

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80621

干燥方式对台农芒果粉功能性成分及性质的影响

胡方洋^{1,2,3} 刘彩华^{1,2,3} 何玲玲^{1,2,3} 裴艳慧¹ 张得祥^{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: [目的] 探究干燥方式对芒果粉功能性质的影响。[方法] 分别采用热风干燥、真空干燥和远红外干燥制备芒果皮、芒果肉和芒果核粉, 并分析其颗粒形态、功能性成分含量和功能性质。[结果] 芒果皮与芒果核中的膳食纤维、类黄酮、总酚等功能性成分较芒果肉中的高, 为果肉中的 4 倍以上, 同一部位 3 种干燥方式间无明显差异。芒果粉具有良好的持水性 (2.43~4.24 g/g) 和持油性 (1.69~2.01 g/g), 加热后形成凝胶的持水力最高可达 7.58 g/g, 随着冻融循环次数的增加, 凝胶收缩析水反而降低。真空干燥的芒果粉加工性质相对较差, 但其抗氧化能力最强。[结论] 3 种干燥方式下, 芒果皮、芒果肉和芒果核粉中的膳食纤维、类黄酮、总酚等功能性成分含量无明显差异, 但因真空干燥为无氧状态干燥且干燥时间较长而使芒果粉具有相对较差的功能性质和更高的抗氧化活性。

关键词: 干燥方式; 芒果粉; 功能性成分; 功能性质

Effects of drying methods on functional components and properties of Tainong mango powder

HU Fangyang^{1,2,3} LIU Caihua^{1,2,3} HE Lingling^{1,2,3} PEI Yanhui¹
ZHANG Dexiang^{1,2,3} ZHU Zhengjie^{1,2,3}(1. Agriculture and Food Engineering College, Baise University, Baise, Guangxi 533000, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Biology for Mango, Baise, Guangxi 533000, China;
3. Industrial College of Subtropical Characteristic Agriculture, Baise, Guangxi 533000, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of different drying methods on the functional properties of mango powder. [Methods] Mango peel, mango sarcocarp, and mango pit powder are prepared by hot air drying, vacuum drying, and far infrared drying, and their particle morphology, content of functional components, and functional properties are determined. [Results] The content of functional components such as dietary fiber, flavonoids, and total phenols in mango peel and mango pit are higher than that in mango sarcocarp, which is more than 4 times higher than that in mango sarcocarp. There is no significant difference among the three drying methods for the same part. Mango powder has good water holding capacity (2.43~4.24 g/g) and oil holding capacity (1.69~2.01 g/g). The maximum water holding capacity of gel formed by heating can reach 7.58 g/g, and the water separation of gel shrinkage decreases with the increase in freeze-thaw cycles. The processing properties of vacuum-dried mango powder are relatively poor, but its antioxidant capacity is the strongest. [Conclusion] The content of dietary fiber, flavonoids, total phenols, and other functional components in mango peel, mango sarcocarp, and mango pit powder is not significantly different under the three drying methods. However, since vacuum drying is anaerobic and has a long drying time, the mango powder has relatively poor functional properties and higher antioxidant activities.

Keywords: drying methods; mango powder; functional components; functional properties

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(编号: 2024KY0756, 2023KY0764); 广西一流学科建设项目资助(编号: 桂教科研[2022]1号)

通信作者: 朱正杰(1983—), 男, 百色学院教授, 博士。E-mail: zhuzhjie@163.com

收稿日期: 2024-07-03 改回日期: 2025-01-22

引用格式: 胡方洋, 刘彩华, 何玲玲, 等. 干燥方式对台农芒果粉功能性成分及性质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 187-196.

Citation: HU Fangyang, LIU Caihua, HE Lingling, et al. Effects of drying methods on functional components and properties of Tainong mango powder[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 187-196.

芒果是重要的热带经济作物之一,兼具营养与保健功效。因芒果季节性强、鲜果货架期短、易发生冷害等特点,除鲜食外其深加工行业日益发展。而在鲜食与加工过程中会产生 35%~60% 的芒果废弃物,主要为芒果皮和芒果核^[1-2]。芒果皮与芒果核中含有多酚、黄酮、多糖等多种生物活性物质,具有祛痰止咳、益脾、抗氧化等功效^[3-4]。

干燥是果蔬的关键加工形式之一,可有效降低果蔬水分含量和酶活,便于贮藏运输的同时延长果蔬货架期^[5-6]。为扩大芒果及其废弃物芒果皮与芒果核的应用范围与利用率,对其进行干燥制备芒果粉是一种操作方便、成本低廉且高效的方法。目前有关芒果皮和芒果核的利用研究较少。

芒果加工过程中的干燥方式较多,不同干燥方式具有不同的干燥特性。赖必辉^[7]研究发现,干燥方式对芒果的质构特性、营养成分、微观结构有一定的影响。经不同干燥方式得到的芒果脆片香气成分的种类及含量均有所增加^[8]。其中热风干燥(HAD)因其操作方便、投入成本低而常被用于果蔬规模化加工,通过物料直接与热空气接触而达到干燥的目的,但HAD的时间长易导致产品品质与营养受损^[9-10]。真空干燥(VD)是通过在密闭的干燥室中降低压力使水分在较低的温度下实现快速蒸发,且真空环境中氧气密度较低,故VD可减少热敏性与易氧化成分的降解^[11]。远红外干燥(FID)主要是以辐射的形式作用于果蔬,能较好地保留果蔬原有的营养物质与结构^[12-13]。远红外具有穿透性,物料内部分子获得远红外散发的能量后产生剧烈震动升温使水分汽化,可均匀地去除水分。而有关不同干燥方式制备芒果粉并对其生物活性成分与加工性质影响的研究尚未见报道。此外,芒果加工废弃物芒果皮与芒果核经干燥处理后是否具有可利用价值以用于新产品开发的可行性尚不清晰。

研究拟以台农芒果为原料,利用HAD、VD、FID对芒果果皮、果肉和果核进行干燥制得芒果粉,比较芒果粉中膳食纤维、总酚、总黄酮等功能性物质含量与性质,挖掘芒果加工废弃物在食品及其他行业中的使用价值和加工可行性,以提升芒果加工废弃物的经济价值,助力地方芒果经济发展。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

台农芒果:八成熟,市售;

95%乙醇、丙酮、乙酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

糖化酶、蛋白酶、淀粉酶:合肥博美生物科技有限公司;

植物总酚含量试剂盒、类黄酮测定试剂盒、总抗氧化

能力(T-AOC)测定试剂盒:南京建成生物工程研究所。

1.1.2 主要仪器设备

电热鼓风干燥箱:101-3AB型,天津市泰斯特仪器有限公司;

