

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.06.014

超声处理对橡子淀粉理化性质的影响

鲍春铭, 王攀峰

(河南省计量测试科学研究院, 河南 郑州 450000)

摘要: 该研究综合运用显微、流变、质构等手段, 分析超声处理对橡子淀粉结构和理化性质的影响。结果表明, 超声处理会导致橡子淀粉分解, 淀粉颗粒表面亦出现凹陷, 其程度与超声处理时间正相关。超声处理后淀粉颗粒的偏光十字现象虽然保留, 但颗粒粒径增大, 出现聚集。随着超声时间的延长, 淀粉糊的透明度下降, 但其冻融稳定性、沉降体积、温度大于 75 °C 时的溶解度和膨胀度显著改善。淀粉糊的峰值黏度、最低黏度、终值黏度均随着超声时间的延长而下降, 但糊化温度保持稳定, 且适当的超声波处理可提高淀粉凝胶强度。

关键词: 橡子淀粉; 超声处理; 理化性质; 功能特性; 凝胶强度

Effect of Ultrasonic Treatment on Physicochemical Properties of Acorn Starch

BAO Chunming, WANG Panfeng

(Henan Institute of Metrology, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Microscopic, rheological and texture methods were used to analyze the effects of ultrasonic treatment on the structure and physicochemical properties of acorn starch. The results showed that ultrasonic treatment resulted in the decomposition of acorn starch, and some dents appeared on the surface of starch particles, the degree of which was positively correlated with the ultrasonic treatment time. After ultrasonic treatment, although the polarizing cross phenomenon of starch particles remained, the particle size increased, and aggregation appeared. With the extension of ultrasonic treatment time, the clarity of the starch paste decreased, but its freeze-thaw stability, sedimentation, solubility, and swelling were significantly improved. The peak viscosity, trough viscosity, and cold viscosity of starch paste decreased with the extension of ultrasonic treatment time, but the pasting temperature remained stable. Moreover, appropriate ultrasonic treatment could enhance the strength of starch gel.

Key words: acorn starch; ultrasonic treatment; physicochemical properties; functional properties; gel strength

引文格式:

鲍春铭, 王攀峰. 超声处理对橡子淀粉理化性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(6): 99-104.

BAO Chunming, WANG Panfeng. Effect of Ultrasonic Treatment on Physicochemical Properties of Acorn Starch[J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 99-104.

橡子是壳斗科(Fagaceae)植物籽实的统称, 呈蚕茧状, 外有棕红色硬壳, 橡子仁的淀粉含量高达 50%~70%^[1]。我国橡子资源丰富, 年产量 600 万~700 万 t。橡子食用历史悠久, 其应用主要集中在地方特色饮食上, 如橡子酱、橡子豆腐、橡子粉条等^[2-3]。由于其糊化后具有良好的凝胶特性, 在工业上橡子淀粉有望替代粮食淀粉用于制作工业乙醇, 充当造纸和印染用上浆剂^[4]。目前橡子淀粉的理化性质较多。牛鹏飞等^[5]发现橡子淀粉具有一般淀粉的基本特性, 并含有鞣花酸和槲皮素等多酚类物质。程荷芳等^[6]发现橡子淀粉为

椭圆形, 粒径较玉米淀粉小, 但糊化特性与玉米淀粉接近。目前国内外关于橡子淀粉的修饰研究较少。

淀粉的修饰方法包括物理法、化学法和酶法^[7-8]。随着食品绿色加工技术的发展, 淀粉物理修饰的研究迅速发展。目前, 淀粉的物理修饰方法包括超声、微波、超微粉碎等^[9]。超声是淀粉修饰的一种新型物理方法, 具有安全性高、无环境污染、高效率 and 低能耗的优点, 其可调控淀粉的结构与性质, 生产功能各异的变性淀粉^[10]。聂卉等^[11]研究了超声作用下马铃薯淀粉糊的流体性质, 发现增加超声时间和强度可降低该淀粉

作者简介: 鲍春铭(1991—), 男(回), 工程师, 研究方向: 食品化学。

糊的表观黏度。Karwasra 等^[12]发现超声处理可提升小麦淀粉的吸油能力、直链淀粉含量和膨胀能力。张明月等^[13]采用超声辅助预处理法改善了小麦淀粉-单甘酯复合物的制备。

