DOI:10.12441/spyswjs.20240327005 [文章编号] 1673-1689(2024)10-0163-10

凯特芒果淀粉的提取及其性质研究

胡方洋[1,2,3] 邓 健[1] 张得祥[1,2] 刘彩华[1,2,3] 麦馨允[1,2,3] 朱正杰[1,2,3*]

(1. 百色学院农业与食品工程学院,广西 百色 533000; 2. 广西芒果生物学重点实验室,广西 百色 533000; 3. 亚热带特色农业产业学院,广西 百色 533000)

摘要:以凯特芒果为原料,从芒果肉和芒果核中提取芒果淀粉,比较芒果肉淀粉、芒果核淀粉及其提取后残渣干粉的理化性质。结果表明:芒果肉淀粉质量分数高于芒果核淀粉,分别为90.02、78.64 μg/mg,且两者均以支链淀粉为主,尤其是芒果核淀粉中支链淀粉质量占总淀粉质量的93.15%。进一步对芒果淀粉及其残渣干粉的理化性质进行了测定,尽管芒果肉淀粉与芒果核淀粉在糊化度上没有显著差异,但芒果肉淀粉粒径最小、颗粒均匀呈圆形,且具有更强的膨胀能力,在80 ℃时已经完全糊化形成蜂窝状网络结构。此外,提取后的芒果残渣干粉也表现出良好的溶解度和膨胀度。该研究不仅为开发食品新原料及丰富淀粉品种提供理论依据,还有助于拓展芒果及其副产物资源在食品及其他领域中的应用,实现芒果及其副产物的高值化利用。

关键词:凯特芒果;芒果肉淀粉;芒果核淀粉;糊化

Study on the Extraction and Properties of Keitt Mango Starch

HU Fangyang[1,2,3] *DENG Jian*[1] *ZHANG Dexiang*[1,2] *LIU Caihua*[1,2,3] *MAI Xinyun*[1,2,3]
ZHU Zhengjie[1,2,3*]

(1. Agriculture and Food Engineering College, Baise University, Baise 533000, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Biology for Mango, Baise 533000, China; 3. Industrial College of Subtropical Characteristic Agriculture, Baise 533000, China)

Abstract: To explore the further development and utilization of mango and its by-products, this study focused on the extraction of mango starch from both the flesh and kernel of Keitt mangoes and compared the physicochemical properties of mango flesh starch, mango kernel starch, and the dried residue powder after extraction. The results showed that the starch content in mango flesh (90.02 μg/mg) was higher than that in mango kernel (78.64 μg/mg). Both starches primarily consist of amylopectin, with mango kernel starch containing a particularly high amylopectin content, accounting for 93.15%. Further analysis of the physicochemical properties of mango starch and its residual dry powder revealed that although there was no significant difference in gelatinization between mango flesh starch and mango kernel starch, mango flesh starch had the smallest particle size, with uniformly round particles. It also exhibited stronger expansion capacity, and the starch gelled completely at 80 ℃ to form a honeycomb-like network structure. In addition, the dried powder of mango residue showed improved solubility and swelling capacity after extraction. These findings provide a theoretical basis for the development of new food raw materials and the enrichment of starch varieties. Moreover, they contribute to expand the application of mango and its by-products in the food industry and beyond, so as to facilitate the high-value utilization of mango and its by-products.

基金项目:百色市科学研究与技术开发计划项目(百科20241556);广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY0756);广西一流学科建设项目(农业资源与环境,桂教科研[2022]1号)。

通信作者:朱正杰(1983—),男,博士,高级工程师,主要从事土壤环境质量与芒果资源开发利用研究。E-mail:zhuzhjie@163.com

收稿日期:2024-03-27 **修回日期:**2024-05-10

Keywords: Keitt mango; mango flesh starch; mango kernel starch; gelatinization

芒果素有“果中神品”之称，其口感爽甜，营养价值高，富含维生素和矿物质等营养成分[1]。芒果果核肥大，含有黄酮、多酚、多糖等活性成分，具有抗氧化[2]、抗炎、抑菌[3]、抑制肥胖[4]等多种生理功能。随着芒果种植业的迅速发展，芒果产量逐年提升。然而，芒果作为应季水果具有成熟期集中、保质期短等特点，导致大量应季芒果因贮存运输及销售问题造成损失。为了便于运输以及延长芒果货架期，通常在芒果未完全成熟时（6~7 分熟）便将其采摘，在此成熟度下，芒果中的淀粉还未完全转化为可溶性糖类物质，不适宜直接食用或加工，需要催熟至目标成熟度后才能进行销售或进一步加工。此外，在芒果加工过程中，芒果核常被作为废弃物丢弃，不仅造成资源浪费，还给环境造成了污染。因此，迫切需要开展芒果深加工及其副产物资源的有效利用研究，以减少资源浪费、提升芒果经济价值。

淀粉是主要的能量来源之一，除了作为食品原料为人体提供能量外，还常被用作乳化剂[5]、稳定剂[6]和药物载体等，在食品加工、医药、化工等行业中广泛应用。为了开发新的淀粉品种，越来越多的研究者将研究焦点转移至如香蕉、芒果等淀粉含量高的水果。目前，关于芒果淀粉的研究主要集中在芒果核上。聂红梅等[7]以芒果核为原料提取淀粉，研究料液质量体积比、浸泡 pH、浸泡时间和烘干温度对提取效率的影响。结果发现在最优条件下，芒果核淀粉得率可达 79.49%。还有研究者采用冷榨汁离心沉淀或干浆湿磨的方法来分离芒果淀粉，比较了两个广为栽培的品种（Haden 和 Palmer）通过不同方法提取的淀粉分子结构与功能差异。结果表明，与常规湿磨淀粉相比，冷榨汁离心沉淀对 Haden 和 Palmer 的淀粉得率分别提高了 26% 和 9%，且淀粉呈现出更低程度的损伤和聚集现象[8]。

