mL 混合酶液，于 37 ℃、160 stoke/min 条件下振动水解，分别于 20 和 120 min 时取上清液至 φ=70%乙醇溶液中，于 4 000 r/min 条件下离心 5 min 后，取上清液于 GOPOD 溶液中，在 45 ℃下水浴 20 min 后于 510 nm 处测试吸光值。标品与空白组分别为葡萄糖标准溶液和蒸馏水。

1.3.8 数据分析处理

采用 SPSS 23.0 和 Orign 8.1 进行数据处理和绘图，实验数据均以平均值±标准差表示。每次实验重复三次，数据均表示为平均值±标准偏差。通过组间单因素方差分析，$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉糊冻融稳定性的影响

冻融的 SR 通常被视为评估样品在冻融过程中保持理想性质能力的指标[15]。如图 1a 所示，E-CP 的 SR 较 CP 降低了约 12%，说明挤出处理使板栗全粉的冻融稳定性显著增强（$P<0.05$）。挤出协同瓜尔胶能使样品的 SR 显著减少，且与瓜尔胶添加量相关，3% GG-CP 的 SR 较 CP 降低 22%。瓜尔胶对大米淀粉冻融稳定性亦有改善作用，这可能与瓜尔胶本身具有优异的增稠作用有关[16]。向挤出板栗全粉-瓜尔胶二元体系中引入阿魏酸后，样品的 SR 有所增加，但添加量对 SR 的影响不显著，这可能源于阿魏酸与瓜尔胶之间可能存在相互作用或阿魏酸与板栗粉相作用，导致体系内瓜尔胶与淀粉之间的作用概率降低，从而造成