真空干燥箱:DZF-6050型,上海一恒科学仪器有限公司;

远红外快速干燥箱:HYHG-II-72型,上海跃进医疗器械有限公司;

高效多功能粉碎机:ZT-1000A型,永康市展帆工贸有限公司;

快速水分测定仪:HX204型,梅特勒-托利多集团;

色差分析仪:NR200型,深圳市三恩驰科技有限公司;

扫描电镜:EVO10型,卡尔蔡司光学(中国)有限公司;

激光粒度分析仪:BT-9300SE型,丹东百特仪器有限公司;

酶标仪:LC-WB-8+30型,上海尚普仪器设备有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-8型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

高速离心机:H1850R型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

循环水真空泵:SHZ-III型,毕恩思上海科学仪器有限公司;

高效多功能粉碎机:ZT-1000A型,永康市展帆工贸有限公司;

电子分析天平:JA1003型,上海精密仪器仪表有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 芒果粉的制备 选取无明显腐烂损坏的新鲜台农芒果,分离皮、肉、核。将芒果皮分别置于热风干燥箱、真空干燥箱和远红外干燥箱中,干燥至恒重,粉碎,过80目筛后即得芒果皮粉,利用快速水分测定仪于120℃测定芒果粉中的水分含量。其中,HAD参数:温度70℃,风速2.1 m/s;VD参数:温度70℃,真空度 ≤ -0.09 MPa;FID参数:辐射距离15 cm,温度70℃,空气流速1.5 m/s。按此法继续制备芒果肉粉和芒果核粉,密封袋保存备用。

不同干燥方式下的芒果粉干燥时间及干燥后样品含水率见表1。

1.2.2 芒果粉颗粒形态

(1) 色泽:利用色差仪测定芒果粉 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 和 H' 值,平行3次。

(2) 颗粒形状:采用扫描电镜(SEM)观察颗粒形态。

(3) 粒径:取适量芒果粉于激光粒度仪中,以蒸馏水为分散相,分散剂折射率为1.333,芒果粉颗粒折射率和吸收率分别为1.53和0.1,500 r/min下测定芒果粉粒径,平行3次。

1.2.3 膳食纤维含量 参照GB 5009.88—2014。

1.2.4 类黄酮含量 采用植物类黄酮试剂盒测定。

表1 不同干燥方式下的芒果粉干燥时间与干燥后样品含水率

干燥方式	干燥时间/h			含水率/%		
	芒果皮	芒果肉	芒果核	芒果皮	芒果肉	芒果核
HAD	15.00	22.00	26.00	4.37±0.43 ^c	4.92±0.83 ^c	5.73±0.20 ^a
VD	27.50	50.50	28.00	5.81±0.02 ^b	12.12±0.59 ^a	5.58±0.62 ^a
FID	24.00	28.00	18.00	6.27±0.99 ^a	7.33±1.22 ^b	5.17±0.12 ^a

1.2.5 总酚含量 采用总酚试剂盒测定。

1.2.6 总类胡萝卜素含量 参照罗丰雷^[14]的方法,根据式(1)~式(3)计算芒果粉中总类胡萝卜素含量。

$$C_a = 9.73 \times A_{663\text{nm}} - 0.99 \times A_{645\text{nm}}, \quad (1)$$

$$C_b = 21.4 \times A_{645\text{nm}} - 4.65 \times A_{663\text{nm}}, \quad (2)$$

$$C_{\text{总类胡萝卜素}} = 4.69 \times A_{440\text{nm}} - (C_a + C_b) \times 0.268, \quad (3)$$

式中:

$C_{\text{总类胡萝卜素}}$ ——总类胡萝卜素含量, $\mu\text{g/mL}$;

C_a ——叶绿素 a 质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

C_b ——叶绿素 b 质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

$A_{440\text{nm}}$ ——提取液在 440 nm 处吸光值;

$A_{645\text{nm}}$ ——提取液在 645 nm 处吸光值;

$A_{663\text{nm}}$ ——提取液在 663 nm 处吸光值。

1.2.7 持水性与持油性 取 0.5 g 芒果粉于 10 mL 离心管中,分别加入 5 mL 蒸馏水或植物油,加水样,室温放置 1 h、加油样,37 °C 水浴 1 h,3 000 r/min 离心 20 min,弃上清液,称重。分别按式(4)、式(5)计算芒果粉的持水性和持油性。

$$C_{\text{WH}} = \frac{m_{2\text{水}} - m_1 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (4)$$

$$C_{\text{OH}} = \frac{m_{2\text{油}} - m_1 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

C_{WH} ——持水性, %;

C_{OH} ——持油性, %;

m_0 ——芒果粉质量, g;

m_1 ——离心管质量, g;

$m_{2\text{水}}$ 、 $m_{2\text{油}}$ ——离心后去除上层水、油后的芒果粉与离心管的质量, g。

1.2.8 溶解度与膨胀度 参照文献[15]。按式(5)、式(6)计算芒果粉的溶解度和膨胀度。

$$S = \frac{A}{W} \times 100\%, \quad (6)$$

$$P = \frac{D}{W(100 - S)} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

S ——溶解度, %;

P ——膨胀度, %;

A ——上清液蒸干后的质量, g;

W ——样品质量, g;

D ——离心后沉淀的质量, g。

1.2.9 凝胶持水性 配制质量浓度为 10% 的芒果粉乳液,沸水浴 30 min 后冷却。3 000 r/min 离心 15 min,弃去上清液,沉淀物称重。按式(8)计算芒果粉凝胶的持水性。

$$C_{\text{凝胶}} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\%, \quad (8)$$

式中:

$C_{\text{凝胶}}$ ——凝胶持水性, %;

m_0 ——离心管质量, g;

m_1 ——离心前离心管和芒果粉凝胶总质量, g;

m_2 ——离心后离心管和芒果粉凝胶总质量, g。

1.2.10 冻融稳定性 参照文献[16],按式(9)计算芒果粉凝胶析水率。

$$S_R = \frac{m_G - m_D}{m_G} \times 100\%, \quad (9)$$

式中:

S_R ——芒果粉凝胶析水率, %;

m_G ——离心前凝胶质量, g;

m_D ——离心后沉淀物质量, g。

1.2.11 总抗氧化能力 采用总抗氧化能力(T-AOC)试剂盒测定。

1.3 试验数据处理

利用 Excel 2019 软件对试验数据进行统计分析,采用 IBM SPSS Statistics 27.0 进行方差分析(Tukey 检验, $P < 0.05$),Origin 2019b 软件制图。