然而，关于采后未完全成熟的芒果肉中淀粉特性的研究鲜有报道，关于提取淀粉后剩余残渣是否具有使用价值及其性质也尚不明确。作者以采后未完全成熟的凯特芒果为原料，采用果汁提取法提取芒果肉与芒果核中的淀粉，并比较了芒果肉淀粉、芒果核淀粉及其提取后残渣干粉的理化性质，旨在减少芒果鲜果及其加工副产物的资源浪费，扩大芒果在食品及其他行业的应用范围，提升芒果的经济价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

凯特芒果（糖度 3.4~4.2）：百色市小光水果店；C_2H_5OH：西陇科学股份有限公司；H_3PO_4：天津市大茂化学试剂厂；NaOH：天津市致远化学试剂有限公司；pH 缓冲液：上海雷磁仪器制造有限公司；KOH：江苏强盛功能化学股份有限公司；$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$、Na_2CO_3、$CuSO_4 \cdot 5H_2O$：常德比克曼生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

数显电热恒温水浴锅：LC-WB-8+30 L 型，力辰科技有限公司；电热鼓风干燥箱：GZX-9240MBE 型，上海博讯实业有限公司医疗设备厂；台式 pH 计：PH-3C 型，上海美谱达仪器有限公司；高速台式离心机：SN-TGL-18 型，上海尚普仪器设备有限公司；激光粒度分布仪：Betterize2600 型，丹东百特仪器有限公司；多功能酶标仪：HM-96C 型，山东恒美电子科技有限公司；荧光倒置显微镜：IX73 型，奥林巴斯工业有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 淀粉的提取

参考池明亮等[9]的方法，采用果汁提取法提取芒果淀粉。凯特芒果去皮后，将果肉和果核切成小块，然后分别放入破壁机进行搅碎，接着加入蒸馏水稀释，质量体积比为 1 g∶2 mL，搅拌均匀后静置 2 h 后过滤，收集滤液后继续将滤渣反复提取 4 次，合并滤液。将滤液以 3 000 r/min 离心 10 min，所得沉淀即为芒果淀粉。将离心后沉淀和提取剩余残渣置于鼓风干燥箱中烘干至质量恒定，随后粉碎成粉末，从而得到凯特芒果肉淀粉、芒果核淀粉及其残渣干粉。

1.3.2 淀粉测定波长的确定

参考黄惠芳等[10]的方法，采用双波长法测定芒果淀粉的质量分数。在 0~1 000 nm 内对直链淀粉与支链淀粉标准品进行扫描，得到吸收光谱图，其中横坐标为波长，纵坐标为吸光度（A），见图 1。基于双波长法的原理，确定直链淀粉测定波长 λ_1 为 592 nm，

参比波长λ_2为510 nm；支链淀粉测定波长λ_3为570 nm，参比波长λ_4为619 nm。

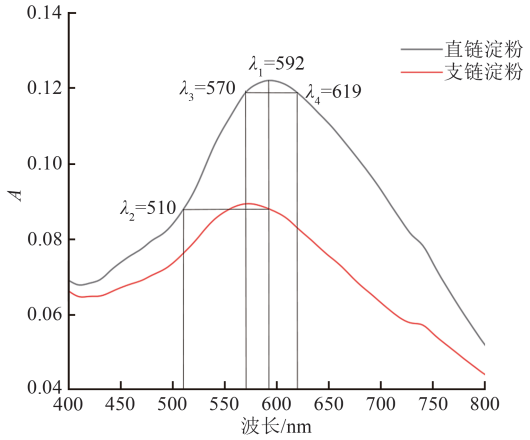


图1　直链淀粉与支链淀粉的吸收光谱图

Fig. 1　Absorption spectra of amylose and amylopectin

1.3.3　淀粉标准曲线的绘制

根据图1中确定的直链淀粉与支链淀粉波长，分别以直链淀粉与支链淀粉双波长下的吸光度差值ΔA_1和ΔA_2为纵坐标，淀粉标准品质量浓度为横坐标绘制直链淀粉与支链淀粉标准曲线，其中直链淀粉标准曲线见图2，支链淀粉标准曲线见图3。直链淀粉标准曲线的拟合公式为y=0.000 6x+0.002 8，R^2=0.999 2；在直链淀粉质量浓度为0~30 μg/mL时，直链淀粉质量浓度与吸光度差值ΔA_1呈良好的线性关系。支链淀粉标准曲线的拟合公式为y=0.000 1x−0.003 5，R^2=0.999 6。表明支链淀粉质量浓度在0~100 μg/mL时，支链淀粉质量浓度与吸光度差值ΔA_2呈良好的线性关系。

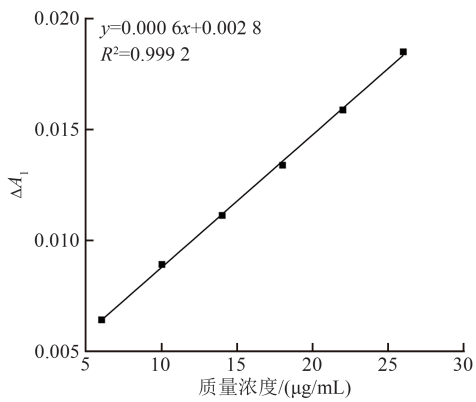


图2　直链淀粉标准曲线

Fig. 2　Standard curve of amylose

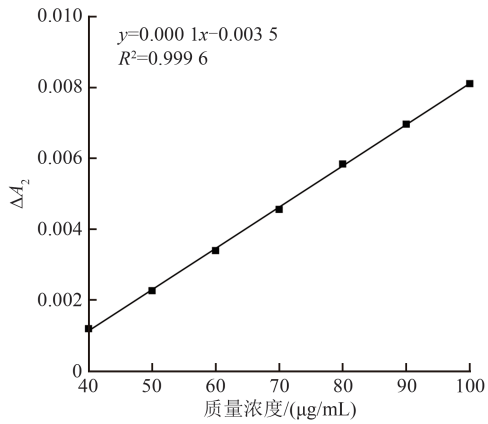


图3　支链淀粉标准曲线

Fig. 3　Standard curve of amylopectin

1.3.4　稳定性试验

分别配制0.4 mg/mL的直链淀粉和1.2 mg/mL的支链淀粉显色溶液。以空白液为对照组，分别在0、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60 min时测定直链淀粉与支链淀粉的吸光度。