瓜尔胶的效果被削弱。由此可见，挤出协同 3%瓜尔胶对板栗全粉冻融稳定性的调控效果最佳。

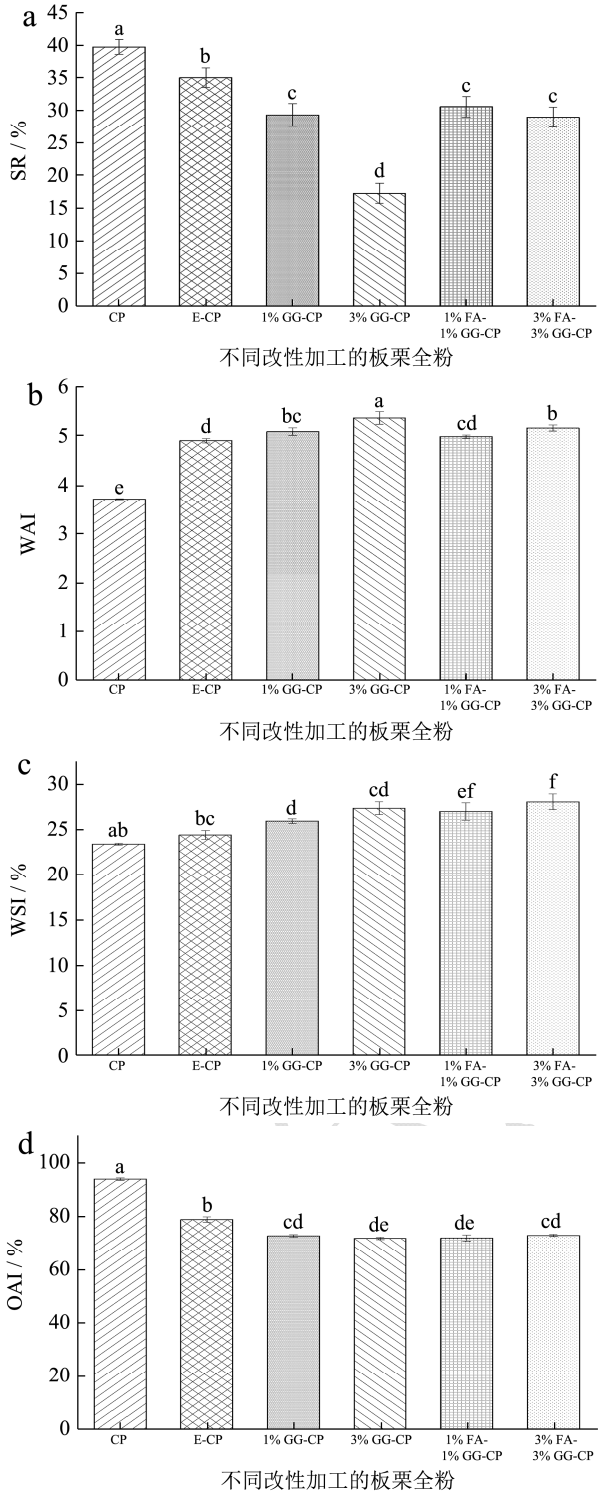


图 1 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉糊冻融稳定性(a)、吸水性(b)、水溶性(c)及吸油性(d)的影响

Fig.1 Effects of extrusion coupled with guar gum and ferulic acid on freeze-thaw stability (a), water absorption (b), water solubility (c) and oil absorption (d) of chestnut flour paste

注：图中相同字母表示无显著性差异（$P>0.05$）；不同字母表示具有显著性差异（$P<0.05$）。

2.2 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉吸水性及水溶性的影响

挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉吸水性的影响如图 1b 所示。E-CP 的吸水性指数（4.90）明显大于 CP（3.71）（$P<0.05$），说明挤出处理显著增加了板栗全粉热处理过程中的吸水能力，这可能是由于挤出破坏了板栗全粉中淀粉原有的氢键结构，并促使淀粉暴露更多的亲水基团与水分子结合所造成的[17]。挤出协同瓜尔胶可显著增大板栗全粉的 WAI（$P<0.05$），当瓜尔胶添加量达到 3 wt.%时 WAI 提升至 5.36，这主要是由于瓜尔胶中的羟基可通过形成氢键促进了更多的水相互作用，从而导致更高的水亲和力[18]。挤出板栗全粉-瓜尔胶二元体系引入阿魏酸后，其 WAI 与二元体系相比有所降低，这可能归因于阿魏酸与瓜尔胶之间的相互作用对亲水胶体与水分子的氢键缔合行为产生影响。从图 1c 可知，E-CP 的 WSI 较 CP 略微增大，但总体上变化不显著，而 GG-CP 的 WSI 则高于 E-CP。与 GG-CP 相比，1% FA-1% GG-CP 的 WSI 相比于 3% GG-CP 提高 1.06%，3% FA-3% GG-CP 的 WSI（28.09%）略高于 3% GG-CP（27.39%），这表明阿魏酸添加量对挤出板栗全粉-瓜尔胶二元体系的水溶性影响不显著。