目前采用超声法修饰椰子淀粉鲜有研究。鉴于此,本研究分析超声处理对椰子淀粉理化性质的影响,以期对椰子淀粉的深度开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

椰子淀粉:信阳市越丰农产品有限公司;葡萄糖、苯酚、硫酸(均为分析纯):上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

JY99-IIDN 型超声细胞破碎仪:宁波新芝生物科技股份有限公司;TA-XT Plus 型质构仪:英国 Stable Micro System 公司;TU-1810 型紫外分光光度计:北京普析通用仪器有限责任公司;ME104E/02 型电子天平:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;Quanta 200 型扫描电子显微镜:美国 FEI 公司;BT-9300H 型激光粒度分布仪:丹东市百特仪器有限公司;RVA4500 型快速黏度分析仪:波通瑞华科学仪器(北京)有限公司。Smartlab SE 型 X 射线衍射仪:日本理学公司;BH200P 型偏光显微镜:上海舜宇恒平科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 椰子淀粉的超声处理

将 200 mL 20% 的椰子淀粉乳置于超声细胞破碎仪中,反应容器外设冰浴,在 600 W 下分别处理 0、10、20 min。每次超声作用 2 s,间隔 2 s,超声完成后用蒸馏水洗涤淀粉,经抽滤后于 40 °C 烘干备用。

1.3.2 淀粉水解率的测定

椰子淀粉超声处理完毕后,立即抽滤,滤液适当稀释后采用硫酸-苯酚法测其吸光度,通过与葡萄糖标准曲线 $Y=0.0084x+0.058$ ($R^2=0.9992$) 的对比,确定淀粉水解率^[14]。

1.3.3 淀粉颗粒形态的观察

取适量淀粉样品均匀涂布于黏在载物台的导电胶上,真空喷金后送入扫描电子显微镜样品室,放大 1 000 倍进行观察。同时将适量的淀粉悬浊液滴于载玻片上,盖上盖玻片,置于载物台上,采用偏光显微镜,放大 200 倍观察淀粉的偏光特性^[15]。

1.3.4 淀粉颗粒粒径的测定

采用激光粒度分布仪测定样品的粒度分布^[16]。

1.3.5 淀粉功能特性的测定

淀粉样品的透明度、沉降体积、冻融稳定性、老化值、溶解度和膨胀度测定按照 Lv 等^[17]的研究进行。

1.3.5.1 透明度

透光率的大小反映了淀粉糊透明度的好坏,透光率越高,淀粉糊的透明度越好;反之则越差。将 20 mL 1% 的淀粉悬浊液在沸水浴中加热 15 min。以水为对照,通过紫外分光光度计测定冷却后淀粉糊在 620 nm 下的透明度。

1.3.5.2 沉降体积

将 1% 的淀粉悬浊液在沸水浴中加热 15 min。取 50 mL 淀粉糊于量筒中,沉降 24 h 后,通过量筒读取下层凝沉糊液的体积(mL)。

1.3.5.3 冻融稳定性

冻融稳定性是指淀粉在冻结和溶解交替过程中抵抗变化的性能,表现为析水率的大小。将 6% 的淀粉悬浊液在沸水浴中加热 15 min。取 30 mL 淀粉糊于离心管中,-18 °C 保存,24 h 后取出,室温解冻,4 000 r/min 离心 15 min,析水率计算公式如下,析水率越低,冻融稳定性越好。

$$W = \frac{M - m}{M} \times 100$$

式中:W 为析水率,%;M 为糊重,g;m 为沉淀物重,g。

1.3.5.4 老化值

淀粉老化是糊化的淀粉分子在冷却过程中氢键重新形成所致,淀粉糊中水分析出时空间阻碍越小,越容易析出说明其易老化;将 4% 的淀粉悬浊液在沸水浴中加热 20 min。取 5 mL 淀粉糊于离心管中,4 °C 保存,24 h 后取出,4 000 r/min 离心 15 min,计算析水率(同上),其可反映老化值。