2 结果与分析

2.1 芒果粉颗粒形态

2.1.1 色泽 由图 1 可知,台农芒果皮、芒果肉和芒果核粉颜色不同。

由表 2 可知,芒果粉的 L^* 值为 60.06~74.90, a^* 、 b^* 值分别为 6.80~16.47, 28.24~40.01, 均为正值,表明芒果粉整体亮度较高,偏向红黄色, b^* 值较大使黄色更为明显。芒果粉的 C^* 值大小为芒果肉 > 芒果皮 > 芒果核, HAD、VD 与 FID 对芒果肉颜色的影响一致,而芒果皮与芒果核在不同干燥方式下色彩存在差异。芒果粉的 H^* 为 70° 左右,表明

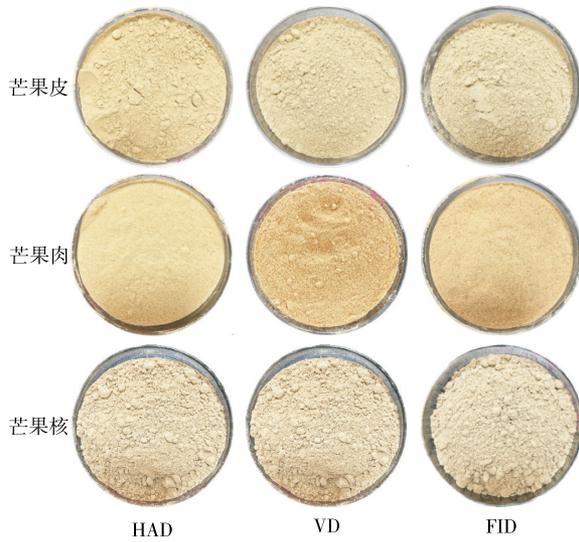


图 1 不同干燥方式下的芒果粉

Figure 1 Mango powder dried by different methods

芒果粉接近黄色,与 a^* 、 b^* 值结果一致。芒果皮与芒果核中 L^* 、 H^* 整体较大无明显差异,芒果肉中 VD 的 L^* 、 H^* 明显最小 ($P < 0.05$),与图 1 的偏向褐色现象一致。这可能与 VD 较 HAD 和 FID 需要更长的干燥时间有关。长时间的高温干燥促使芒果粉发生如美拉德反应等非酶促褐变而导致 VD 下的芒果粉颜色偏向褐色^[20]。总体而言,芒果粉在 HAD 干燥下的色泽较好,VD 下的较差。

2.1.2 颗粒形态 由图 2 可知,芒果不同组织部位的颗粒形态不同。芒果皮粉为大小不一的不规则皱褶形状,芒果肉粉则是由许多圆形小颗粒黏结成的团状形态。芒果肉粉中的圆形小颗粒可能是芒果淀粉或多糖分子颗粒^[21],贮藏过程中糖类分子可能黏结成团状形态。这与红枣粉中果糖引起的“黏结”现象类似^[22]。芒果核粉中除有圆形和不规则颗粒外,还存在许多棒状形态物质。这可能与芒果核中含有 39% 纤维类物质^[23]以及 30%~75% 的芒果淀粉^[3]有关。

表 2 干燥方式对芒果粉色泽的影响[†]

Table 2 Effect of drying methods on color of mango powder

部位	干燥方式	L^*	a^*	b^*	C^*	$H^*/(^\circ)$
芒果皮	HAD	71.39±0.18	8.75±0.39 ^a	32.29±0.64 ^a	33.45±0.15 ^a	74.84±0.49 ^b
	VD	67.84±1.88	7.13±0.15 ^b	29.15±0.14 ^b	30.01±0.45 ^c	76.25±0.37 ^{ab}
	FID	71.26±3.81	6.80±0.74 ^b	31.46±0.22 ^a	32.20±0.00 ^b	77.82±1.46 ^a
芒果肉	HAD	74.90±1.05 ^a	11.43±0.31 ^b	40.01±0.71	41.61±0.61	74.06±0.52 ^a
	VD	60.06±1.04 ^c	16.47±0.26 ^a	39.76±0.43	43.04±0.60	67.51±0.17 ^b
	FID	64.59±0.14 ^b	15.87±0.35 ^a	38.96±0.39	42.07±0.00	67.84±0.31 ^b
芒果核	HAD	65.45±0.98	9.08±0.00 ^b	28.24±0.14 ^b	29.66±0.40 ^c	72.14±0.15 ^a
	VD	66.60±0.97	10.66±0.32 ^a	29.41±0.25 ^a	31.28±0.31 ^a	70.08±0.51 ^b
	FID	64.10±1.00	9.53±0.09 ^b	29.03±0.23 ^a	30.55±0.00 ^b	71.82±0.07 ^a

[†] L^* 值表示亮度(0~100), L^* 值越大,颜色越鲜亮; a^* 、 b^* 值分别表示红绿偏向和黄蓝偏向(-100~100)^[17]; C^* 为色彩度,包含了 a^* 、 b^* 分量的贡献, C^* 值越高表明色彩饱和程度越高,颜色越集中; H^* 为色调角,为颜色的基本特色,反应光波频率的变化, H^* 为 0° (360 $^\circ$) 表示红色, 90° 表示黄色, 180° 表示绿色, 270° 表示蓝色^[18-19]; 小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.1.3 粒径 颗粒大小可通过影响溶解度、口感等而影响产品品质。由表 3 可知,芒果肉粉的粒径最大,其 D_{90} 约为芒果皮和芒果核粉的 2~3 倍,这可能与芒果肉中含有多糖类物质有关。经 HAD、VD 和 FID 处理后的芒果粉粒径存在差异。芒果皮颗粒大小为 HAD<VD<FID,与其含水率结果一致。相同物料在粉碎时由于含水率较少而导致质地较硬,粉碎时更易被冲击粉碎获得较小粒径^[24]。此外,FID 粒径大可能是由于远红外对芒果皮结构破坏严重,使其在干燥过程中细胞结构收缩大形成紧密结构而不易于粉碎^[13]。真空干燥因压力较低而形成疏松多孔结构,能粉碎成较小的颗粒^[25]。Monteiro 等^[26]研究发现,热风干燥可引起内部应力使结构塌陷,可能导致了芒果皮