1.3.5　淀粉质量分数的测定

参考何洁等[11]的方法，称取0.10 g样品，加入少量无水乙醇使其呈湿润状态，然后加入9 mL 1 mol/L的KOH，于80 ℃热水浴15 min（期间不断搅拌），取出后冷却至室温，然后用蒸馏水定容至50 mL，静置20 min后过滤，收集滤液备用。首先，分别取3 mL滤液和3 mL蒸馏水作为样品组和空白对照组，向每组中加入20~30 mL蒸馏水；随后用0.1 mol/L的HCl调整溶液pH至3.5，再向每组中加入5 mL碘试剂；搅拌均匀后转移至50 mL容量瓶中定容，摇匀并静置20 min。分别在波长λ_1、λ_2、λ_3、λ_4下使用多功能酶标仪测定样品组和空白对照组的吸光度，计算样品中直链淀粉与支链淀粉的质量分数。

1.3.6　淀粉回收率试验

在芒果肉淀粉、芒果肉干粉及芒果核淀粉、芒果核干粉样品中，分别添加0.10、0.20、0.30 mg的直链淀粉标准品和0.24、0.48、0.72 mg的支链淀粉标准品。测定样品的淀粉质量，并按式（1）计算淀粉回收率。

$$R=(m_2-m_1)/m_0\times100\% \quad (1)$$

式中：

R——直链淀粉或支链淀粉的淀粉回收率，%；

m_2——添加后直链淀粉或支链淀粉的质量，mg；

m_1——添加前直链淀粉或支链淀粉的质量,mg;

m_0——直链淀粉或支链淀粉标准品的质量,mg。

1.3.7 粒径的测定

使用激光粒度分析仪分别测定凯特芒果肉干粉、芒果肉淀粉、芒果核干粉和芒果核淀粉的粒径。

1.3.8 颗粒形态的测定

使用荧光倒置显微镜观察凯特芒果肉干粉、芒果肉淀粉、芒果核干粉和芒果核淀粉的颗粒形态。

1.3.9 溶解度和膨胀度的测定

根据作者所在课题组试验方法[12],称取 0.50 g 样品置于 50 mL 离心管中,加入 10 mL 蒸馏水混合均匀;将样品分别在 25、40、55、70、85、100 ℃水浴振荡 30 min,冷却至室温。于 3 000 r/min 离心 15 min,收集上清液,并在 60 ℃条件下干燥至质量恒定。按式(2)计算样品溶解度,按式(3)计算样品膨胀度。

$$S=m_3/m_4\times 100\% \quad (2)$$

式中:

S——溶解度,%;

m_3——上清液烘干后的质量,g;

m_4——样品质量,g。

$$P=\frac{m_5}{m_4(1-S)}\times 100\% \quad (3)$$

式中:

P——膨胀度,%;

m_4——样品质量,g;

S——溶解度,%;

m_5——离心后沉淀的质量,g。

1.3.10 糊化度的测定

参考熊易强[13]的方法测定样品的糊化度。取 3 支试管分别标记为全糊化组、样品组和空白对照组,其中全糊化组分别加入 150 mg 样品和 15 mL 缓冲液混合均匀,沸水浴加热 1 h(其间摇晃 2~3 次),冷却后加蒸馏水至加热前体积;样品组加入 150 mg 样品和 15 mL 缓冲液混合均匀;空白对照组仅加入 15 mL 缓冲液。然后分别在 3 支试管中加入 1 mL 的中温 α-淀粉酶溶液,于 80 ℃水浴 1 h(每 15 min 摇晃 1 次)。1 h 后加入 2 mL 质量分数 10% 的 $ZnSO_4\cdot 7H_2O$ 溶液,混匀后再加入 1 mL 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液,加适量蒸馏水补至终体积为 25 mL,混合均匀后过滤。取 0.1 mL 滤液加入 2 mL 铜试剂,沸水浴 6 min 后再加入 2 mL 磷钼酸试剂,继续加热沸腾 2 min,取出冷却。定容至 25 mL,振荡混匀后用酶标仪在 420 nm 处测定吸光度,并按式(4)计算淀粉糊化度。

$$\alpha=\frac{A_1-A_0}{A_2-A_0}\times 100\% \quad (4)$$

式中:

α——糊化度,%;

A_1——样品组的吸光度;

A_0——空白对照组的吸光度;

A_2——全糊化组的吸光度。

1.3.11 凝胶形态观察

将 1.3.10 中经加热糊化后的样品置于荧光倒置显微镜下观察其凝胶形态。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2020、IBM SPSS Statistics 26、Origin 2019b 等软件进行数据统计分析与制图。

2 结果与讨论

2.1 直链淀粉和支链淀粉的稳定性试验

为了确定直链淀粉与支链淀粉的稳定时间,分别测定了这 2 种淀粉-显色液静置 0~60 min 的吸光度。以测定时间为横坐标,双波长吸光度差值 ΔA 为纵坐标,结果见图 4。直链淀粉 ΔA 值在 20 min 处稍有升高,之后处于平稳状态;而支链淀粉的 ΔA 值在 5~10 min 略微下降,10 min 以后趋于平稳。故选择淀粉-显色液的静置时间为 20 min。

