翟爱华，韦智，王雪纯，等. 蔗糖对不同品种赤小豆淀粉性能的影响 [J]. 食品工业科技，2023，44(2)：83−89. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030154
ZHAI Aihua, WEI Zhi, WANG Xuechun, et al. Effect of Sucrose on Properties of Different Red Adzuki Bean Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 83−89. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030154

·研究与探讨·

蔗糖对不同品种赤小豆淀粉性能的影响

翟爱华[1,2]，韦　智[1]，王雪纯[1]，张东杰[1,2]
（1.黑龙江八一农垦大学食品学院，黑龙江大庆 163319；
2.国家杂粮工程技术研究中心，黑龙江大庆 163319）

摘　要：以三种不同赤小豆淀粉为原料，通过分析添加蔗糖前后淀粉的糊化性能、热力学性能、消化性能等特性，探究蔗糖对淀粉性能的影响。结果表明：直链淀粉含量较高的珍珠红赤小豆淀粉，具有较大的粒径、较高的峰值黏度和回生值，但其糊化温度和最终黏度较低；当添加 10% 的蔗糖后，三种淀粉的平均粒径、峰值黏度、凝沉性和快速消化淀粉（Rapidly digestible starch，RDS）显著降低（$P<0.05$），而三种淀粉的糊化温度、热焓值、回生值和衰减值却显著增加（$P<0.05$）；慢速消化淀粉（Slowly digestible starch，SDS）含量除珍珠红赤小豆淀粉外均显著增加（$P<0.05$），淀粉凝胶性以及抗性淀粉（Resistant starch，RS）虽有下降，但不显著。蔗糖的添加促进了赤小豆淀粉的回生；抑制了淀粉的糊化、降低了抗老化性和消化性。

关键词：赤小豆淀粉，蔗糖，糊化性能，消化性能
中图分类号：TS234.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002−0306(2023)02−0083−07
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030154
本文网刊：

Effect of Sucrose on Properties of Different Red Adzuki Bean Starch

ZHAI Aihua[1,2]，WEI Zhi[1]，WANG Xuechun[1]，ZHANG Dongjie[1,2]
（1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China；
2.National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China）

Abstract: Taking three kinds of red adzuki bean starch as raw materials, the pasting properties, thermodynamic properties and digestive performance of starch were analyzed before and after adding sucrose, and the effects of sucrose on starch properties were explored. The results showed that pearl red adzuki bean starch with higher amylose content had larger particle size, higher peak viscosity and resuscitation value, but its pasting temperature and final viscosity were lower. When 10% sucrose was added, the average particle size, peak viscosity, retrogradation and rapidly digestible starch of three kinds of starches decreased significantly ($P<0.05$), while the pasting temperature, enthalpy value, resuscitation value and attenuation value of three kinds of starches increased significantly ($P<0.05$). The content of slowly digestible starch increased significantly except pearl red adzuki bean starch ($P<0.05$), while the starch gelatinizing property and resistant starch decreased without significance. The addition of sucrose promoted the resuscitation of adzuki bean starch. The gelatinization of starch was inhibited, and the anti-aging and digestibility were reduced.

Key words: red adzuki bean starch; sucrose; gelatinization characteristics; digestive properties

赤小豆是一种膳食豆类，是东亚最早种植的作物之一。由于其营养丰富的蛋白质和淀粉，以及甜美的口感，常常被广泛用作庆祝活动中甜点的原料[1]。淀粉类食品是最常见的一类食品，为健康饮食提供了能量和营养，而蔗糖是可食用淀粉类食品加工过程中十分常见的一类添加剂。因此，为了改进淀粉类食品的风味与营养，确定食品的最佳工艺条件需要进一步研究添加蔗糖对此类食品中淀粉的理化性质所产生的影响[2−3]。

近些年来国内外关于添加糖对淀粉理化指标的

收稿日期：2022−03−15
基金项目：国家重点研发计划项目“杂粮食品精细化加工关键技术合作研究及应用示范”（2018YFE0206300）；黑龙江省自然科学基金研究团队项目“杂粮与主粮复配科学基础及慢病干预机制”（TD2020C003）；红小豆淀粉及蛋白质结构与功能特性的关系研究（校启动计划 XDB-2016-17）。
作者简介：翟爱华（1970−），女，博士，教授，研究方向：粮食油脂及蛋白质工程，E-mail: zhaiaihua@sina.com。