粉粒径较小。

2.2 芒果粉的功能性成分含量

2.2.1 膳食纤维含量 膳食纤维被称为“第七大营养素”,具有降糖、降脂、预防结肠癌等重要生理功能。根据溶解度的不同可将其分为可溶性膳食纤维(SDF)和不溶性膳食纤维(IDF)。由图 3 可知,芒果皮、肉、核中总膳食纤维含量分别为 41.49~43.72, 11.78~12.33, 47.33~51.60 g/100 g,呈现芒果核>芒果皮>芒果肉的结果。在芒果粉膳食纤维中, IDF 含量占比较大,其中芒果皮中 IDF 占比 70% 以上,芒果肉粉中占比 60% 以上,芒果核粉中占比 90% 以上,最高达到了 95.40%。整体而言, HAD、VD、FID 得到的芒果粉中含有的可溶性膳食纤维与不溶

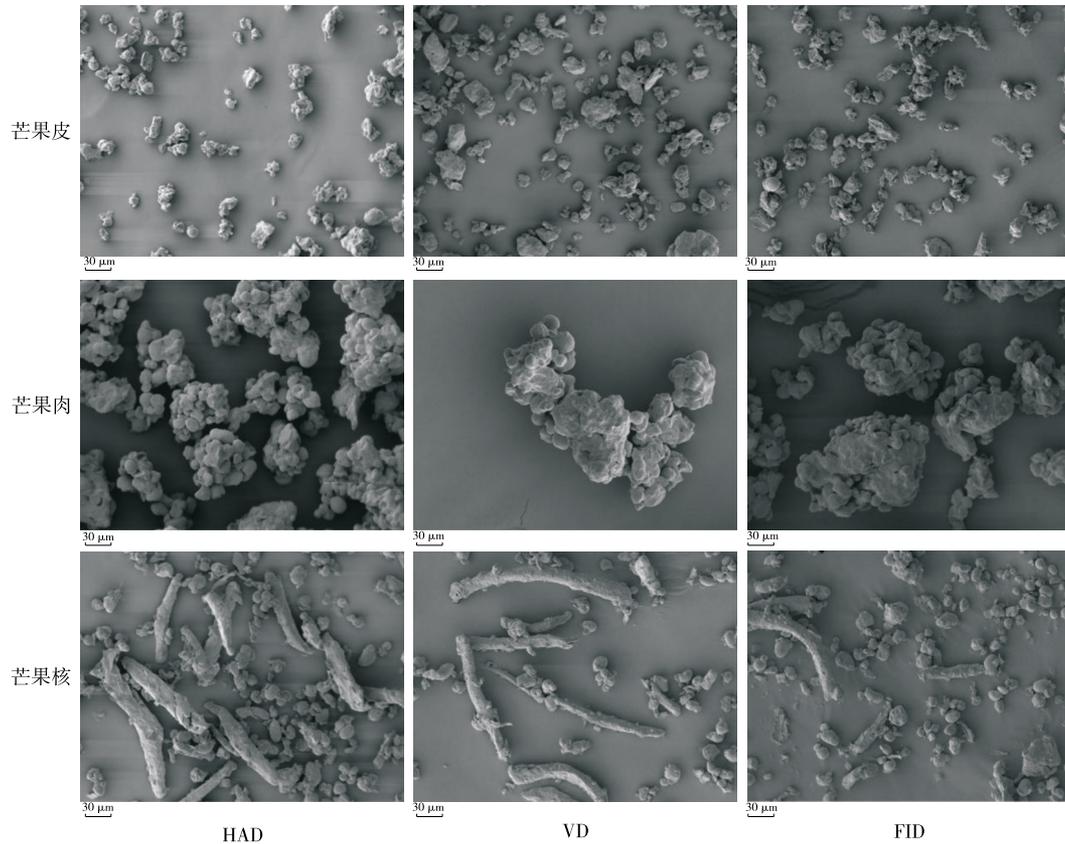


图2 芒果粉的SEM形状图

Figure 2 SEM images of mango powder (×300)

表3 干燥方式对芒果粉粒径的影响[†]

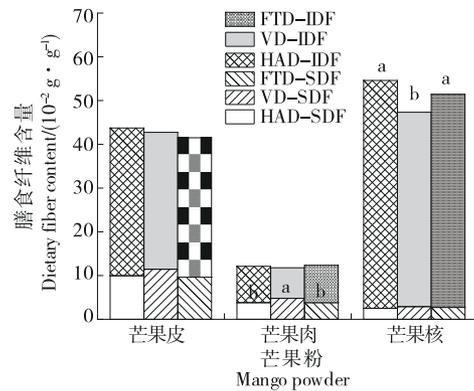
Table 3 Effect of drying methods on particle size of mango powder

组织部位	干燥方式	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
芒果皮	HAD	4.43±0.03 ^c	32.45±1.45 ^c	216.87±9.15 ^c
	VD	5.27±0.09 ^b	55.92±3.25 ^b	323.37±37.81 ^b
	FID	7.99±0.02 ^a	112.73±0.97 ^a	507.10±21.58 ^a
芒果肉	HAD	9.78±0.18 ^{ab}	158.03±6.64 ^a	636.63±20.06
	VD	9.37±0.14 ^b	104.04±0.71 ^b	626.93±31.41
	FID	10.03±0.22 ^a	179.10±11.41 ^a	654.23±24.28
芒果核	HAD	5.36±0.10 ^a	36.76±1.09 ^a	366.03±13.38 ^a
	VD	4.08±0.18 ^b	22.16±1.66 ^b	211.60±37.27 ^b
	FID	4.32±0.15 ^b	23.02±1.24 ^b	199.47±23.95 ^b

[†] 小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著 (P<0.05)。

性膳食纤维含量无明显差异。

2.2.2 类黄酮含量 由图4可知,芒果皮中类黄酮含量最高可达7.95 mg/g,为芒果核中的2倍左右;芒果肉中最高为0.41 mg/g,仅为芒果皮中的5%左右。但对于同一部位



小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著 (P<0.05)

图3 干燥方式对芒果粉膳食纤维含量的影响

Figure 3 Effect of drying methods on dietary fiber content of mango powder

来说,HAD、VD、FID 3种干燥方式间的类黄酮含量差异不明显。类黄酮易受温度、时间、氧气等因素影响^[27],而HAD、VD、FID的干燥温度均为70℃。VD为无氧状态,酚类物质损失理应较小^[28],但VD耗时较HAD和FID长,使酚类物质分解,最终类黄酮含量与HAD和FID的无显著差异,与王国锭等^[29]的结论一致。