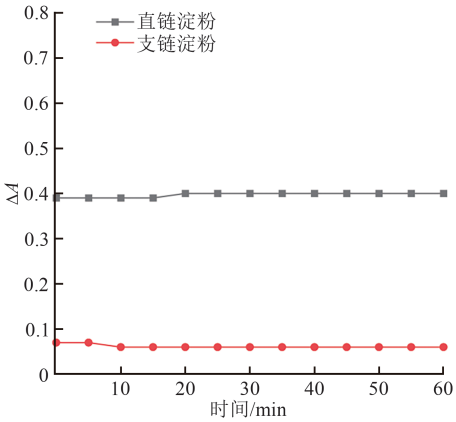


图 4 直链淀粉和支链淀粉稳定性试验

Fig. 4 Stability test of amylose and amylopectin

2.2 回收率试验

在芒果淀粉及其残渣干粉中添加直链淀粉和支链淀粉标准品,其回收率结果分别见表 1~2。

芒果肉淀粉、芒果肉干粉、芒果核淀粉和芒果核干粉中直链淀粉和支链淀粉回收率均在90%以上，表明使用该方法测定芒果淀粉质量分数具有较高的准确度。

表1 芒果直链淀粉回收率结果

Table 1 Recovery rate of mango amylose

样品	添加前直链淀粉质量/mg	添加后直链淀粉质量/mg	添加直链淀粉标准品质量/mg	直链淀粉回收率/%
芒果肉淀粉	0.17±0.01	0.26±0.05	0.10	90.00
		0.38±0.05	0.20	105.00
		0.46±0.00	0.30	96.67
芒果肉干粉	0.01±0.00	0.11±0.01	0.10	100.00
		0.20±0.01	0.20	95.00
		0.28±0.01	0.30	90.00
芒果核淀粉	0.12±0.01	0.25±0.00	0.10	130.00
		0.30±0.01	0.20	90.00
		0.46±0.01	0.30	113.33
芒果核干粉	0.05±0.00	0.15±0.00	0.10	100.00
		0.26±0.00	0.20	105.00
		0.34±0.01	0.30	96.67

表2 芒果支链淀粉回收率结果

Table 2 Recovery rate of mango amylopectin

样品	添加前支链淀粉质量/mg	添加后支链淀粉质量/mg	添加支链淀粉标准品质量/mg	支链淀粉回收率/%
芒果肉淀粉	1.00±0.08	1.25±0.15	0.24	104.17
		1.46±0.15	0.48	95.83
		1.70±0.05	0.72	97.22
芒果肉干粉	0.73±0.05	0.98±0.03	0.24	104.17
		1.22±0.01	0.48	102.08
		1.44±0.02	0.72	98.61
芒果核淀粉	1.68±0.05	1.92±0.03	0.24	100.00
		2.18±0.01	0.48	104.16
		2.40±0.02	0.72	100.00
芒果核干粉	1.03±0.02	1.25±0.00	0.24	91.67
		1.55±0.01	0.48	108.33
		1.72±0.07	0.72	95.83

2.3 芒果淀粉及其残渣干粉的淀粉质量分数

芒果淀粉及提取后剩余残渣干粉的淀粉质量分数见图5。总淀粉质量分数为直链淀粉与支链淀粉质量分数之和，芒果肉淀粉、芒果肉干粉、芒果核淀粉和芒果核干粉的总淀粉质量分数分别为90.02、67.25、78.64、35.22 μg/mg，其中各支链淀粉质量分数分别为51.45、47.56、73.25、33.12 μg/mg，而直链淀粉质量分数分别为38.57、19.69、5.39、2.10 μg/mg。无论是芒果淀粉还是提取后的残渣干粉，支链淀粉质量分数均高于直链淀粉。其中芒果核中支链淀粉占总淀粉质量分数的比例高于90%，这与Kaur等[14]的研究结果类似，在5个印度芒果品种中，芒果仁淀粉的直链淀粉质量分数为9.1%~16.3%。直链淀粉在芒果肉淀粉中质量分数较高，与支链淀粉质量分数比例接近1∶1。另外，芒果核与芒果肉提取残渣中均含有一定量的淀粉，尤其是芒果肉残渣中，表明还需增加芒果淀粉的提取次数或改进芒果淀粉的提取方法以提升芒果淀粉得率。

2.4 芒果淀粉及其残渣干粉的粒径分布

淀粉颗粒的大小通常用粒径来表示，而粒径直接影响淀粉的加工性质与应用。除了芒果肉淀

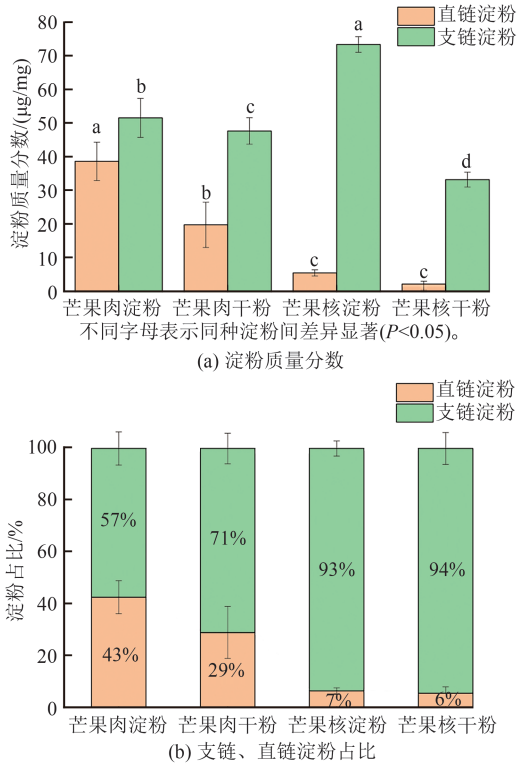


图 5 芒果淀粉及其残渣干粉中直链淀粉和支链淀粉质量分数

Fig. 5 Amylose and amylopectin mass fractions in mango starch and its dried residue powder

粉粒径呈现单一且规则的分布峰外，芒果肉干粉、芒果核淀粉及芒果核干粉的粒径均出现 2 个及以上的分布峰，见图 6。这表明从芒果肉中提取的淀粉纯度最高，其粒径主要分布在 0~20 μm。当粒径大于 20 μm 时，芒果核淀粉还存在一个粒径分布较宽的峰，可能是由于芒果核淀粉中除淀粉外还含有纤维等物质[15]。芒果干粉作为芒果淀粉提取后的残渣，除含有少量淀粉外主要是纤维类物质[16]，因此出现不止一个分布峰的情况。芒果肉干粉的 D_{90} 为 247.70 μm，芒果核干粉 D_{90} 为 697.90 μm，芒果肉淀粉 D_{90} 为 22.61 μm，芒果核淀粉 D_{90} 为 283.80 μm，见表 3。这说明从芒果肉中提取得到的淀粉颗粒最小且分布均匀，而芒果核干粉颗粒因含有纤维类物质，因此粒径最大。