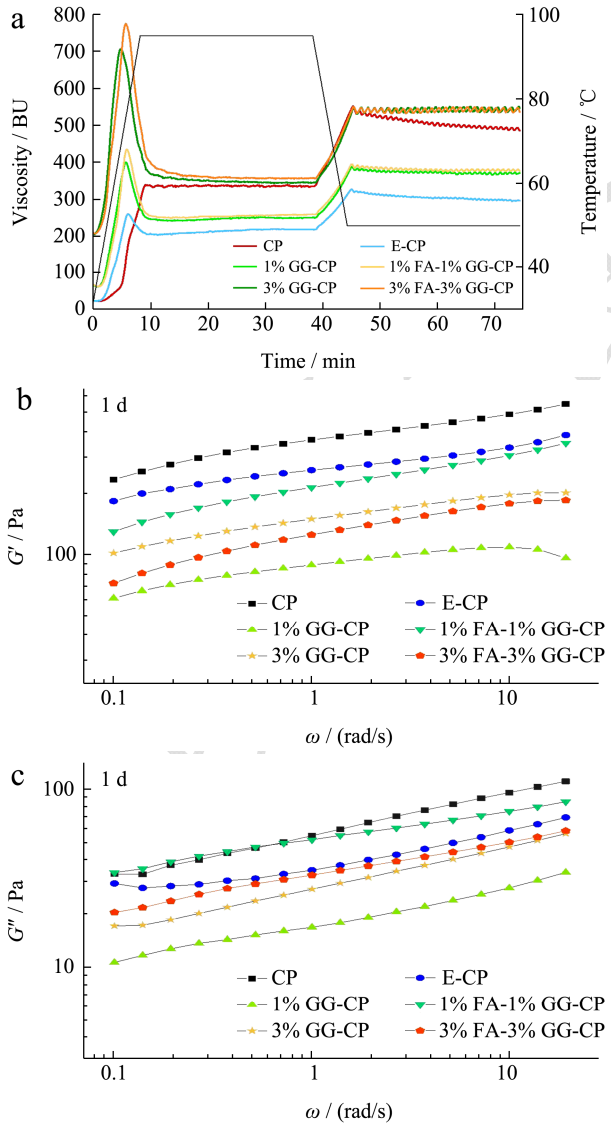
2.3 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉吸油性的影响

如图 1d 所示，E-CP 的 OAI 较 CP 显著下降（$P<0.05$），说明挤出处理可显著降低板栗全粉的吸油性。协同瓜尔胶可使 E-CP 的 OAI 显著下降，但瓜尔胶添加量对样品吸油性指数的影响不显著，这可能是由于瓜尔胶在体系中形成物理屏障阻碍了蛋白质与油脂的结合，故而减少了板栗全粉对油脂的吸附量[19]。此外，挤出处理过程中，进一步协同阿魏酸对 GG-CP 的 OAI 影响不显著。

2.4 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉糊性质的影响

糊化特性是富含淀粉的原料在食品应用中的重要衡量指标[18]。由图 2a 与表 1 可知，挤出处理降低了 CP 的起糊温度、峰值黏度，而协同瓜尔胶有助于降低 E-CP 起糊温度，增大峰值黏度。亲水胶体对起糊温度的影响因其与体系中溶解的淀粉分子发生交

联所引起的[20]。此外，进一步协同阿魏酸有助于提高 GG-CP 的起糊温度和峰值黏度，其中阿魏酸对起糊温度的影响可能源于其与淀粉分子竞争糊化可用水分子的作用。挤出处理及协同瓜尔胶使得 CP 的崩解值增大，且瓜尔胶与阿魏酸共存时对 E-CP 崩解值的增大效果更明显，表明挤出处理协同瓜尔胶及阿魏酸可降低板栗全粉糊高温下的耐剪切性。挤出处理可显著降低 CP 回生值，而添加瓜尔胶则有助于增大 E-CP 的回生值。E-CP 的热糊稳定性和冷糊稳定性的特征值均有所降低，说明挤出处理可改善板栗全粉的热糊和冷糊稳定性。然而，E-CP 的热糊稳定性特征值（4 BU）在仅复合 3 wt%瓜尔胶或复合 3 wt%瓜尔胶与 3 wt%阿魏酸时显著增加，分别增至 69 BU 和 108 BU，说明瓜尔胶与阿魏酸对热糊稳定性有降低作用。结合板栗全粉糊化性质的测定结果，挤出协同瓜尔胶及阿魏酸改性的板栗全粉具有较高的峰值黏度和崩解值或可适用于重组米、面条等食品体系。