影响也有了许多研究。张珊等[4]研究糖对淀粉热力学特性的影响，发现添加蔗糖能够显著增加淀粉的糊化温度（$P<0.05$），并且随着蔗糖浓度的增加而升高；赵小梅等[5]研究淮山药淀粉糊化及质构特性，发现淀粉的糊化焓也随蔗糖浓度的增加而升高，而蜡质淀粉变化不显著；Desam 等[6]发现增加蔗糖的浓度会降低淀粉的热稳定性，同时增加淀粉凝胶的黏性和咀嚼性。张晓宇[7]、杨玉玲等[8]研究糖对淀粉凝胶特性的影响，得出随着蔗糖浓度的增加，淀粉凝胶的硬度和弹性均显著增加，并且增加淀粉凝胶的冻融稳定性。Anil 等[9]、Xing 等[10]利用快速黏度分析仪（rapid viscosity analysis，RVA）分析糖对淀粉糊化特性的影响，发现蔗糖对淀粉溶胀率的提升，呈现先增加后降低的趋势，同时可提高淀粉的峰值黏性和最终黏性，蔗糖在提高淀粉的峰值黏度方面比葡萄糖更有效。Slade 等[11]通过研究蔗糖在蛋糕烘烤中的功能及其对蛋糕品质的影响，发现在蛋糕老化过程中，蔗糖浆既是一种增塑剂又是一种溶剂，以减少糊状淀粉的有害作用和水分的损失，以增加蛋糕的润泽口感。焦昆鹏等[12]利用体外酶解探究添加水溶性大豆多糖对马铃薯淀粉消化特性的影响，结果显示：水溶性大豆多糖在一定程度上降低了马铃薯淀粉的消化率。以上研究大多是关于蔗糖对淀粉糊化和凝胶性质影响的研究，而关于蔗糖对赤小豆淀粉的研究较少。

本研究选用黑龙江最常见的三种赤小豆品种（珍珠红、宝清红、大红袍）为主要原料，从赤小豆中提取淀粉，并研究添加蔗糖前后对不同品种赤小豆淀粉的糊化性能以及消化性能的影响，对其进行分析，并明确其变化，为在蔗糖改变淀粉类食品中的应用提出技术参数和依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

赤小豆（大红袍、宝清红、珍珠红） 来自黑龙江大庆市泰来县农场；蔗糖（分析纯） 天津大茂化工药剂厂。

Bettersize2000 激光散射粒度分析仪 丹东市百特仪器有限公司；RVA4500 型快速黏度分析仪 瑞典波通仪器公司；DSC1 型差示扫描量热仪 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司；TA.XT Plus 质构仪 美国 Stable mini color grader MICGIA 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 赤小豆淀粉的制备 赤小豆淀粉采用 Reddy 等[13]的碱法提取。将赤小豆（100 g）在室温下浸入 500 mL 0.3% Na_2SO_3 溶液中 24 h。去皮冲洗后，在搅拌机中粉碎 5 min，通过 100 和 200 目筛对浆液进行筛分。将滤液加入蒸馏水中（比例为 1∶5），并在室温下静置 12 h。去除上清液，将沉淀溶解在 400 mL 0.02% NaOH 中，并在 4 ℃ 下沉淀 2 h，然后倒出上清液。用蒸馏水洗涤沉淀的淀粉，直到 pH 为中性，然后在 4000 r/min 下离心 10 min，然后在 40 ℃ 下干燥 24 h。将干淀粉研磨并通过 100 目筛，得到赤小豆淀粉。称取 1.0 g 赤小豆淀粉样品，加入 100 mL 蒸馏水搅拌均匀，配制成质量分数为 1% 的淀粉乳，试验组以质量分数为 10% 的蔗糖溶液代替蒸馏水配制淀粉乳[14]。

1.2.2 理化指标测定 水分含量测定参考 GB 5009-2016[15] 直接干燥法；淀粉含量测定参考 GB 5009.9-2016[16] 酸水解法；蛋白含量测定参考 GB 5009.5-2016[17] 凯氏定氮法；直链淀粉含量测定参考 GB/T 15683-2008[18]；脂肪含量测定参考 GB 5009.6-2016[19] 索氏抽提法；透光率测定采用 Craig 等[20]的测定方法。取 10 g 样品，每个样品测定三次。

1.2.3 粒度分布测定 淀粉乳粒度分布参考 Sukhija 等[21]提出的方法测定。测定条件：样品质量分数为 34%，介质折射率 1，样品折射率 1.51。首先，将无水乙醇引入循环进料样品井，然后，对分散剂、环境散射光和电子噪声进行背景测量。减去背景后，边搅拌边添加样品，最后调整样品泵和搅拌器，以便将转盘速度降低一半，以进行样品测定。

1.2.4 差示扫描量热测定 淀粉差示扫描量热测定参考 Reddy 等[22]提出的方法测定。将 3.5 mg（干基）淀粉与 7 μL 蒸馏水混合后，添加到差示扫描量热仪（DSC）样品架中。测定条件：保护气体为氮气，流速 50 mL/min，温度范围 20~120 ℃，加热速率 10 ℃/min。

1.2.5 糊化特性测定 淀粉糊化特性参考 Dorota 等[23]提出的方法测定。将 3.0 g（干基）淀粉与蒸馏水（25 mL）混合，置于快速粘度分析仪（RVA）测定罐中，用塑料桨手动均质，以防止结块。测定条件：将分散液在 50 ℃ 的条件下以 960 r/min 的速率搅拌 10 s，然后将转速降至 160 r/min，保持 1 min，然后加热至 95 ℃ 并保持 2.5 min，最后降温至 50 ℃ 并保持 2 min。

1.2.6 凝沉性测定 参照 Zhang 等[24]提出的方法测定。将质量分数为 1% 的淀粉完整倒入 100 mL 带有具体刻度的量筒中，静置，每间隔 12 h 记录一次淀粉糊发生沉降的刻度，观察淀粉糊的凝沉情况，淀粉糊凝沉性是以上清液体积所占总体积的百分比来表示。