2.5 颗粒形态

芒果淀粉及其残渣干粉颗粒形态见图 7。芒果淀粉颗粒形态相对较为单一，其中芒果肉淀粉颗粒形态主要呈圆形，而芒果核淀粉颗粒则主要是米粒状和椭圆形。在芒果肉干粉中，除了圆形颗粒外，还观察到一些破碎且大小不一的颗粒。而芒果核干粉颗粒形态更为多样，包括圆形、椭圆

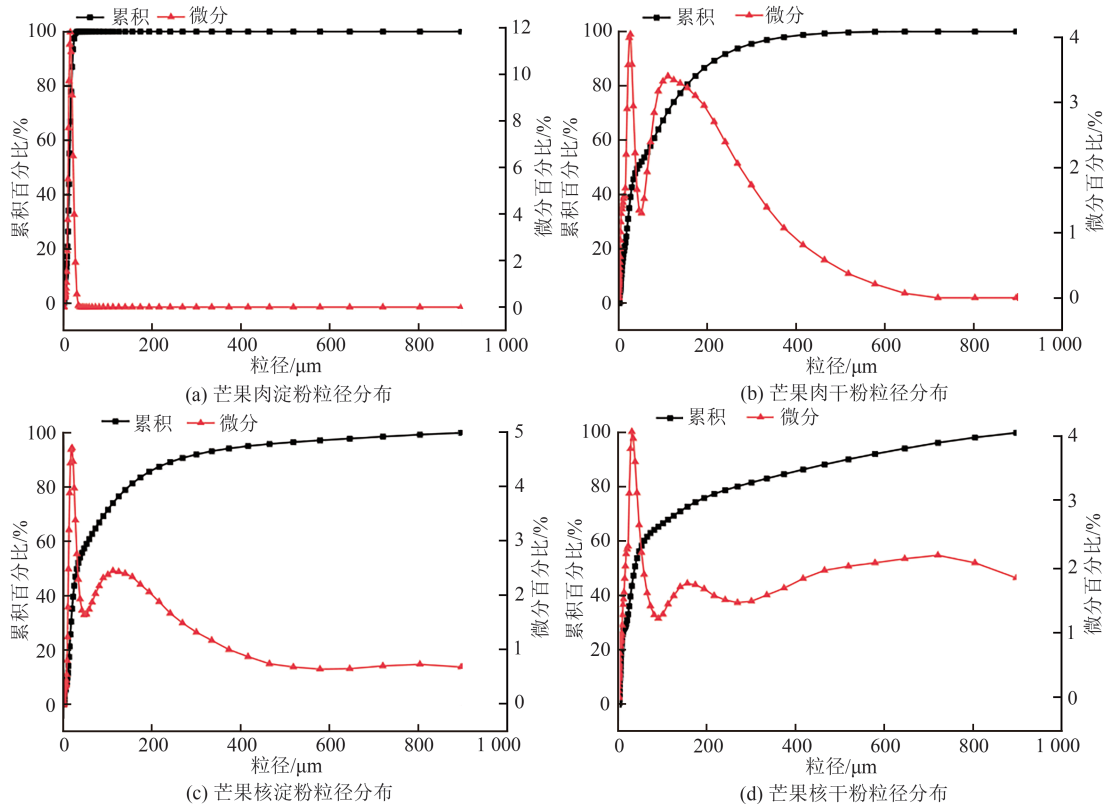


图 6 芒果淀粉及其残渣干粉粒径分布

Fig. 6 Particle size distribution of mango starch and its residue powder

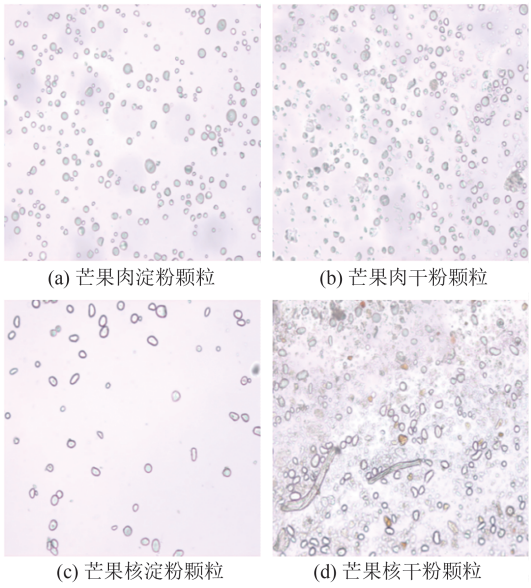
表3　芒果淀粉及其残渣干粉粒径参数

Table 3　Particle size parameters of mango starch and its dried residue powder

单位：μm

样品	D_{10}	D_{50}	D_{90}
芒果肉淀粉	4.44	14.76	22.61
芒果肉干粉	6.85	48.05	247.70
芒果核淀粉	9.98	33.58	283.80
芒果核干粉	4.81	33.63	697.90

形、米粒状以及长条状，这一结果与图6中的粒径分布结果相对应，表明芒果颗粒的形态及大小与其粒径分布有关。由于芒果淀粉成分较为单一，因此具有较均匀的颗粒形态和粒径分布，而残渣干粉中含有较多的纤维类及其他物质，导致其颗粒形态和粒径分布更加多样化。