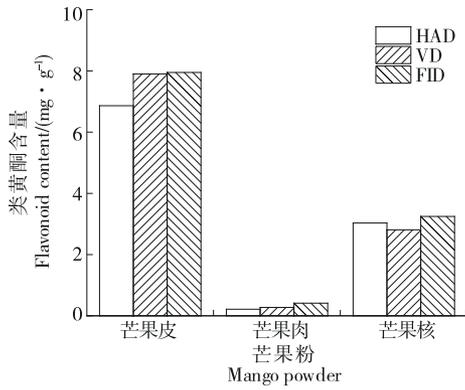


图 4 干燥方式对芒果粉类黄酮含量的影响

Figure 4 Effect of drying methods on flavonoid content of mango powder

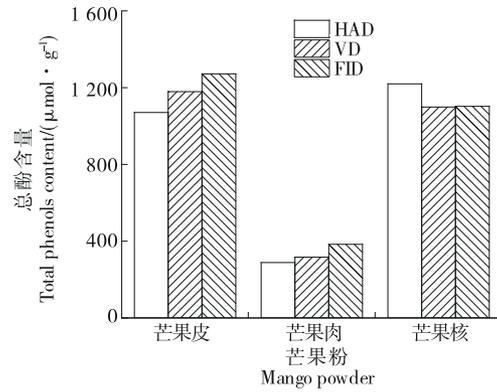


图 5 干燥方式对芒果粉总酚含量的影响

Figure 5 Effect of drying methods on total phenol content of mango powder

2.2.3 总酚含量 由图 5 可知,芒果皮与芒果核中的总酚含量相当,为 1 200.00 $\mu\text{mol/g}$ 左右;芒果肉中总酚含量为 288.56~383.62 $\mu\text{mol/g}$ 。芒果皮与芒果核中的总酚含量为芒果肉中的 3 倍以上。HAD、VD 和 FID 下得到的芒果皮、芒果肉和芒果核粉的总酚含量无明显差异,与类黄酮含量结果相同。

2.2.4 总类胡萝卜素含量 由表 4 可知,芒果皮粉的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量远高于芒果肉粉,可能与芒果皮和芒果肉中所含成分有关,未成熟的芒果皮呈绿色,其叶绿素

含量较高;而芒果肉中主要为淀粉、糖类物质和少量纤维等。芒果皮中总类胡萝卜素含量为 11.73~28.02 $\mu\text{g/mL}$,芒果肉的为 24.11~32.69 $\mu\text{g/mL}$,芒果核中未检出总类胡萝卜素。芒果肉中的总类胡萝卜素含量高于芒果皮,VD 的总类胡萝卜素含量明显低于 HAD 和 FID。这可能与干燥过程中类胡萝卜素的热敏效应有关^[30]。芒果皮与芒果肉中,VD 时间分别为 27.5, 50.5 h, HAD 和 FID 的干燥时间均短于 VD,较短的干燥时间可减少类胡萝卜素的降解。这与李丹彤^[17]的结果类似。

表 4 干燥方式对芒果总类胡萝卜素含量的影响[†]

Table 4 Effect of drying methods on total carotenoid content of mango

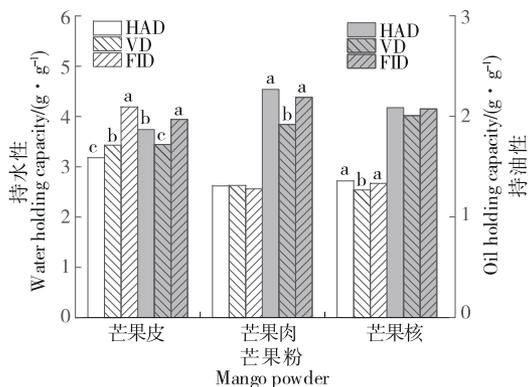
组织部位	干燥方式	叶绿素 A/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	叶绿素 B/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	总类胡萝卜素/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$
芒果皮	HAD	26.73 \pm 0.17 ^c	15.82 \pm 0.77 ^c	28.02 \pm 0.32 ^a
	VD	98.93 \pm 16.84 ^a	145.95 \pm 32.06 ^a	11.73 \pm 5.14 ^b
	FID	70.48 \pm 1.02 ^b	89.09 \pm 1.46 ^b	27.62 \pm 0.36 ^a
芒果肉	HAD	2.33 \pm 0.52 ^b	1.68 \pm 0.58 ^c	32.69 \pm 0.37 ^a
	VD	3.36 \pm 0.37 ^a	6.90 \pm 0.64 ^a	24.11 \pm 0.18 ^c
	FID	2.40 \pm 0.17 ^{ab}	3.04 \pm 0.28 ^b	31.09 \pm 0.32 ^b

[†] 小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 芒果粉的功能性质

2.3.1 持水性与持油性 由图 6 可知, HAD、VD 和 FID 下芒果皮粉的持水性分别为 3.18, 3.43, 4.19 g/g, 与粒径结果一致。芒果肉粉的持水性约为 2.60 g/g, 3 种干燥方式间无明显差异。这可能是因为 3 种干燥方式下的芒果肉粉黏结成团, 减少了与水分的接触面积, 导致持水性比芒果皮的低。芒果核中 VD 干燥的持水性相对最小, 为 2.54 g/g。VD 下芒果粉的持油性相对最低($P < 0.05$), 为 2.00 g/g 左右。这可能是 VD 干燥下的芒果粉颗粒结构较为疏松^[25], 对油分的束缚能力较弱, 离心力作用下颗粒内部吸附的油分被甩出使持油性降低。

2.3.2 溶解度与膨胀度 由图 7 可知, 芒果皮、芒果肉和芒果核粉的溶解度随着温度的升高而降低; 芒果皮粉的膨胀度随着温度的升高变化不大, 芒果肉粉和芒果核粉的膨胀度随着温度的升高先降低后增大。芒果皮与芒果核粉中含有 40% 以上的 DF, 且主要以 IDF 为主(70% 以上), 随着温度的升高, IDF 吸水膨胀, 溶解度降低。而芒果肉中 SDF 含量相对较高, 且芒果肉粉颗粒由许多小颗粒聚结而成, 可溶部分在水相中溶解致使大颗粒解散成原本的小颗粒, 进一步增大了芒果肉粉的溶解度。芒果肉与芒果核粉的溶解度在 70 $^{\circ}\text{C}$ 后增加, 可能是因为其含有淀粉, 70 $^{\circ}\text{C}$ 淀粉颗粒充分吸水崩解使淀粉糊化, 黏度增



小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著($P < 0.05$)

图6 干燥方式对芒果粉持水持油性的影响

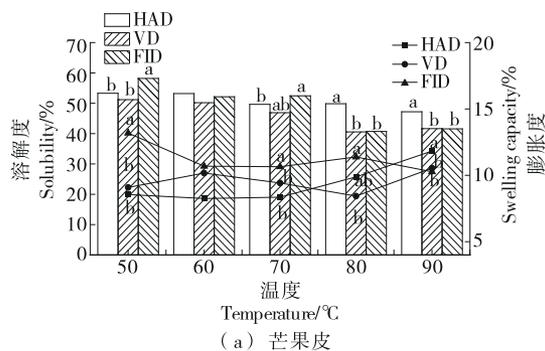
Figure 6 Effect of drying methods on WHC and OHC of mango powder