1.2.7 凝胶特性测定 参照 Zhang 等[24]的方法测定。将糊化后质量分数为 1% 的淀粉乳密封，于 4 ℃ 的冰箱中冷藏 12 h，放置在质构仪上开始检测。测定条件：探头采用 P/6，测前速度 2.0 mm/s，测中与测后速度均为 1.0 mm/s，时间间隔为 2 s，探头下压高度为 5 mm，触发力 5 g。

1.2.8 体外消化特性测定 采用 Wang 等[25]的方法测定赤小豆淀粉的消化特性。称量 0.2 g 样品于锥形瓶中，加入 15 mL 0.2 mol·L^{-1} 醋酸钠缓冲液（pH5.2），混匀后加入 10 mL 混合酶液（含 290 U·mL^{-1} 猪胰 α-淀粉酶和 15 U·mL^{-1} 糖化酶），放置在 37 ℃ 恒温水浴中振荡 120 min。在 20、120 min 各取 0.5 mL 酶

解液，加入 4 mL 无水乙醇，于 4000 r·min^{-1} 离心 10 min。取离心上清液，采用 D-葡萄糖检测试剂盒测定葡萄糖含量。每个样品的快速消化淀粉（RDS）、慢速消化淀粉（SDS）、抗性淀粉（RS）的计算公式如下：

$$RDS(\%) = \frac{0.9(G_{20} - G_0)}{W} \times 100$$

$$SDS(\%) = \frac{0.9(G_{120} - G_{20})}{W} \times 100$$

$$RS(\%) = \frac{(W - RDS - SDS)}{W} \times 100$$

式中：G_0 为淀粉中游离的葡萄糖质量（mg）；G_{20} 为 20 min 时释放的葡萄糖质量（mg）；G_{120} 为 120 min 时释放的葡萄糖质量（mg）；W 为淀粉样品的质量（mg）。

1.3　数据处理

试验每个处理重复三次，数据以平均数±标准差的形式呈现；采用 Excel、SPSS25.0 对数据进行整理分析，用 GraphPad Prism 8 软件进行绘图。

2　结果与分析

2.1　赤小豆淀粉理化指标分析

由表 1 可知，三种赤小豆淀粉的理化成分差异显著（P<0.05）。水分含量在 8.58%~11.04% 之间，由于提取淀粉时采用了相同的干燥时间和温度，因此，三种淀粉的水分含量在可接受范围内（<15%）[26]。淀粉含量在 73.29%~75.16% 之间，大红袍的含量最高，珍珠红的含量最低。淀粉受到植物来源、气候、农艺条件以及收获与分离过程的影响。三种赤小豆淀粉的蛋白质与脂肪含量均较少，范围分别为 0.28%~0.35%、0.03%~0.07%，脂肪与蛋白质主要为淀粉提取过程中的少量残留。这与豆科植物淀粉颗粒中常见的低蛋白质和脂肪含量一致[27]；蛋白质和脂肪含量低反映了提取过程对纯化淀粉的有效性。直链淀粉含量在 28.35%~35.43%，通常来讲，直链淀粉含量对淀粉类产品的功能和质量性能的影响有着重要的作用，而直链淀粉含量差异可能是由基因型以及土壤和气候条件造成的。此外，淀粉溶液的透光率与淀粉分子的分支大小有关，直链淀粉含量越高，淀粉越容易重结晶，产生回生现象，进而使得透光率降低[28]。因此，直链淀粉含量最高的珍珠红，透光率最低为 5.93%。

2.2　蔗糖对不同赤小豆淀粉乳粒径的影响

由表 2 得知，三种赤小豆淀粉的平均粒径范围在 35.58~43.29 μm 之间，其中大红袍赤小豆淀粉平均粒径最低，珍珠红赤小豆淀粉平均粒径最高；粒度分布是具有不同粒度范围的粒子数与粒子总数的比率，该指标影响淀粉的使用和产品质量，唐偲雨等[28]研究发现，粒径较大的赤小豆淀粉糊化稳定性好，凝胶性强，易于老化。当淀粉粒径较大时，淀粉在加热过程中会表现出较低的凝胶化温度，这是因为热能使得淀粉颗粒的吸水性和溶胀性之间的相互作用导致淀粉无定形区域中的 α-1,6 糖苷键结构松动，小分子淀粉与其他链交联形成更大的颗粒结构[29]。因此，粒径相对较大的珍珠红赤小豆淀粉，加工以后口感较差。当加入 10% 蔗糖后，三种赤小豆淀粉的平均粒径均显著（P<0.05）降低。武晓娟等[30]认为，豆子的大小对豆子的化学组成、未加糖豆沙的颗粒大小、红色度和组织特性有显著影响。

2.3　蔗糖对不同赤小豆淀粉热性能的影响

从表 3 可以看出，大红袍淀粉的糊化起始温度与热焓值最高分别为 62.92 ℃、7.47 J/g；宝清红淀粉的糊化起始温度与热焓值居中分别为 60.38 ℃、7.34 J/g；珍珠红淀粉的糊化起始温度与热焓值最低分别为 59.75 ℃、6.55 J/g。这是由于分子间的结合能力，随着淀粉中直链淀粉含量的增加而变弱，随着