(a) 芒果肉淀粉颗粒　(b) 芒果肉干粉颗粒

(c) 芒果核淀粉颗粒　(d) 芒果核干粉颗粒

图7　芒果淀粉及其残渣干粉颗粒形态（×400）

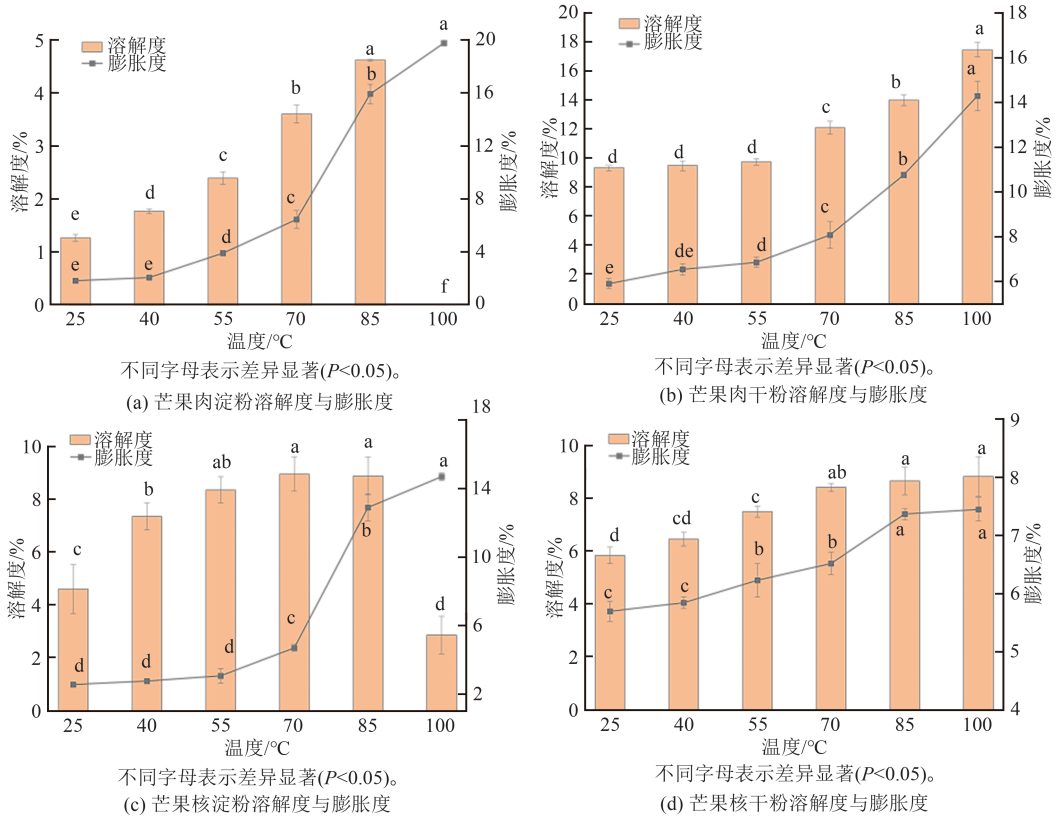
Fig. 7　Particle morphology of mango starch and its dried residue powder (×400)

2.6　芒果淀粉及其残渣干粉的溶解度和膨胀度

测定溶解度和膨胀度对于了解物质的物理性质及优化生产工艺等具有重要意义。如图8所示，在25~85 ℃时，芒果淀粉的溶解度随着温度的升高明显增大；当温度达到85 ℃时，芒果肉淀粉和芒果核淀粉的溶解度达到最大值，分别为4.65%和8.87%，但继续升温会导致溶解度骤然降低（P<0.05）。对于芒果干粉，当温度升至70 ℃时，其溶解度显著增大；70 ℃以后，随着温度的进一步升高，芒果肉干粉的溶解度持续增大（P<0.05），而芒果核干粉在70 ℃以上的溶解度则无显著变化（P>0.05），两者均在100 ℃时达到最大溶解度，分别为17.53%和8.80%。另外，芒果淀粉及其残渣干粉的膨胀度随着温度的升高呈现增大的趋势，并且在70 ℃时增速最为显著；当温度达到100 ℃时，芒果肉淀粉、芒果核淀粉、芒果肉干粉、芒果核干粉的膨胀度均达到最大值，分别为19.8%、14.6%、14.3%、7.4%。这可能是由于在加热过程中样品不断吸水膨胀，形成较为均匀的颗粒分散在水中。当达到一定温度时淀粉产生糊化现象，导致淀粉颗粒中的更多淀粉分子释放出来，随着温度的继续升高，淀粉进一步吸水膨胀直至完全糊化，最终形成致密的网络凝胶，将水分束缚在淀粉凝胶内部[17]。另外，芒果肉淀粉中直链淀粉质量分数较芒果核淀粉高，这是由于直链淀粉分子链较支链淀粉短且相对分子质量小，因此在加热过程中更容易溶出。在100 ℃时，芒果肉淀粉可能已经完全糊化，从而导致其不溶解，出现溶解度为0的现象。然而，芒果干粉除含有部分淀粉外还含有大量的纤维类物质，这些纤维在热作用下会发生热降解，但其分子结构和聚集态结构仍然相对稳定，不易发生分解和破坏。这使得纤维在高温下能够保持一定的物理和化学性能[18]，因此溶解度会随着温度的升高而增大。聂红梅等[7]在研究中也发现芒果核淀粉随着温度升高溶解度逐渐升高，在90 ℃水浴下溶解度达到了40%。

2.7　芒果淀粉及其残渣干粉的糊化度

糊化度是衡量谷物食品熟化程度的重要指标。淀粉在高温水浴处理后，其结构受到破坏，并在淀粉酶的作用下进一步水解，从而导致淀粉高度糊化[19-20]。在食品加工中，由于糊化后的淀粉能够产生良好的风味、改善口感以及提高人体消化吸收效率等优点，因此更受消费者青睐。芒果肉淀粉与芒果核淀粉的糊化度分别为59.62%和62.33%，两者之间无显著差异（P>0.05），见图9，这表明芒果淀粉具有较高的糊化度，适合用于食品行业新产品的开发。卢玉翠等[21]以青芒果淀粉为原料开发了一种新型营养饼干，这种饼干外形规则呈黄色，口感酥脆爽口，并具有淡淡的青芒果香，热量较低，具有独特的营养价值和保健功能。



不同字母表示差异显著(P<0.05)。
(a) 芒果肉淀粉溶解度与膨胀度

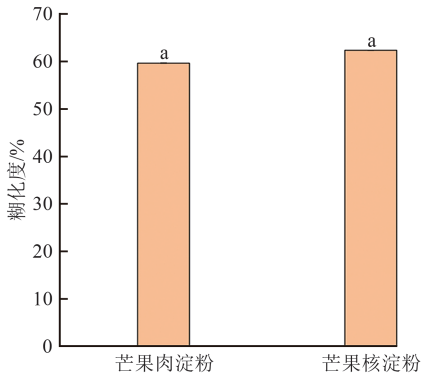
不同字母表示差异显著(P<0.05)。
(b) 芒果肉干粉溶解度与膨胀度

不同字母表示差异显著(P<0.05)。
(c) 芒果核淀粉溶解度与膨胀度

不同字母表示差异显著(P<0.05)。
(d) 芒果核干粉溶解度与膨胀度

图 8　芒果淀粉及其残渣干粉溶解度与膨胀度

Fig. 8　Solubility and swelling degree of mango starch and its dried residue powder