加,膨胀度增大。

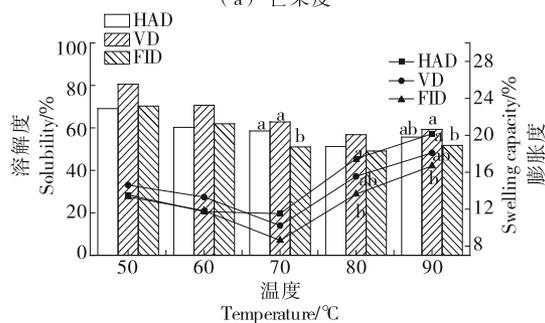
2.3.3 凝胶持水性 由图8可知,芒果粉凝胶具有较好的凝胶持水性。HAD、VD与FID下的芒果皮粉的凝胶持水性分别为4.23,3.98,4.21 g/g;芒果肉粉的凝胶持水性分别为6.92,4.68,6.17 g/g;芒果核粉的凝胶持水性分别为4.55,4.17,5.18 g/g。VD下的芒果粉凝胶持水性相对最低,与加热前持水性和持油性结果类似。这可能与VD下的芒果粉颗粒结构较为疏松,在热力作用下其组织结构较易受破坏导致形成的凝胶结构松散有关。此外,IDF能暴露出更多的亲水基团^[31],而VD下的IDF含量相对最低,与HAD和FID相比,其与水接触位点减少,加热形成凝胶的持水力相对较低。

2.3.4 冻融稳定性 由图9可知,随着冻融循环次数的增加,芒果粉凝胶的析水率降低。在芒果皮粉中,VD的析水率最小,其次是FID和HAD,而在芒果肉和芒果核中刚好相反。随着冻融循环次数的增加,芒果凝胶的析水率降低,可能与芒果粉中含有较多的膳食纤维尤其是IDF有关。纤维可使凝胶网络结构加强,形成类似海绵状的“水笼”结构将水分锁在凝胶结构内部^[32]。此外,芒果粉经冻融循环后凝胶内部冰晶增大,破坏了原有结构^[33],在解冻过程中纤维吸附由大冰晶转变成的水分胀大,形成新的紧密结构将水分束缚在纤维“水笼”中。不同干燥方式下凝胶的析水率有差异,可能与其颗粒结构有关。表明芒果粉具有较好的冻融稳定性,可将其用于冷食产品的开发。

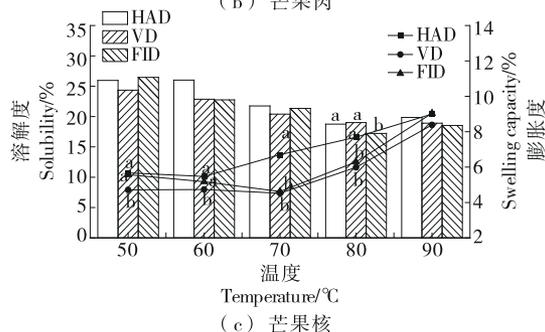
2.3.5 抗氧化活性 由图10可知,芒果皮与芒果核的总抗氧化能力较芒果肉的高,与类黄酮、总酚、总类胡萝卜素含量结果一致。其中,芒果皮与芒果核的抗氧化能力在VD下达到最高值;芒果肉粉的总抗氧化能力为692.11~819.55 U/mL,3种干燥方式间无明显差异。



(a) 芒果皮



(b) 芒果肉

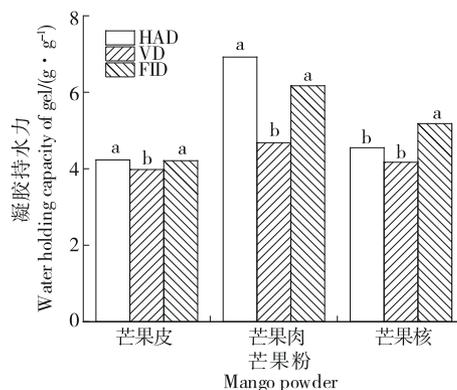


(c) 芒果核

小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著($P < 0.05$)

图7 干燥方式对芒果粉膨胀度和溶解度的影响

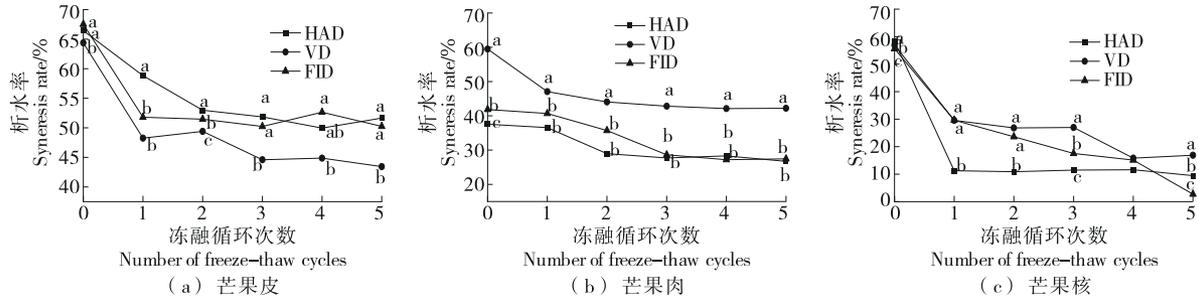
Figure 7 Effect of drying methods on swelling and solubility of mango powder



小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著($P < 0.05$)

图8 干燥方式对芒果粉凝胶持水性的影响

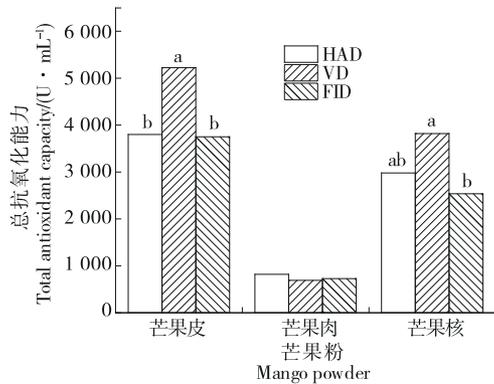
Figure 8 Effect of drying methods on water holding capacity of mango powder gel



小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著 ($P < 0.05$)