表 1　赤小豆淀粉理化指标

Table 1　Physicochemical indexes of adzuki bean starch

淀粉种类	水分含量(%)	淀粉含量(%)	蛋白含量(%)	脂肪含量(%)	直链淀粉含量(%)	透光率(%)
宝清红	10.56±0.90^{b}	74.54±0.80^{b}	0.39±0.02^{a}	0.07±0.003^{a}	31.29±0.20^{b}	6.32±0.57^{b}
珍珠红	8.58±1.30^{c}	73.29±0.60^{c}	0.35±0.03^{b}	0.05±0.004^{b}	35.43±0.18^{a}	5.93±0.41^{c}
大红袍	11.04±0.50^{a}	75.16±0.50^{a}	0.28±0.04^{c}	0.03±0.001^{c}	28.35±0.13^{c}	6.47±0.32^{a}

注：同列不同字母表示数据间有显著性差异（P<0.05）。

表 2　不同赤小豆淀粉乳的粒径分布

Table 2　Particle size distribution of different red adzuki bean starch

淀粉种类	蔗糖添加量(%)	平均粒径(μm)	D_{10}(μm)	D_{50}(μm)	D_{90}(μm)
宝清红	0	39.04±0.90^{a}	26.98±0.80^{a}	42.16±0.39^{a}	57.90±0.20^{a}
	10	35.16±0.40^{b}	23.14±0.60^{b}	38.25±0.31^{b}	54.61±0.17^{b}
珍珠红	0	43.29±1.30^{a}	29.13±0.60^{a}	45.12±0.43^{a}	59.87±0.18^{a}
	10	38.61±2.40^{b}	25.47±0.20^{b}	41.25±0.29^{b}	56.10±0.22^{b}
大红袍	0	35.58±0.50^{a}	25.16±0.50^{a}	40.92±0.25^{a}	55.28±0.13^{a}
	10	30.14±0.20^{b}	21.81±0.40^{b}	36.40±0.18^{b}	50.12±0.23^{b}

注：同列小写字母表示同一品种不同条件数据有差异（P<0.05）；表3~表4同。

表 3 不同赤小豆淀粉的热力学参数

Table 3 Thermodynamic properties of different red adzuki bean starch

淀粉种类	蔗糖添加量(%)	起始温度(℃)	峰值温度(℃)	终止温度(℃)	热焓值(J·g^{-1})
宝清红	0	60.38±0.25^{b}	68.02±0.02^{b}	77.87±0.11^{b}	7.34±0.19^{b}
	10	63.40±0.54^{a}	70.59±0.27^{a}	79.53±0.20^{a}	7.89±0.11^{a}
珍珠红	0	59.75±0.55^{b}	67.9±0.23^{b}	79.73±0.31^{b}	6.55±0.30^{b}
	10	61.28±0.29^{a}	70.64±0.15^{a}	82.60±0.18^{a}	6.83±0.27^{a}
大红袍	0	62.92±0.16^{b}	71.98±0.08^{b}	79.8±0.24^{b}	7.47±0.46^{b}
	10	65.07±0.30^{a}	73.27±0.19^{a}	82.06±0.16^{a}	7.51±0.35^{a}

温度的升高淀粉的亲水基团易与水分子结合，容易糊化，而热焓值的差异是由于淀粉结晶区的双螺旋键合力与其结构和数量而导致；因此，直链淀粉含量高的珍珠红，双螺旋链比重低，随着温度的升高淀粉结晶区的相互作用力减弱，所需糊化焓少。加入 10%蔗糖后，三种赤小豆淀粉的糊化温度和热焓值均显著增加(P<0.05)。当体系中温度低时，水分子很难打破淀粉分子的有序结构，所以必须升高体系工作温度提供更多的热能才能打破其结构，使得糊化程度降低[30]。同时，由于蔗糖分子与水分子建立比较稳定的氢键，减少了水分子的自由度，阻止了水分子进入淀粉颗粒的无定形区；所以当气温低时，没有足够的水分子分解淀粉的晶体结构，而高温可以打破淀粉分子与羟基的结合以及蔗糖分子与水分子之间的氢键，使淀粉分子达到完全糊化状态[30]。

2.4 蔗糖对不同赤小豆淀粉糊化特性的影响

利用 RVA 测得 3 种赤豆淀粉的糊化特性指标如表 4 所示。三种淀粉的峰值黏度在 8614~11461 cP 之间，谷值黏度在 6329~5023 cP 之间，其中珍珠红淀粉峰值黏度最高，谷值黏度最低；大红袍淀粉峰值黏度最低谷值黏度最高。这是因为，直链淀粉含量高的珍珠红淀粉分子间的结合能力较差，再升温过程中淀粉易被瓦解，使得峰值黏度变高；而直链淀粉含量高支链淀粉占比低，且支链淀粉具有较高的结合度，因此在糊化后期最终黏度降低[13]。当添加 10% 的蔗糖后，三种淀粉的峰值黏度、谷值黏度均显著下降(P<0.05)，衰减值、最终黏度和回生值均显著上升。这是因为蔗糖分子增加了淀粉链的交联面积，同时体系中的蔗糖分子与淀粉完全缔合，而剩余的蔗糖分子与蛋白质、脂肪和其他化合物形成糖—蛋白、糖—脂和其他聚合物，这些聚合物增大了搅拌桨的阻力，从而导致表观黏度大大增加[14]。