相同字母表示差异不显著(P>0.05)。

图 9　芒果淀粉糊化度

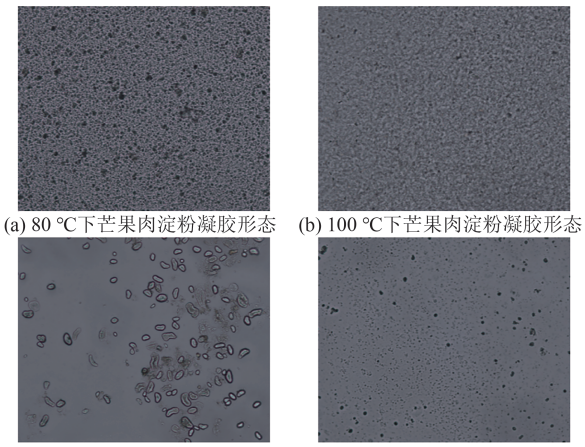
Fig. 9　Gelatinization degree of mango starch

2.8　芒果淀粉的凝胶形态

糊化后的淀粉可形成凝胶，凝胶结构对产品质构与稳定性等均有显著影响。分别对 80 ℃和 100 ℃下形成的芒果淀粉凝胶进行显微拍照，结果见图 10。在 80 ℃时，芒果肉淀粉已经完全糊化，形成蜂窝状网络结构；继续升温至 100 ℃后，芒果肉淀粉形成了更为致密、均匀的凝胶网络，且仅存在较少的孔隙。这是由于芒果肉淀粉在加热过程中会吸水膨胀，当加热到一定温度和时间后，淀粉颗粒进一步膨胀并出现破裂，促使芒果肉淀粉颗粒内的淀粉分子向各方向伸展扩散，直至溶出颗粒体外。而扩展开来的芒果肉淀粉分子之间会互相联结、缠绕，致使芒果肉淀粉颗粒从圆形状和类圆形状转变成网状含水胶体；当水浴温度在 100 ℃时，淀粉颗粒进一步吸水溶胀、崩解、挤压形成更加黏稠均匀的透明糊溶液[22]。这表明芒果肉可作为一种新资源用于开发新淀粉，该类淀粉可用于生产代餐粉、速食米面等方便食品。

如图 10 所示，芒果核淀粉在 80 ℃水浴后，大部分淀粉颗粒还保持着椭圆形和米粒状；当温度升高至 100 ℃时，芒果核淀粉颗粒进一步变成细小的圆粒状，但其依然没有达到完全糊化形成凝胶网络的状态。这可能是由于芒果核淀粉中含有高质量分数的支链淀粉，因而具有较高的热稳定性。质量分数高的支链淀粉链长增加，淀粉的糊化起始温度、糊化峰值温度和糊化最终温度均会变高[23]。此外，淀粉糊化形成凝胶还与淀粉颗粒大小、质量分数等因素有关[24]。芒果核淀粉的以上热特性可改

善因热不稳定因素导致的食品品质问题，在食品中具有很大应用潜力。



(a) 80 ℃下芒果肉淀粉凝胶形态 (b) 100 ℃下芒果肉淀粉凝胶形态

(c) 80 ℃下芒果核淀粉凝胶形态 (d) 100 ℃下芒果核淀粉凝胶形态

图 10 芒果淀粉的凝胶形态（×400）

Fig. 10 Gel morphology of mango starch (×400)

3 结论

作者旨在探索芒果及其副产物的新型加工途径与方式，以实现芒果及其副产物资源的高值化利用。以凯特芒果为原料，提取其果肉和果核中的淀粉，并将剩余残渣烘干制成干粉，比较芒果淀粉及其残渣干粉的理化性质。结果表明，提取的芒果淀粉中淀粉质量分数较高，且支链淀粉质量分数高于直链淀粉。芒果肉淀粉质量分数为90.02 μg/mg，其中支链淀粉占比57.15%，直链淀粉占比42.85%；芒果核淀粉质量分数为78.64 μg/mg，其中支链淀粉占比93.15%，直链淀粉占比6.85%。另外，芒果肉淀粉与芒果核淀粉糊化度无显著差异，但芒果肉淀粉分布均匀，颗粒形态主要为圆形，在80 ℃以后就完全糊化形成了结构致密的蜂窝网络结构；而芒果核淀粉粒径分布峰较多，主要是椭圆形或米粒状，在100 ℃也未能完全糊化。可将提取出的芒果肉淀粉用于开发速食类方便食品，芒果核淀粉用于提高食品的热稳定性，以拓展芒果在食品中的应用，为芒果在其他行业中的开发利用提供思路和参考依据。

参考文献

[1] 周应欢，石萍萍，宋玉珏，等. 百里香精油对芒果保鲜效果研究[J]. 农产品加工，2023(14)：15-18.
ZHOU Y H，SHI P P，SONG Y J，et al. Study on preservation effect of thyme essential oil on mango[J]. Farm Products Processing，2023(14)：15-18.(in Chinese)

[2] KOUA G Y，ZOUE L T，AKOA E. Mango peels and kernels from selected varieties of Côte d'ivoire are potential sources of antioxidative bioactive compounds[J]. International Journal of Biochemistry Research & Review，2021：41-50.

[3] UMAMAHESH K，GANDHI A D，REDDY O V S. Ethnopharmacological applications of mango (*Mangiferaindica* L.) peel：a review[J]. Current Pharmaceutical Biotechnology，2020，21(13)：1298-1303.

[4] KUMARASWAMY A，GURUNAGARAJAN S，PEMIAH B. Scientific evaluation of anti-obesity potential of aqueous seed kernel extract of *Mangifera indica* Linn. in high fat diet induced obese rats[J]. Obesity Medicine，2020，19：100264.