图 9 干燥方式对芒果粉凝胶析水率的影响

Figure 9 Effect of drying methods on water separation rate of mango powder gel



小写字母不同表示同一部位不同干燥方式间差异显著 ($P < 0.05$)

图 10 干燥方式对芒果粉总抗氧化能力的影响

Figure 10 Effect of drying methods on total antioxidant capacity of mango powder

2.4 相关性分析

由图 12 可知,芒果皮与芒果核具有相似特征或表达模式,可将其归为一类,而芒果肉为另一类。在芒果不同

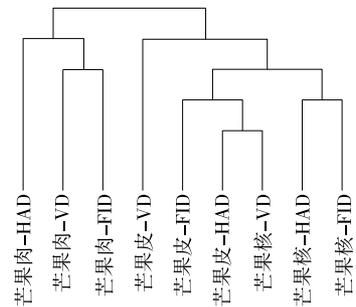


图 11 各参数之间的分层聚类分析

Figure 11 Hierarchical cluster analysis between measured parameters

组织部位中,不同干燥方式下的芒果粉活性物质和功能性性质有差异。芒果肉中HAD与VD、FID间有差异,芒果皮、核中VD与HAD、FID间有差异。表明不同干燥方式对芒果不同组织部位的影响不同,在芒果粉的应用研究过程中,应针对不同的组织部位采用适宜的干燥方式进行处理。

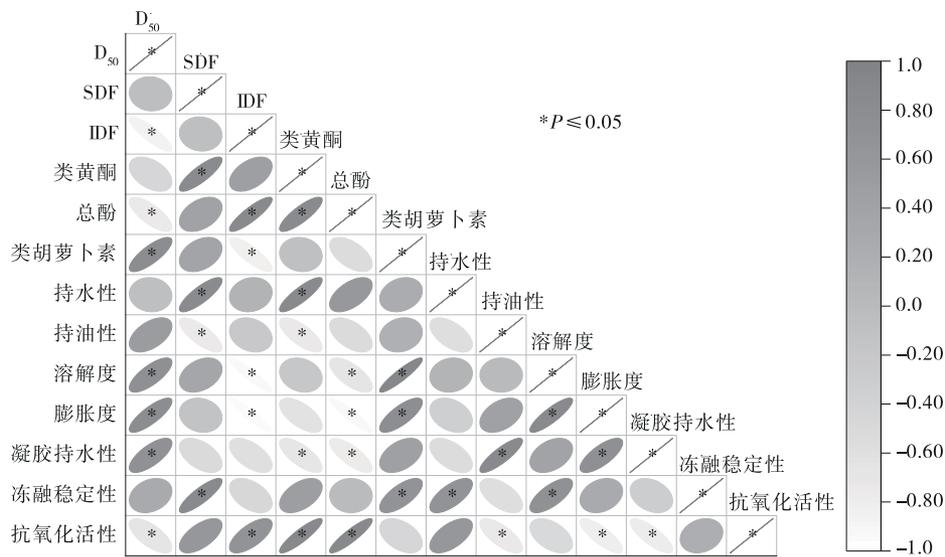


图 12 芒果皮与芒果核测定参数之间的相关性热图分析

Figure 12 Heat map analysis of correlation between mango peel and mango pit parameters

膳食纤维含量显著影响芒果皮与芒果核粉的功能性质。SDF与IDF对芒果粉的功能性质影响相反:SDF含量越高,芒果粉的持水性、溶解度与膨胀度越高,形成的凝胶冻融稳定性越好;IDF含量越高则其持油性越好,亲水基团减少致使芒果粉持水性降低、溶解度下降,加热后可能未完全形成凝胶,经冻融循环后不能很好地将水分束缚在内部。在水果中,有4%~57%的酚类物质以结合多酚的形式存在^[34],而结合多酚是膳食纤维的重要组成部分,占植物性膳食纤维中的1.4%~50.7%^[35]。结合态的类黄酮在水中具有较好的溶解性,故SDF与类黄酮呈显著正相关,类黄酮含量与功能性质间的关系与SDF一致。此外,类胡萝卜素也与SDF和类黄酮呈显著正相关,其对芒果皮与芒果核粉的功能性质的影响与SDF和类黄酮的类似。故在芒果副产物资源利用中,可通过提取芒果皮、核中的SDF开发具有特定功能的健康产品,实现芒果副产物的高值化利用。

3 结论

台农芒果经热风干燥、真空干燥、远红外干燥后得到的芒果粉为明亮的红黄色,真空干燥因干燥时间较长颜色相对偏褐色。芒果皮、核具有较高的开发价值,其中的膳食纤维、类黄酮、总酚、类胡萝卜素含量为果肉中的4倍以上。热风干燥、真空干燥、远红外干燥对同一部位的功能性成分含量无明显影响,但不同组织部位受干燥方式影响,可将芒果皮、核归为一类,芒果肉为一类。在芒果皮与芒果核中,真空干燥的功能性质较其他两种干燥方式的差,但其功能性质主要受膳食纤维含量的影响,可溶性膳食纤维与不溶性膳食纤维的影响趋势相反。后续可根据需求提取芒果皮、核中的可溶性膳食纤维与不溶性膳食纤维应用至实际加工中,开发具有特定功能的新产品。