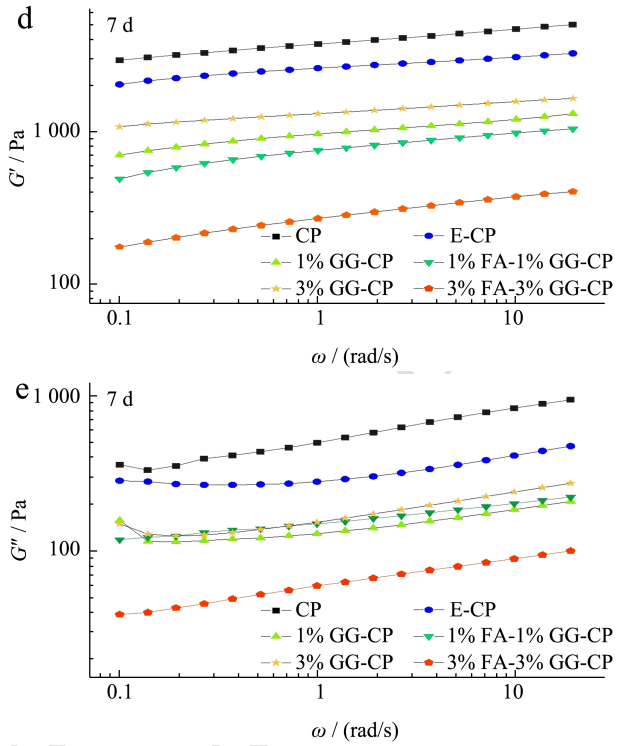


图 2 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉 Brabender 糊化曲线(a)及动态流变曲线(b、c、d、e)的影响

Fig.2 Effects of extrusion coupled with guar gum and ferulic acid on Brabender gelatinization (a)and the dynamic rheological curves (b, c, d, e) of chestnut powder

2.5 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对储存过程中板栗全粉糊动态流变学特性的影响

全粉糊冷藏过程中样品 *G*’增加与体系中淀粉的回生相关，*G*”增加是由于凝胶硬度增加使体系能量因摩擦增加部分转化为热量的原因[21,22]。如图 2b、2c 和图 2d、2e 所示，挤出处理降低了 CP 储藏 1 d 和 7 d 的 *G*’和 *G*”，这表明挤出会降低板栗全粉糊储藏过程中形成的凝胶网络结构的刚性。添加瓜尔胶后，样品的 *G*’仍高于 *G*”，且两者之间并未相互交叉，说明仍为弱凝胶结构特征，这与瓜尔胶对珍珠粟淀粉的作用结果相一致[23]。此外，瓜尔胶对储藏过程中板栗全粉凝胶刚性的影响取决于添加量，添加 1 wt.%瓜尔胶使 E-CP 储藏 1 d 和 7 d 的 *G*’和 *G*”降低，当添加量提高至 3 wt.%时，其储藏 1 d 的 *G*’以及储藏 1 d 与 7 d 的 *G*”较 1% GG-CP 均升高。由此可见，添加亲水胶体对于板栗全粉凝胶表现出两种作用，或是通过相互作用有助于增大全粉凝胶的硬度[18]，或是亲水胶体的添加抑制淀粉回生从而降低凝胶硬度[24]。与 GG-CP 相比，FA-GG-CP 储藏 1 d 的 *G*’则介于 GG-CP 之间，储藏 7 d 的 *G*”随着瓜尔胶与阿魏酸的添加量而降低。

表 1 Brabender 糊化特征参数

Table 1 Brabender gelatinization characteristic parameters

样品	起糊温度/℃	峰值黏/BU	热糊稳定性/BU	冷糊稳定性/BU	崩解/BU	回生值/BU
CP	51.4	339	26	64	3	214
E-CP	46.5	260	4	29	42	107
1% GG-CP	42.4	400	22	14	150	135
3% GG-CP	36.6	698	69	4	352	197
1% FA-1% GG-CP	44.7	435	31	16	176	133
3% FA-3% GG-CP	38.9	775	108	11	417	189