1.3.5.5 溶解度和膨胀度

取 5 mL 5% 的淀粉悬浊液在 55、65、75、85、95 °C 水浴加热 30 min。冷却后 4 000 r/min 离心 15 min。上清液在 105 °C 下烘干至恒重,记录被溶解的淀粉质量(W_1 ,g)。离心管中沉淀质量,记为 W_2 (g),W 为淀粉质量(g)。样品的溶解度(S_0 ,%) 和膨胀度(S_c ,%) 按下列公式计算。

$$S_0 = \frac{W_1}{W} \times 100$$

$$S_c = \frac{W_2}{W \times (1 - S_0)} \times 100$$

1.3.6 淀粉糊化性质测定

淀粉糊化性质的测定按照 Wang 等^[18]的方法进行测定。将 3.0 g 淀粉样品与 25 mL 蒸馏水混合,置于快速黏度分析仪中。样品在 50 °C 保持 1 min,3.5 min 内升温到 95 °C,并保持 3 min,然后在 3.5 min 内降至 50 °C,并保持 2 min,记录此过程中样品的黏度变化。

1.3.7 淀粉凝胶强度的测定

淀粉凝胶强度的测定参照 Zhang 等^[19]的方法。取 3.2 g 淀粉于 50 mL 的烧杯中,加蒸馏水至总质量为

40.0 g, 将其放入 95 °C 的水浴锅中加热搅拌 30 min, 直至淀粉完全糊化, 取出后冷却至室温, 在 4 °C 的冰箱中静置 16 h, 形成稳定的淀粉凝胶。采用配有 P0.5 探头的质构仪测定淀粉凝胶强度。测定参数为触发力 2 g; 压缩距离为 10 mm, 探头的下降速度、测中速度和上升速度分别为 1.5、1.0、1.0 mm/s。

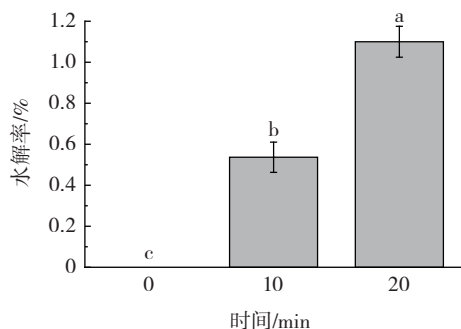
1.4 数据处理

每组试验重复 3 次, 结果用平均值±标准差表示。采用 Origin 2018 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 淀粉水解率分析

超声时间对橡子淀粉水解率的影响见图 1。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

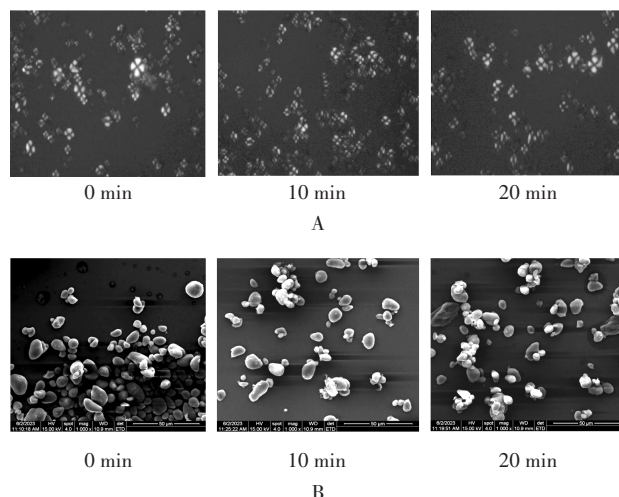
图 1 超声时间对橡子淀粉水解率的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic treatment time on hydrolysis rate of acorn starch

由图 1 可知, 随着超声时间的延长, 橡子淀粉的水解率逐渐增大, 表明超声处理会使淀粉发生分解, 破坏程度与超声时间密切相关。超声波作用于液体介质时会产生热效应、机械效应和空化效应, 其会导致液体介质中生物大分子的降解。Isono 等^[20]发现超声波可降低水中玉米淀粉的分子量, 使其趋于某一特定范围。Czechowska-Biskup 等^[21]也发现 360 kHz 超声波可导致淀粉分子链的断裂, 淀粉水解率提高, 与本试验结果一致。

2.2 淀粉颗粒形貌分析

超声处理对橡子淀粉颗粒形貌的影响见图 2。



A. 偏光十字显微图; B. 扫描电镜显微图。

图 2 超声时间对橡子淀粉的偏光十字显微图和扫描电镜显微图的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic treatment time on polarizing cross microscope and scanning electron microscope images of acorn starch