2.5 蔗糖对不同赤小豆淀粉凝沉性的影响

根据图 1 得知，三种淀粉均发生了凝沉现象，当放置 36 h 之后淀粉的凝沉速率变缓，稳定性变好。而三种淀粉中的珍珠红凝沉性强于其他淀粉。这是因为直链淀粉的链状结构在溶液中空间屏障小，易于定向，容易回生[31]，结果导致直链淀粉含量最高的珍珠红凝沉性最强。当加入 10% 的蔗糖后，淀粉的凝沉速率显著(P<0.05)减缓，增强了淀粉糊的稳定性，因为蔗糖分子与像淀粉分子一样带有羟基的亲水性化合物，二者均可通过氢键产生“亲和性”，当向体系中加入蔗糖后，蔗糖分子抑制淀粉分子间的氢键缔合，使得淀粉分子不易形成凝胶[32]，因此降低了凝沉性。

2.6 蔗糖对不同赤小豆淀粉凝胶特性的影响

凝胶是糊化后的淀粉经过冷却处理，淀粉分子再次以分子间氢键的形态所组成的三维空间网状[33]；淀粉分子间的作用力强弱决定凝胶强度，淀粉凝胶的老化程度决定黏性强弱[34]。三种淀粉的凝胶强度如图 2 所示。由图 2 可以看出，珍珠红的凝胶强度最大，稳定性最强；大红袍的凝胶强度最小，稳定性最弱。这是因为淀粉的凝胶强度与直链淀粉含量具有较大关系，体系中的直链淀粉含量越高，分子间的间距越小，相互结合能力越强，进而凝胶强度增大[35]。当添加 10% 的蔗糖后，三种淀粉的凝胶强度和黏度有所下降但不显著。Matthew 等[36] 研究发现糖分子与淀粉链的相互作用可以增加淀粉颗粒的硬度，增加淀粉颗粒膨胀的时间，在颗粒破裂前达到更高的峰值黏度。当蔗糖添加量达到一定浓度时，淀粉的凝胶硬度降低是由于直链淀粉的浸出量减少，降低了连续网络中的直链淀粉浓度[36]。

2.7 蔗糖对不同赤小豆淀粉消化特性的影响

三种赤小豆淀粉的 RDS、SDS 和 RS 含量如图 3

表 4 不同赤小豆淀粉的糊化性能参数

Table 4 Gelatinization characteristics of different red adzuki bean starch

淀粉种类	蔗糖添加量(%)	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	衰减值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)
宝清红	0	8632±1.3^{a}	6020±3.0^{a}	2612±1.9^{b}	6595±0.4^{b}	575±1.8^{b}
	10	7408±2.9^{b}	5834±2.6^{b}	2790±2.8^{a}	6731±2.9^{a}	592±3.0^{a}
珍珠红	0	11461±1.2^{a}	5023±2.7^{a}	6438±1.5^{b}	6170±1.8^{b}	1147±0.5^{b}
	10	9324±3.5^{b}	4950±4.1^{b}	6529±3.6^{a}	6543±5.7^{a}	1350±3.1^{a}
大红袍	0	8614±0.4^{a}	6329±1.1^{a}	2285±0.8^{b}	6863±2.6^{b}	534±1.8^{b}
	10	7127±2.6^{b}	6037±1.8^{b}	2461±3.7^{a}	6894±3.6^{a}	561±2.1^{a}