[5] 李翠翠，谢章艳，贾笑莉，等. 山药淀粉的改性及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂，2024，37(2)：6-9.
LI C C，XIE Z Y，JIA X L，et al. Research progress on modification of yam starch and its application in food industry[J]. Cereals & Oils，2024，37(2)：6-9.(in Chinese)

[6] 刘延浩，樊俊玮，王路. 天然淀粉改性技术方法与应用研究进展[J]. 卫生研究，2023，52(6)：1023-1028.
LIU Y H，FAN J W，WANG L. Research progress on modification technology and application of natural starch[J]. Journal of Hygiene Research，2023，52(6)：1023-1028.(in Chinese)

[7] 聂红梅，陈瑶琼，冯丽敏，等. 芒果核淀粉的制备及理化性质研究[J]. 食品科技，2017，42(11)：284-287.
NIE H M，CHEN Y Q，FENG L M，et al. Preparation and physical and chemical properties of mango kernel starch[J]. Food Science and Technology，2017，42(11)：284-287.(in Chinese)

[8] LAGUNES-DELGADO C，AGAMA-ACEVEDO E，PATIÑO-RODRÍGUEZ O，et al. Recovery of mango starch from unripe mango juice[J]. LWT-Food Science and Technology，2022，153：112514.

[9] 池明亮，岑莹，冯丽敏，等. 压热-酶解法制备青芒果抗性淀粉[J]. 食品工业科技，2017，38(11)：255-257，265.
CHI M L，CEN Y，FENG L M，et al. Preparation technology of green mango resistant starch by autoclaving-enzyme method[J]. Science and Technology of Food Industry，2017，38(11)：255-257，265.(in Chinese)

[10] 黄惠芳，罗燕春，田益农，等. 双波长分光光度法测定木薯块根淀粉含量的动态变化[J]. 中国粮油学报，2012，27(10)：113-117.
HUANG H F，LUO Y C，TIAN Y N，et al. Time course

of starch content in cassava root tuber determined by dual-wavelength spectrophotometry [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(10): 113-117. (in Chinese)

[11] 何洁,闫飞燕,黄芳,等. 双波长法测定薯芋类农产品中直链淀粉和支链淀粉的含量[J]. 食品工业科技,2022,43(7):303-309.
HE J, YAN F Y, HUANG F, et al. Determination of amylose and amylopectin contents in yam and taros by dual-wavelength spectrophotometry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 303-309. (in Chinese)

[12] 胡方洋,张坤生,陈金玉,等. 玉米抗性淀粉的制备及其对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品研究与开发,2021,42(7):1-6.
HU F Y, ZHANG K S, CHEN J Y, et al. Preparation of corn resistant starch and its effect on the properties of myofibrin gel [J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 1-6. (in Chinese)

[13] 熊易强. 饲料淀粉糊化度(熟化度)的测定[J]. 饲料工业,2000,21(3):30-31.
XIONG Y Q. Determination of gelatinization degree (maturation degree) of feed starch [J]. Feed Industry, 2000, 21(3): 30-31. (in Chinese)

[14] KAUR M, SINGH N, SANDHU K S, et al. Physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of starches separated from kernels of some Indian mango cultivars (*Mangifera indica* L.)[J]. Food Chemistry, 2004, 85(1): 131-140.

[15] 陈昱洁. 芒果核功能分析及部分功能成分提取工艺优化研究[D]. 海口:海南大学,2011.

[16] PATIÑO-RODRÍGUEZ O, AGAMA-ACEVEDO E, RAMOS-LOPEZ G, et al. Unripe mango kernel starch: partial characterization [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105512.

[17] 熊善柏,赵思明,冯醒桥,等. 淀粉在过量水分下糊化机理研究[J]. 粮食与油脂,2001,14(9):2-4.
XIONG S B, ZHAO S M, FENG X Q, et al. Study on the gelatinization mechanism of starch under excessive water [J]. Journal of Cereals & Oils, 2001, 14(9): 2-4. (in Chinese)

[18] 徐冬梅. 不同金属离子对纤维素纤维阻燃性与热稳定性的影响[D]. 青岛:青岛大学,2013.

[19] GU Y J, ZHANG X Y, SONG S Y, et al. Structural modification of starch and protein: from the perspective of gelatinization degree of oat flour [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260(1): 129406.

[20] 熊飞龙,曾芳,王冬梅,等. 糊化度研究进展及在高粱品控上迁移应用研究[J]. 酿酒科技,2023(10):106-110.
XIONG F L, ZENG F, WANG D M, et al. Research progress in gelatinization degree and its application in quality control of sorghum [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(10): 106-110. (in Chinese)

[21] 卢玉翠,潘可,伍秋蓉,等. 青芒果淀粉饼干的制备及其理化性质的测定[J]. 轻工科技,2023,39(2):24-27.
LU Y C, PAN K, WU Q R, et al. Preparation and determination of physicochemical properties of green mango starch biscuit [J]. Light Industry Science and Technology, 2023, 39(2): 24-27. (in Chinese)

[22] 郑玉玉,杨晔,尹登科,等. 微波对玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 食品科学,2022,43(11):99-104.
ZHENG Y Y, YANG Y, YIN D K, et al. Effect of microwave on the structure and physicochemical properties of maize starch [J]. Food Science, 2022, 43(11): 99-104. (in Chinese)

[23] 张义平,刘德阳,池承灯,等. 淀粉水热稳定性的影响因素及其调控研究进展[J]. 食品工业科技,2023,44(7):438-447.
ZHANG Y P, LIU D Y, CHI C D, et al. Progress in key factors and the modulation technology of starch hydrothermal stability [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 438-447. (in Chinese)

[24] 马春敏,高欣茹,吴巧艳,等. 预糊化淀粉的制备、性质及其在淀粉基食品中的应用[J]. 食品工业科技,2024,45(15):409-418.
MA C M, GAO X R, WU Q Y, et al. Preparation, properties and applications of pre-gelatinized starch on starch based foods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 409-418. (in Chinese)

(责任编辑:刘冬梅)