由图 2 可知, 偏振光经过淀粉颗粒时会产生明显的偏光十字现象, 这是由于淀粉的球状微晶结构^[22]。不同超声时间的橡子淀粉均表现出了明显的偏光十字, 这说明超声处理基本没有对淀粉的球晶结构造成破坏, 淀粉基本保持原有的分子排布和组织结构。超声处理通常会改变淀粉颗粒形貌, 如颗粒出现凹塌、裂缝等^[23]。天然橡子淀粉颗粒呈现球形和椭圆形, 表面及边缘比较光滑, 颗粒完整。经过超声处理后淀粉颗粒形状未发生明显改变, 但表面出现了少量较浅的损伤, 这归因于超声波引起的高频微射流和高剪切力作用于颗粒表面, 并且随着超声时间的延长, 淀粉颗粒表面的破损更加突出, 且出现了明显的颗粒聚集现象。

2.3 淀粉颗粒粒径分析

淀粉的功能特性、糊化特性、凝胶特性、酶解特性等理化性质与其粒径密切相关, 而谷物的淀粉粒径不仅取决于其来源, 还与其加工方式相关^[24]。表 1 是超声时间对橡子淀粉粒径的影响。

表 1 超声时间对橡子淀粉粒径的影响

Table 1 Effect of ultrasonic treatment time on particle size of acorn starch

超声时间/min	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D_{4.3}/\mu\text{m}$	$D_{3.2}/\mu\text{m}$
0	4.081±0.017 ^b	7.951±0.037 ^b	12.090±0.022 ^a	8.048±0.030 ^b	6.881±0.020 ^b
10	4.282±0.012 ^a	8.087±0.020 ^a	12.007±0.012 ^b	8.161±0.010 ^a	7.070±0.010 ^a
20	4.235±0.013 ^a	8.075±0.015 ^a	12.013±0.012 ^a	8.137±0.010 ^a	7.032±0.010 ^a

注: 同列不同的上标小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为颗粒累积分布 10%、50%、90% 的粒径; $D_{3.2}$ 为表面积平均粒径; $D_{4.3}$ 为体积平均粒径。

由表 1 可知, 原橡子淀粉体积平均粒径为 (8.048±0.030) μm , 且呈单峰分布。超声处理后, 淀粉颗粒的

粒径均略有增长, 这是由于超声导致淀粉颗粒内部结构疏松, 水分易于通过孔隙和裂缝进入淀粉颗粒内

部,淀粉颗粒更易吸水膨胀。此外颗粒表面的光滑结构被破坏,颗粒易于聚集,从而粒径变大。这与电镜分析时发现的超声处理后淀粉颗粒出现团聚的结论相印证。

2.4 淀粉功能特性分析

淀粉的功能特性决定了以其为基质构建的产品的性状、营养与感官品质^[25]。超声时间对橡子淀粉的功能特性的影响见表2。

表2 超声时间对橡子淀粉功能特性的影响

Table 2 Effect of ultrasound time on the functional properties of acorn starch

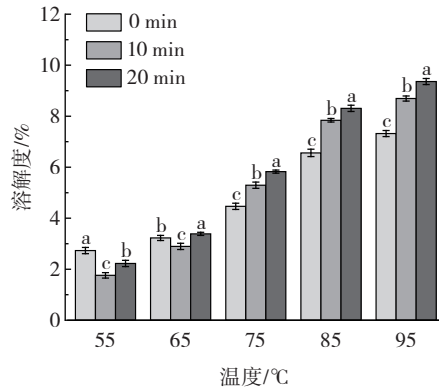
超声时间/min	透光率/%	沉降体积/mL	冻融稳定性(析水率)/%	老化值(析水率)/%
0	4.15±0.06 ^a	14.33±0.29 ^b	37.21±0.50 ^a	13.96±0.53 ^a
10	3.79±0.02 ^b	17.17±0.29 ^a	30.99±1.15 ^b	12.73±0.33 ^b
20	3.56±0.01 ^c	16.17±0.29 ^b	25.78±0.63 ^c	10.49±0.44 ^c