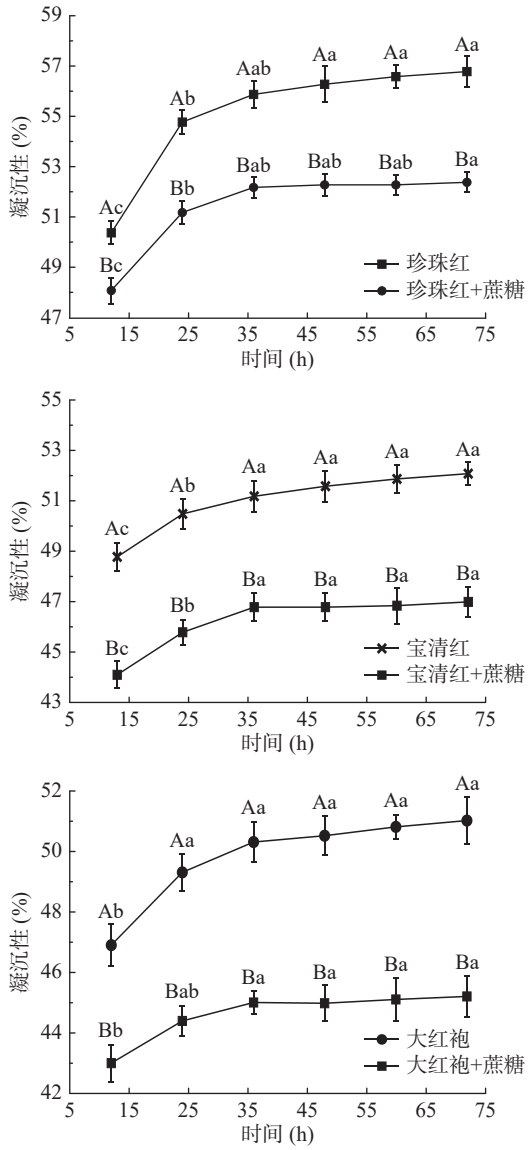

图 1　不同赤小豆淀粉的凝沉性

Fig.1　Retrogradation of different red adzuki bean starch

注：大写字母表示相同时间，不同样品间差异显著（P<0.05）；小写字母表示同类样品，不同时间差异显著（P<0.05）。

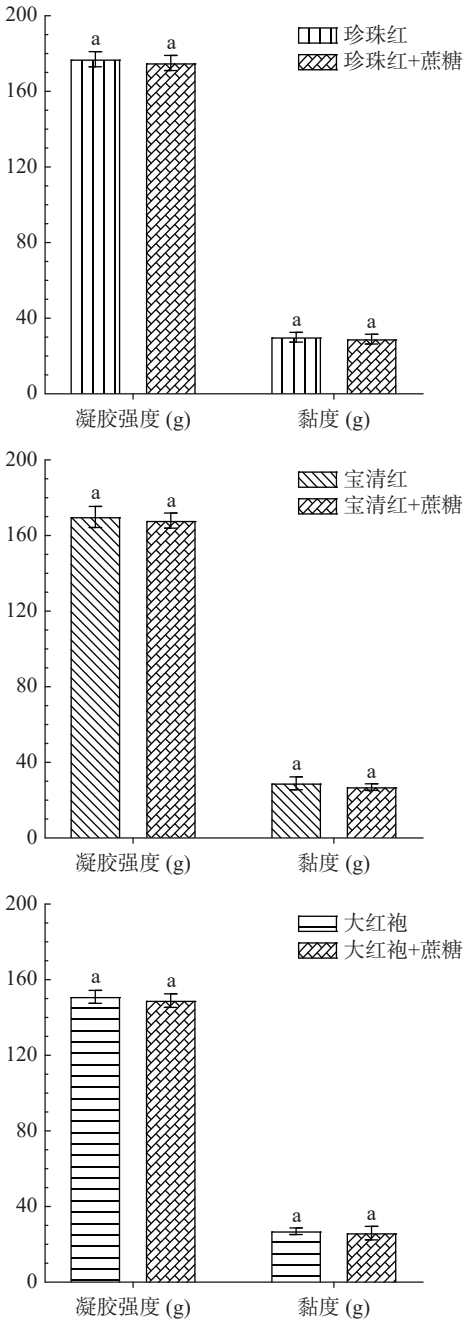

图 2　不同赤小豆淀粉的凝胶特性

Fig.2　Gel properties of different red adzuki bean starch

注：不同小写字母表示不同样品间差异显著（P<0.05）；图 3 同。

所示。由图 3 可以看出，三种淀粉的 RDS、SDS、RS 含量间差异显著（P<0.05），珍珠红含量最高、大红袍含量最低。主要原因在于，大红袍在三种淀粉中的平均粒径最小，单位质量比表面积小，导致酶的扩散与吸收效果变差，减缓了酶解作用。此外，由于珍珠红淀粉中直链淀粉含量最高，直链淀粉具有稳定不易被破坏的结晶结构，因此对淀粉酶的抗性较强[37]。Li 等[38] 研究发现，高直链淀粉小麦粉产品相较普通小麦粉产品，消化速率慢，抗性淀粉含量高，因此具有增强营养功能的潜力。当添加 10% 的蔗糖后，三种赤小豆淀粉的 RDS 含量均显著（P<0.05）下降；而三种赤小豆淀粉的 SDS 与 RS 含量有上升趋势但不显著。说明蔗糖具有潜在调节淀粉消化特性的作用，这是因为蔗糖具有竞争水分和包裹作用，当蔗糖分子包裹在淀粉颗粒表面时，即阻碍了淀粉酶对淀粉的作用；又抑制了淀粉的吸水膨胀，从而导致淀粉颗粒糊