参考文献

- [1] ZHANG P Y, WHISTLER R L, BEMILLER J N, et al. Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility: a review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 59(4): 443-458.
- [2] 李科, 刘小雨, 张惟广. 基于芒果籽成分的利用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(11): 325-332.
LI K, LIU X Y, ZHANG W G. Progress in research of mango kernel utilization[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(11): 325-332.
- [3] MWAURAH P W, KUMAR S, KUMAR N, et al. Physicochemical characteristics, bioactive compounds and industrial applications of mango kernel and its products: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(5): 2 421-2 446.
- [4] YAP J Y, HII C L, ONG S P, et al. Effects of drying on total polyphenols content and antioxidant properties of *Carica papaya* leaves[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(7): 2 932-2 937.
- [5] OLIVER-SIMANCAS R, DÍAZ-MAROTO M C, PÉREZ-COELLO M S, et al. Viability of pre-treatment drying methods on mango peel by-products to preserve flavouring active compounds for its revalorisation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 279: 109953.
- [6] 朱经楠, 彭健, 辜青青, 等. 射频加热技术及其在果蔬干制中的研究应用进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(16): 432-441.
ZHU J N, PENG J, GU Q Q, et al. Research progress in the application of radio frequency technology in fruit and vegetable drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(16): 432-441.
- [7] 赖必辉. 芒果变温压差膨化干燥技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012: 45-50.
LAI B H. The research on explosion puffing drying for mango at variable temperature and pressure difference[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012: 45-50.
- [8] 刘璇, 赖必辉, 毕金峰, 等. 不同干燥方式芒果脆片香气成分分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(22): 179-184.
LIU X, LAI B H, BI J F, et al. Analysis of aroma components in mango chips prepared by different drying methods[J]. *Food Science*, 2013, 34(22): 179-184.
- [9] FANG S Z, WANG Z F, HU X S. Hot air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller): thin-layer mathematical modelling[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2009, 44(9): 1 818-1 824.
- [10] 刘淑君, 林晗, 董诗琴, 等. ‘凯特’芒果果肉热风干燥过程褐变机制研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(2): 49-54.
LIU S J, LIN H, DONG S Q, et al. Study on browning mechanism of kate mango pulp during drying[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(2): 49-54.
- [11] 黄子芬, 李晨月, 徐柠檬, 等. 真空干燥对美味牛肝菌生物活性成分及其抗氧化活性的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(7): 55-61.
HUANG Z F, LI C Y, XU N M, et al. Effects of vacuum drying on bioactive ingredients and antioxidant activities of *Boletus edulis*[J]. *China Food Additives*, 2024, 35(7): 55-61.
- [12] 王乐然, 万霖. 远红外干燥技术研究现状[J]. *现代化农业*, 2024(5): 88-90.
WANG L R, WAN L. Research status of far infrared drying technology[J]. *Modernizing Agriculture*, 2024(5): 88-90.
- [13] YAO L Y, FAN L P, DUAN Z H. Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices[J]. *Food Chemistry*, 2020, 305: 125477.
- [14] 罗丰雷. 芒果果实活性物质分离纯化、鉴定及生物活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 16.
LUO F L. Isolation, purification and identification of bioactive compounds from *Mangifera indica* L. fruit and evaluation of

- their bioactivities[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 16.
- [15] 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.
- [16] 胡方洋, 陈金玉, 张坤生, 等. 薯类淀粉与卡拉胶共混体系特性及其对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 1-8.
- HU F Y, CHEN J Y, ZHANG K S, et al. Characteristics of the mixed systems of tuber starch and carrageenan and its effect on the gel properties of myofibrillar protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 1-8.
- [17] 李运奎, 韩富亮, 张予林, 等. 基于 CIELAB 色空间的红葡萄酒颜色直观表征[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 296-301.
- LI Y K, HAN F L, ZHANG Y L, et al. Visualization for representation of red wine color based on CIELAB color space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 296-301.
- [18] GÓMEZ-POLO C, GÓMEZ-POLO M, CELEMÍN VIÑUELA A, et al. A clinical study relating CIELCH coordinates to the color dimensions of the 3D-Master system in a Spanish population[J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2015, 113(3): 185-190.
- [19] 潘少香, 郑晓冬, 闫新焕, 等. 基于色差识别分析的灰枣不同贮藏期质量评价[J]. 食品科技, 2023, 48(3): 30-34.
- PAN S X, ZHENG X D, YAN X H, et al. Quality evaluation of jujube in different storage periods based on color difference identification analysis[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(3): 30-34.
- [20] 李丹彤. 芒果成熟度对干燥特性的影响及其制粉效果的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023: 60-61.
- LI D T. Study on the effect of mango maturity on drying characteristics and its flour milling[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023: 60-61.
- [21] SIMÃO R A, SILVA A P F B, PERONI F H G, et al. Mango starch degradation. I. A microscopic view of the granule during ripening[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(16): 7 410-7 415.
- [22] ADDO K A, BI J F, CHEN Q Q, et al. Understanding the caking behavior of amorphous jujube powder by powder rheometer[J]. LWT, 2019, 101: 483-490.
- [23] GALANAKIS C M. Valorization of fruit processing by-products[M]. London: Academic Press, 2020: 167-181.
- [24] 闫冰, 刘来亭, 蔡凤英, 等. 不同饲料原料及不同含水率对粉碎特性影响研究[J]. 饲料工业, 2023, 44(5): 101-105.
- YAN B, LIU L T, CAI F Y, et al. Influence of different feed ingredients and different moisture content on crushing characteristics of feed[J]. Feed Industry, 2023, 44(5): 101-105.
- [25] DE MENDONÇA K S, CORRÊA J L G, DE JESUS JUNQUEIRA J R, et al. Influences of convective and vacuum drying on the quality attributes of osmo-dried pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) slices[J]. Food Chemistry, 2017, 224: 212-218.
- [26] MONTEIRO R L, LINK J V, TRIBUZI G, et al. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices[J]. LWT, 2018, 96: 612-619.
- [27] QUAN W, HE W, QIE X J, et al. Effects of β -cyclodextrin, whey protein, and soy protein on the thermal and storage stability of anthocyanins obtained from purple-fleshed sweet potatoes[J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126655.
- [28] AN K, ZHAO D, WANG Z, et al. Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 1 292-1 300.
- [29] 王国锭, 黄昊, 束庆, 等. 不同干燥方法对黄洋葱粉品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 89-94.
- WANG G D, HUANG H, SHU Q, et al. Effect of drying methods on quality of yellow onion powder[J]. Storage and Process, 2019, 19(1): 89-94.
- [30] IBARRA-GARZA I P, RAMOS-PARRA P A, HERNÁNDEZ-BRENES C, et al. Effects of postharvest ripening on the nutraceutical and physicochemical properties of mango (*Mangifera indica* L. cv Keitt) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 103: 45-54.
- [31] 徐丽娜, 张宁, 杨国燕, 等. 麦麸可溶性和不溶性膳食纤维对小麦淀粉性质的影响[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(1): 25-29.
- XU L N, ZHANG N, YANG G Y, et al. The effect of soluble and insoluble dietary fiber from wheat bran on the properties of wheat starch[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(1): 25-29.
- [32] 蒋雅茜. 米糠膳食纤维对大米淀粉理化特性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014: 31-32.
- JIANG Y X. The research of rice bran dietary fiber on physico-chemical of rice starch[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2014: 31-32.
- [33] PHIMOLSIRIPOL Y, SIRIPATRAWAN U, HENRY C J K. Pasting behaviour, textural properties and freeze - thaw stability of wheat flour-crude malva nut (*Scaphium scaphigerum*) gum system[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(3): 557-562.
- [34] HUANG D, LI C, CHEN Q, et al. Identification of polyphenols from *Rosa roxburghii* Tratt pomace and evaluation of *in vitro* and *in vivo* antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131922.
- [35] ZHENG Y, LIU S, XIE J, et al. Antioxidant, α -amylase and α -glucosidase inhibitory activities of bound polyphenols extracted from mung bean skin dietary fiber[J]. LWT, 2020, 132: 109943.