注:同列不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

由表2可知,经过超声处理后,橡子淀粉透明度随超声时间的延长显著降低。这可能是因为超声处理导致淀粉颗粒表面被破坏后更加粗糙,颗粒更易膨胀吸水,从而溶解度增大,且长时间的处理会产生更多短链淀粉分子,其更容易聚集,导致淀粉凝沉,故表现出更低的透明度^[26]。橡子淀粉经过超声处理后其沉降体积有所增加且随着超声时间的延长先增加后降低。由于析水率越低,显示其冻融稳定性越好,可以得出,淀粉凝胶冻融时,淀粉链之间的分子发生聚集出现脱水收缩的现象,导致水从凝胶结构中析出,析水率的大小反映了淀粉凝胶在冻融过程中的稳定性和低温条件下淀粉老化速率的快慢程度。析水率越小,说明淀粉糊的冻融稳定性越好;反之,则越差。因此,可以利用析出的水量来作为评价淀粉冻融性的指标,橡子淀粉经过超声处理后冻融稳定性有显著提升,且随着超声时间的延长而逐步提高。橡子淀粉经过超声处理之后的老化值有显著降低,且随着超声时间的延长而逐渐减小。

淀粉的溶解与膨胀可直接反映淀粉无定形区和结晶区结构比例和分子间氢键的结合程度,其与淀粉颗粒结构、直链淀粉/支链淀粉比率、分子量、链之间的结

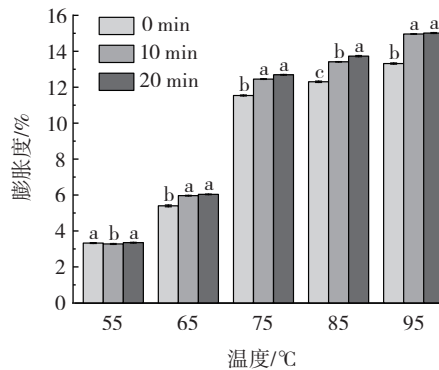
合程度等密切相关^[27]。超声时间对橡子淀粉的溶解度和膨胀度见图3和图4。



不同小写字母表示相同温度条件下差异显著, $P<0.05$ 。

图3 超声时间对橡子淀粉溶解度的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic treatment time on solubility of acorn starch



不同小写字母表示相同温度条件下差异显著, $P<0.05$ 。

图4 超声时间对橡子淀粉膨胀度的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic treatment time on swelling power of acorn starch

由图3、图4可知,超声处理后橡子淀粉在温度大于75°C时的溶解度与膨胀度均有了显著提高,表明超声处理对淀粉有序结构的破坏,加强了淀粉分子与水分子间的互作,提高了淀粉的亲水性。

2.5 淀粉糊化特性分析

淀粉糊化过程包括颗粒吸水膨胀、晶体结构分解、双折射消失和淀粉溶解等,糊化过程对淀粉颗粒有序结构的破坏是不可逆的^[28]。超声处理对橡子淀粉糊化特性的影响见表3。

表3 不同超声时间对橡子淀粉糊化性质的影响

Table 3 Effect of different ultrasound times on the paste properties of acorn starch

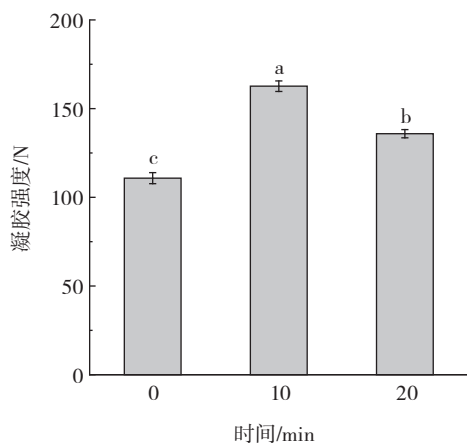
超声时间/min	糊化温度/°C	峰值黏度/cP	最低黏度/cP	终值黏度/cP	崩解值/cP	回生值/cP
0	76.00±0.57 ^a	3 424.00±19.05 ^a	2 392.00±9.24 ^a	3 883.00±15.59 ^a	1 032.00±24.83 ^b	1 491.00±15.59 ^b
10	76.00±0.00 ^a	3 291.00±10.26 ^b	2 067.00±58.39 ^c	3 757.00±63.26 ^b	1 224.00±4.93 ^a	1 690.00±63.26 ^a
20	76.00±0.00 ^a	3 174.00±62.77 ^c	2 249.00±55.51 ^b	3 677.00±62.43 ^c	925.00±13.58 ^c	1 428.00±62.43 ^b