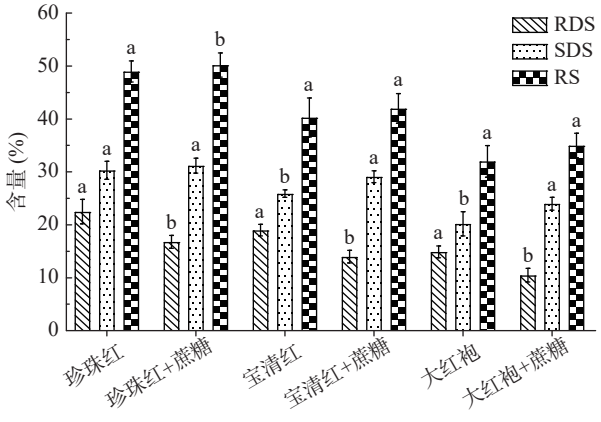

图 3　不同赤小豆淀粉的消化特性

Fig.3　Digestive properties of different red adzuki bean starch

化不完全，因此降低了淀粉消化性[39]。当淀粉经过热处理时，会促进支链淀粉双螺旋束和直链淀粉-蔗糖复合物的增多，使得 SDS 和 RS 的含量增加。

3 结论

以三个不同品种赤小豆中提取的淀粉为原料，对添加蔗糖前后淀粉的粒度分布、糊化性能、和体外消化性能研究。结果表明：直链淀粉含量最高的珍珠红淀粉起始糊化温度、最终黏度、热焓值和峰值黏度最低而粒径最大；SDS、RDS、RS 含量显著高于其他淀粉（$P<0.05$），不易被消化。当加入 10% 的蔗糖时，三种赤小豆淀粉的平均粒径均显著减小（$P<0.05$），起始糊化温度和最终黏度显著升高（$P<0.05$），峰值黏度显著降低（$P<0.05$），但对凝胶强度和消化性的影响不大，后续实验还需要进一步研究添加蔗糖对赤小豆淀粉的微观结构，分子性能等影响变化，以揭示微观结构对糊化性能的联系。

参考文献

[1] BI S, WANG A J D, LAO F, et al. Effects of frying, roasting and boiling on aroma profiles of adzuki beans (*Vigna angularis*) and potential of adzuki bean and millet flours to improve flavor and sensory characteristics of biscuits[J]. Food Chemistry, 2021, 339(1): 127878.

[2] ZOLELMEIN A, MOVAHHED S, AZIZI M H, et al. Assessment of simultaneous addition of sucrose and xanthan effects on the thermal, pasting, and rheological behavior of corn starch[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(3): 453−463.

[3] WILLIAM T H, GEORGE F F, FREDERICK C F, et al. Emulsification properties of amylose-fatty sodium salt inclusion complexes[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 90(5): 490−499.

[4] 张珊, 倪春蕾, 张高鹏, 等. 小分子糖对马铃薯淀粉晶体结构、糊化特性和冻融稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(8): 49−59. [ZHANG S, NI C l, ZHANG G P, et al. Effects of small molecular sugars on the crystal structure, gelatinization properties and freeze-thaw stability of potato starch[J]. Chinese Journal of Food Science, 2019, 19(8): 49−59.]

[5] 赵小梅, 李清明, 苏小军, 等. 淮山药淀粉糊化及质构特性[J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 110−115. [ZHAO X M, LI Q M, SU X J, et al. Starch gelatinization and textural properties of Chinese yam[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(6): 110−115.]

[6] DESAM G P, JONES O G, NARSIMHAN G. Prediction of the effect of sucrose on equilibrium swelling of starch suspensions [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 294(4): 110397.

[7] 张晓宇. 小分子糖对木薯淀粉性质的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012. [ZHANG X Y. Effects of small molecular sugars on the properties of tapioca starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.]

[8] 杨玉玲, 张沫, 陈银基, 等. 绿豆淀粉凝胶的质构特性和超微结构研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(4): 36−41. [YANG Y L, ZHANG M, CHEN Y J, et al. Texture properties and ultrastructure of mung bean starch gel[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2014, 29(4): 36−41.]

[9] ANIL G, SOMATHILAKA R, HAROLD C. Thermal, pasting, and gelling properties of wheat and potato starches in the presence of sucrose, glucose, glycerol, and hydroxypropyl β-cyclodextrin[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 70(1): 112−122.

[10] XING Q H, HOU C L, ZHANG Z G, et al. Comparative study on the physicochemical properties of pea, chickpea, and wheat starch gels in the presence of sweeteners[J]. Starch-Stärke, 2017, 69(9−10): 1600287.

[11] SLADE L, KWEON M, LEVINE H. Exploration of the functionality of sugars in cake-baking, and effects on cake quality[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(2): 283−311.

[12] 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. Effects of water-soluble soybean polysaccharides on physicochemical properties of potato starch[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(14): 54−59.]

[13] REDDY C K, LUAN F, XU B J. Morphology, crystallinity, pasting, thermal and quality characteristics of starches from adzuki bean (*Vigna angularis* L.) and edible kudzu (*Pueraria thomsonii* Benth)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105(Pt.1): 354−362.

[14] 陈学玲, 关健, 梅新, 等. 氯化钠、蔗糖和碳酸钠对芡实淀粉糊化特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 60−65. [CHEN X L, GUAN J, MEI X, et al. Effects of sodium chloride, sucrose and sodium carbonate on the gelatinization properties of gorgonian starch[J]. Food Science, 2017, 38(17): 60−65.]

[15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National food safety standard. Determination of moisture in food [S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National food safety standard. Determination of starch in foods [S]. Beijing: China Standard Press, 2016.]

[17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National food safety standard. Determination of protein in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 15683-2008 大米 直链淀粉含量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 15683-2008 Determination of amylose content in rice [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.]