2.6 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉消化特性的影响

挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉消化性能的影响如表 2 所示，挤出处理导致板栗全粉中慢消化组分（SDC）转为快消化组分（RDC），这是由于挤出处理可破坏淀粉原本的颗粒完整结构，导致淀粉链上酶作用位点暴露，进而提高了淀粉消化性能[25]。协同瓜尔胶有助于提高 E-CP 的 RC 含量，且与瓜尔胶添加量相关，这与瓜尔胶对玉米淀粉消化特性的影响相一致[26]。在挤出板栗全粉-瓜尔胶二元体系中引入阿魏酸后，FA-GG-CP 的 RC 含量得以显著性提升，这主要是瓜尔胶所引发的空间位阻作用以及多酚对淀粉酶的抑制作用所导致的[27,28]。综上所述，挤出处理协同瓜尔胶（3 wt%）与阿魏酸（3 wt%）对板栗全粉消化性能的调控作用最佳。当协同 3 wt%亲水胶体及 3 wt%阿魏酸时，改性板栗全粉的抗消化组分含量较原板栗全粉提高了 27.00%~32.10%。

表 2 挤出协同瓜尔胶及阿魏酸对板栗全粉消化性能的影响

Table 2 Effects of extrusion coupled with guar gum and ferulic acid on digestion property of chestnut powder

样品	RDC/%	SDC/%	RC/%
CP	56.05±0.16^{b}	9.40±0.34^{a}	34.55±0.18^{e}
E-CP	58.10±0.07^{a}	7.44±0.13^{c}	34.46±0.06^{e}
1% GG-CP	55.88±0.15^{b}	7.19±0.21^{d}	36.93±0.06^{d}
3% GG-CP	53.93±0.20^{d}	8.06±0.09^{b}	38.01±0.11^{c}
1% FA-1% GG-CP	54.43±0.15^{c}	5.88±0.12^{e}	39.69±0.27^{b}
3% FA-3% GG-CP	50.35±0.37^{e}	4.01±0.15^{f}	45.64±0.22^{a}

注：RDC 为快消化组分；SDS 为慢消化组分；RC 为抗消化组分。同列肩标字母不同表示有显著性差异（P<0.05）。

3 结论

挤出处理协同瓜尔胶作用显著提高了板栗全粉的冻融稳定性、吸水性和水溶性，但会导致其吸油性降低。进一步引入阿魏酸作用可进一步提高板栗全粉的冻融稳定性，但其水溶性和吸油性并无显著变化。同时，板栗全粉热糊稳定性降低，峰值粘度和崩解值显著提高。此外，挤出协同瓜尔胶及阿魏酸作用可显著提高板栗全粉中的抗消化组分，其中 3% FA-3% GG-CP 的抗消化组分含量最高，相比原板栗全粉提高了 32.10%。研究结果可为高品质营养健康的板栗产品的开发提供基础数据。

参考文献

[1] Barbosa Mendes de Vasconcelos M d C, Bennett R N, Rosa E A S, et al. Industrial processing effects on chestnut fruits (*Castanea sativa* Mill.). 1. Starch, fat, energy and fibre [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44(12): 2606-2612.

[2] Agarwal C, Hofmann T, Vranská M, et al. *In vitro* antioxidant and antibacterial activities with polyphenolic profiling of wild cherry, the European larch and sweet chestnut tree bark [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(9): 2355-2370.

[3] Sangiovanni E, Piazza S, Vrhovsek U, et al. A bio-guided approach for the development of a chestnut-based proanthocyanidin-enriched nutraceutical with potential anti-gastritis properties [J]. Pharmacological Research, 2018, 134: 145-155.

[4] Zhu F. Properties and food uses of chestnut flour and starch [J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(7): 1173-1191.

[5] NorazatulHanim M R, Chin N L, Yusof Y A. Effects of grinding time on rheological, textural and physical properties of natural peanut butter stored at different temperatures [J]. Journal of Texture Studies, 2016, 47(2): 131-141.