注:同列不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

从表3可以看出, 橡子淀粉的峰值黏度、最低黏度、终值黏度分别为3 424.00、2 392.00、3 883.00 cP, 超声处理20 min后橡子淀粉的峰值黏度、最低黏度、终值黏度分别为3 174.00、2 249.00、3 677.00 cP, 糊化温度无显著变化。超声处理会导致淀粉部分大分子链断裂, 流动阻力减小, 因此呈现出更低的黏度。罗志刚等^[29]采用超声波对高链玉米淀粉含量为30%的淀粉乳进行处理, 发现随超声波功率增大, 糊化温度没有变化, 峰值黏度降低, 与本试验结果一致。

2.6 淀粉凝胶强度分析

淀粉的冷却回生形成淀粉凝胶, 完全糊化的直链淀粉分子、支链淀粉分子重新排序而形成凝胶。Guo等^[30]研究发现, 淀粉的来源及淀粉的加入量对淀粉凝胶的强度有重要影响。图5为超声时间对橡子淀粉凝胶强度的影响。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图5 超声时间对橡子淀粉凝胶强度的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic treatment time on gel strength of acorn starch

由图5可知, 淀粉凝胶强度随超声时间的延长先增加后降低。这可能是由于在超声作用下产生的短链淀粉分子更易互作结合, 从而增强了淀粉的凝胶强度。当超声时间延长至20 min时, 由于淀粉分子链的过度降解, 淀粉的凝胶强度开始下降。

3 结论

超声处理对橡子淀粉的结构和理化性质有显著影响。由于超声引起的水解效应, 淀粉颗粒的偏光十字现象虽然保留, 但其表面出现了破损, 颗粒倾向于聚集, 颗粒粒径增加。随着超声时间的延长, 淀粉糊的透明度虽然下降, 但其冻融稳定性、温度大于75℃时的溶解度和膨胀度显著增加, 老化值降低。淀粉糊的峰值黏度、最低黏度、终值黏度均随着超声时间的延长而下降, 但糊化温度保持稳定, 且适当的超声处理可提高淀粉凝胶强度。

参考文献:

- [1] 张盼, 俞辉, 项彬彬, 等. 加热对橡子淀粉抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(13): 116-118.
ZHANG Pan, YU Hui, XIANG Binbin, et al. Effect of heating on the antioxidant activities of acorn starch[J]. Food Science, 2012, 33(13): 116-118.
- [2] 郭王达, 罗勤贵, 张国权. 碱性蛋白酶水解脱除蛋白的橡子淀粉分离工艺条件优化[J]. 粮食加工, 2011, 36(5): 36-39.
GUO Wangda, LUO Qingui, ZHANG Guoquan. Condition optimization of acorn starch extraction by alkali protease enzymolysis[J]. Grain Processing, 2011, 36(5): 36-39.
- [3] 张志健, 李新生, 江海. 橡子淀粉加工技术比较研究[J]. 食品科技, 2009, 34(6): 142-145.
ZHANG Zhijian, LI Xinsheng, JIANG Hai. Research on comparison of processing technologies of acorn starch[J]. Food Science and Technology, 2009, 34(6): 142-145.
- [4] 杨雪果, 雷虹, 常飞, 等. 栓皮栎橡子淀粉的加工特性研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(11): 250-256, 249.
YANG Xueguo, LEI Hong, CHANG Fei, et al. Processing properties of starch from *Quercus variabilis* bl. acorn[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(11): 250-256, 249.
- [5] 牛鹏飞, 石晓晴, 李林强. 橡子淀粉基本理化特性和多酚类物质组成分析[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(10): 34-39.
NIU Pengfei, SHI Xiaqing, LI Linqiang. Analysis on the basic physicochemical properties and polyphenolic composition of acorn starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(10): 34-39.
- [6] 程荷芳, 卫民, 蒋剑春, 等. 橡子与玉米、木薯的淀粉成分物理性质比较[J]. 林产化学与工业, 2009, 29(S1): 183-186.
CHENG Hefang, WEI Min, JIANG Jianchun, et al. Comparison on physical properties of acorn starch with corn starch and cassava starch[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2009, 29(S1): 183-186.
- [7] FONSECA L M, EL HALAL S L M, DIAS A R G, et al. Physical modification of starch by heat-moisture treatment and annealing and their applications: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 274: 118665.
- [8] OBADI M, QI Y J, XU B. High-amylose maize starch: Structure, properties, modifications and industrial applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 299: 120185.
- [9] ZHU F. Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43(1): 1-17.
- [10] MONROY Y, RIVERO S, GARCÍA M A. Microstructural and techno-functional properties of cassava starch modified by ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 42: 795-804.
- [11] 聂卉, 李辰, 陈雨, 等. 超声处理对马铃薯淀粉糊流体性质和表观黏度的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 19-24.
NIE Hui, LI Chen, CHEN Yu, et al. Effect of ultrasonic treatment on rheological characteristics and apparent viscosity of potato starch paste[J]. Food Science, 2016, 37(15): 19-24.
- [12] KARWASRA B L, KAUR M, GILL B S. Impact of ultrasonication on functional and structural properties of Indian wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar starches[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 1858-1866.
- [13] 张明月, 杨留枝, 史苗苗, 等. 超声辅助预处理法制备小麦淀粉-单甘酯复合物[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 279-284.
ZHANG Mingyue, YANG Liuzhi, SHI Miaomiao, et al. Study on ultrasonic-assisted preparation of wheat starch-monoacylglyceride complex[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(11): 279-284.