[19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定 [S]. 北京: 中国标准

出版社, 2016. ［National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National food safety standard. Determination of fat in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.］
［20］ CRAIG S A, MANINGAT C C, SEIB P A, et al. Starch paste clarity[J]. Cereal Chem, 1989, 66(3): 173−182.
［21］ SUKHIJA S, SINGH S, RIAR C S. Physicochemical, crystalline, morphological, pasting and thermal properties of modified lotus rhizome (*Nelumbo nucifera*) starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 50−58.
［22］ REDDY C K, PRAMILA S, HARIPRIYA S. Pasting, textural and thermal properties of resistant starch prepared from potato (*Solanum tuberosum*) starch using pullulanase enzyme[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(3): 1594–1601.
［23］ DOROTA G, LESLAW J. Effects of amino acids on gelatinization, pasting and rheological properties of modified potato starches[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 92: 143−154.
［24］ ZHANG B, BAI B, PAN Y, et al. Effects of pectin with different molecular weight on gelatinization behavior, textural properties, retrogradation and *in vitro* digestibility of corn starch[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 58−63.
［25］ WANG S J, LIU C, WANG S. Drying methods used in starch isolation change properties of C-type chestnut (*Castanea mollissima*) starches[J]. LWT-Food Science & Technology, 2016, 73: 663−669.
［26］ 王志伟, 闫凤霞, 徐嘉良, 等. 3 种高粱品种淀粉特性和酿造黄酒的风味品质分析[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 45−51. ［WANG Z W, YAN F X, XU J L, et al. Analysis of starch characteristics and flavor quality of three sorghum varieties[J]. Food Science, 2019, 40(13): 45−51.］
［27］ NIU L Y, WU L Y, XIAO J H. Inhibition of gelatinized rice starch retro-gradation by rice bran protein hydrolysates[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 175: 311−319.
［28］ 唐偲雨, 张玲, 唐进, 等. 几种红小豆理化特性及淀粉性质研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(6): 143−148. ［TANG S Y, ZHANG L, TANG J, et al. Physicochemical properties and starch characteristics of adzuki beans[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(6): 143−148.］
［29］ 张静祎. 红小豆淀粉及 NaCl、蔗糖、油脂添加前后对淀粉特性的影响研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020. ［ZHANG J Y. Effects of adzuki bean starch, NaCl, sucrose and oil on starch properties before and after adding[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020.］
［30］ 武晓娟, 薛文通, 王小东, 等. 豆沙质地特性的感官评定与仪器分析[J]. 食品科学, 2011, 32(9): 87−90. ［WU X J, XUE W T, WANG X D, et al. Sensory evaluation and instrumental analysis of the texture properties of bean paste[J]. Food Science, 2011, 32(9): 87−90.］
［31］ 何传波, 潘丽军, 李琳, 等. 甘薯淀粉磷酸单酯的制备及凝沉性质的研究[J]. 食品科学, 2004, 25(9): 108−112. ［HE C B, PAN L J, LI L, et al. Preparation and retrogradation properties of sweet potato starch phosphate monoester[J]. Food Science, 2004, 25(9): 108−112.］
［32］ 陶锦鸿, 郑铁松, 胡月珍. 莲子淀粉凝胶力学性能影响因素的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(21): 109−112. ［TAO J H, ZHENG T S, HU Y Z. Study on the factors affecting the mechanical properties of lotus seed starch gel[J]. Food Science, 2009, 30(21): 109−112.］
［33］ 王林. 淀粉的糊化与凝胶特性及食用品质研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 67−73. ［WANG L. Gelatinization and gelation properties and edible quality of starch[J]. Preservation and Processing, 2021, 21(2): 67−73.］
［34］ 刘淑婷, 王颖, 佘铁军, 等. 黑龙江地区不同品种芸豆淀粉的物化特性研究[J]. 农产品加工, 2018(10): 16−19,22. ［LIU S T, WANG Y, SHE T J, et al. Study on physicochemical properties of different varieties of kidney bean starch in Heilongjiang[J]. Agricultural Products Processing, 2018(10): 16−19,22.］
［35］ MATTHEW C A, MARYCLAIRE C, LISA J M. Effects of sugars and sugar alcohols on the gelatinization temperatures of wheat, potato, and corn starches[J]. Foods, 2020, 9(6): 757.
［36］ KASAPIS S, AL-MARHOOBI I M, DESZCZYNSKI M, et al. Gelatin vs polysaccharide in mixture with sugar[J]. Biomacromolecules, 2003, 4(5): 1142−1149.
［37］ 任欣, 张一, 方圆, 等. 影响淀粉消化的内外因素[J]. 中国食品学报, 2021, 21(12): 283−292. ［REN X, ZHANG Y, FANG Y, et al. Internal and external factors affecting starch digestion[J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(12): 283−292.］
［38］ LI C L, DHITAL S, GIDLEY M J. High-amylose wheat bread with reduced in vitro digestion rate and enhanced resistant starch content[J]. Food Hydrocolloids, 2022: 123.
［39］ 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. ［CHEN L. Effect and mechanism of pullulan polysaccharide on rice starch properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.］