[6] Lee E-s, Song H-g, Choi I, et al. Effects of mung bean starch/guar gum-based edible emulsion coatings on the staling and safety of rice cakes [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116696.

[7] Xu N, Zhang Y, Zhang G, et al. Effects of insoluble dietary

fiber and ferulic acid on rheological and thermal properties of rice starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193: 2260-2270.

[8] Hong Y, Liu G, Zhou S, et al. Influence of guar gum on the in vitro digestibility of tapioca starch [J]. Starch-Starke, 2016, 68(3-4): 339-347.

[9] 陈子意.槟榔芋全粉挤压膨化特性的研究[D].福州:福建农林大学,2015.

[10] Horstmann S W, Axel C, Arendt E K. Water absorption as a prediction tool for the application of hydrocolloids in potato starch-based bread [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 129-138.

[11] Alam M S, Pathania S, Sharma A. Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings [J]. Lwt - Food Science and Technology, 2016, 74: 135-144.

[12] 朱新鹏,郭全忠.不同品种马铃薯的颗粒全粉功能品质分析[J].保鲜与加工,2015,15(4):62-65.

[13] 饶晨露,陈玲,张成志,等.不同改良剂对青稞全粉发糕品质的影响[J].现代食品科技,2021,37(9):193-199.

[14] Englyst H N, Kingman S M, Cummings J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(Suppl 2): S33-50.

[15] Yuan R C, Thompson D B. Freeze-thaw stability of three waxy maize starch pastes measured by centrifugation and calorimetry [J]. Cereal Chemistry, 1998, 75(4): 571-573.

[16] Xu X, Ye S, Zuo X, et al. Impact of guar gum and locust bean gum addition on the pasting, rheological properties, and freeze-thaw stability of rice starch gel [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2022, 11(16): 2508.

[17] Zeng Q, Zhang L, Liao W, et al. Effect of xanthan gum co-extruded with OSA starch on its solubility and rheological properties [J]. Lwt - Food Science and Technology, 2021, 147: 111588.

[18] Yadav K, Yadav B S, Yadav R B, et al. Physicochemical, pasting and rheological properties of colocasia starch as influenced by the addition of guar gum and xanthan gum [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(4): 2666-2676.

[19] Rahman A, Eltayeb S M, Ali A O, et al. Chemical composition and functional properties of flour and protein isolate extracted from Bambara groundnut (*Vigna subterranean*) [J]. African Journal of Food Science, 2011, 5(2): 82-90.

[20] Shi X, BeMiller J N. Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 50(1): 7-18.

[21] Krystyjan M, Adamczyk G, Sikora M, et al. Long-term storage stability of selected potato starch-Non-starchy hydrocolloid binary gels [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(2): 270-276.

[22] Dobosz A, Sikora M, Krystyjan M, et al. Short-and long-term retrogradation of potato starches with varying amylose content [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5): 2393-2403.

[23] Dangi N, Yadav B S, Yadav R B. Pasting, rheological, thermal and gel textural properties of pearl millet starch as modified by guar gum and its acid hydrolysate [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 139: 387-396.

[24] Luo Y, Niu L, Li D, et al. Synergistic effects of plant protein hydrolysates and xanthan gum on the short- and long-term retrogradation of rice starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 144: 967-977.

[25] Zhang Y J, Zuo H Y, Xu F, et al. The digestion mechanism of jackfruit seed starch using improved extrusion cooking technology [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106154.

[26] Zhou S, Hong Y, Gu Z B, et al. Effect of heat-moisture treatment on the in vitro digestibility and physicochemical properties of starch-hydrocolloid complexes [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105736.

[27] BeMiller J N. Pasting paste, and gel properties of starch-hydrocolloid combinations [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(2): 386-423.

[28] Zheng Y X, Tian J H, Yang W H, et al. Inhibition mechanism of ferulic acid against α-amylase and α-glucosidasee [J]. Food Chemistry, 2020, 317: 126346.