- [14] 陆兰芳, 扎西拉宗, 吴进菊, 等. 超声处理对小米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 60-67.
LU Lanfang, ZHA Xilazong, WU Jinju, et al. Effects of ultrasonic treatment on the structure and physicochemical properties of millet starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 60-67.
- [15] 杨冯, 顾楠, 赵国华. 不同品种菱角淀粉的颗粒特性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(3): 118-122.
YANG Feng, GU Nan, ZHAO Guohua. Granular properties of water calltrop starch from three varieties[J]. Food Science, 2010, 31(3): 118-122.
- [16] 刘梦, 温纪平, 刘帅, 等. 小麦粉粒度对淀粉性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 194-199.
LIU Meng, WEN Jiping, LIU Shuai, et al. Effect of granularity of wheat flour on properties of starch[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 194-199.
- [17] LV X F, ZHANG S, ZHEN S Y, et al. Physicochemical properties of tigernut (*Cyperus esculentus*) tuber starch and its application in steamed bread[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(8): e16792.
- [18] WANG S J, COPELAND L. Effect of alkali treatment on structure and function of pea starch granules[J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1635-1642.
- [19] ZHANG S, GENG S, SHI Y Z, et al. Fabrication and characterization of Pickering high internal phase emulsions stabilized by Tartary buckwheat bran flour[J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100513.
- [20] ISONO Y, KUMAGAI T, WATANABE T. Ultrasonic degradation of waxy rice starch[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1994, 58(10): 1799-1802.
- [21] CZECHOWSKA-BISKUP R, ROKITA B, LOTFY S, et al. Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 60(2): 175-184.
- [22] ALTAN A, MASKAN M. Microwave assisted drying of short-cut (ditalini) macaroni: Drying characteristics and effect of drying processes on starch properties[J]. Food Research International, 2005, 38(7): 787-796.
- [23] SUJKA M, JAMROZ J. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(2): 413-419.
- [24] LI Y, WANG H R, WANG L J, et al. Multi-scale structure and digestive property of bran starch in different particle size wheat bran [J]. Food Chemistry, 2023, 414: 135744.
- [25] BONTO A P, TIOZON R N, SREENIVASULU N, et al. Impact of ultrasonic treatment on rice starch and grain functional properties: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 71: 105383.
- [26] PUNIA S. Barley starch: Structure, properties and *in vitro* digestibility - A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 868-875.
- [27] HSIEH C F, LIU W C, WHALEY J K, et al. Structure, properties, and potential applications of waxy tapioca starches - A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 83: 225-234.
- [28] CHEN S, QIN L, CHEN T, et al. Modification of starch by polysaccharides in pasting, rheology, texture and *in vitro* digestion: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 207: 81-89.
- [29] 罗志刚, 扶雄, 罗发兴, 等. 超声处理下水相介质中高链玉米淀粉糊的性质[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 74-78.
LUO Zhigang, FU Xiong, LUO Faxing, et al. Properties of high-amylose maize starch paste treated with ultrasonic in water system [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(11): 74-78.
- [30] GUO C S, HAN F X, GENG S, et al. The physicochemical properties and Pickering emulsifying capacity of acorn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124289.

责任编辑:张璐
收稿日期:2023-07-13