

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240530003

不同干燥方式对猕猴桃果粉理化性质的影响

罗其琪¹, 李咏富^{1*}, 石 彬¹, 先盼盼²

(1. 贵州省农业科学院现代农业发展研究所, 贵阳 550006; 2. 贵州大学明德学院, 贵阳 550025)

摘 要: **目的** 探究 3 种不同的干燥方式对猕猴桃果粉理化性质的影响。**方法** 采用热泵干燥(HPD)、热风干燥(HAD)及微波-热泵干燥(MW-HPD) 3 种不同的干燥方式对猕猴桃进行处理, 通过测定其粉体特性、色泽、全质构、微观形貌、维生素 C 含量以及气味, 选择最适的加工方式。**结果** 在安全水分之下, MW-HPD 的出粉率显著高于 HPD 和 HAD, 更疏松, 平均粒径和总体色差更小, 硬度、胶黏性、咀嚼性都显著高于 HPD 和 HAD, MW-HPD 颗粒表面较平整、光滑、组织堆叠少, 维生素 C 含量显著高于 HPD 和 HAD, 氮氧化物和硫化化合物为猕猴桃果粉中主要的气味成分, 芳烃化合物、硫的有机化合物、烷类、醇和部分芳香族化合物次之, 3 种干燥方式的猕猴桃果粉气味有较大区别, 电子鼻能够较好的判别。**结论** MW-HPD 更适宜用在猕猴桃果粉的加工中。

关键词: 干燥方式; 粉体性质; 全质构; 微观形貌; 气味分析

Effects of different drying methods on the physical and chemical properties of yellow flesh kiwifruit powder

LUO Qi-Qi¹, LI Yong-Fu^{1*}, SHI Bin¹, XIAN Pan-Pan²

(1. Guizhou Research Institute of Modern Agricultural Development, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 2. Mingde College of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of 3 kinds of different drying methods on the physicochemical properties of kiwifruit powder. **Methods** The kiwifruit was treated by 3 kinds of different drying methods: Heat pump drying (HPD), hot air drying (HAD), and microwave heat pump drying (MW-HPD). The powder properties, color, total texture, microstructure, vitamin C content, and odor were measured to select the most suitable processing method. **Results** Under safe moisture conditions, the powder yield of MW-HPD was significantly higher than that of HPD and HAD, with a looser texture, smaller average particle size and overall color difference. The hardness, stickiness, and chewiness of MW-HPD were significantly higher than those of HPD and HAD. The surface of MW-HPD particles was relatively flat, smooth, with less tissue stacking, and a significantly higher vitamin C content than that of HPD and HAD. Nitrogen oxides and sulfur compounds were the main odor components in kiwifruit powder, followed by aromatic compounds, sulfur organic compounds, alkanes, alcohols, and some aromatic compounds. There were significant differences in the odor of kiwifruit powder from the 3 kinds of drying methods,

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y162 号)、黔农科院青年科技基金项目([2021]11 号)

Fund: Supported by the Science and Technology Department of Guizhou Province (QKHZC[2020]1Y162), and the Guizhou Academy of Agricultural Sciences Young Foundation Program ([2021]11)

***通信作者:** 李咏富, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工及贮藏保鲜。E-mail: liyongfu1985@163.com

***Corresponding author:** LI Yong-Fu, Ph.D, Associate Professor, Guizhou Institute of Integrated Agriculture Development, No.1 Jinxin Community, Huaxi District, Guiyang 550006, China. E-mail: liyongfu1985@163.com

and electronic noses could better distinguish them. **Conclusion** MW-HPD is more suitable for use in the processing of kiwifruit powder.

KEY WORDS: drying method; powder properties; whole texture; microscopic morphology; odor analysis

0 引言

猕猴桃(*Actinidia chinensis* Planch.)是猕猴桃科猕猴桃属的多年生木本植物,原产于中国陕西秦岭山区,其种植面积及产量常年居全球、全国之首,2022 年,陕西省的猕猴桃产量占全球的 1/5、占全国的 1/3^[1]。猕猴桃被誉为水果中的“维 C 之王”^[2],且含有多种生物活性成分,如矿物质和酚类物质等^[3],具有较高的营养及经济价值。由于猕猴桃的上市时间集中,货架期短,流通损耗率高,在销售高峰后易出现鲜果大量腐烂的情况,急需拓展对猕猴桃产品精深加工的研究^[4]。

与干制、腌渍、罐藏等传统果蔬加工产品相比,果粉是一种良好的全营养深加工产品,有贮藏稳定性好、运输成本低、原料利用率高、营养成分及风味保存率高、应用范围广等优势,已成为果蔬精深加工的一个新趋势^[5]。果粉常用干燥方式主要有常压热风干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥等^[6],这些干燥方式存在能效低、能耗大、耗时长;营养成分损失大;设备条件要求高、占地面积大等弊端^[7],将多种干燥方式结合起来,利用各干燥方式的优点在提升产品质量、提高干燥速率及降低能耗方面更具有优势。但目前有关猕猴桃果粉干燥产品研究的相关报道较少,例如林陈芳^[8]对猕猴桃喷雾干燥工艺优化及维生素 C (vitamin C,VC)降解规律进行了研究;祝义伟等^[9]利用响应面法优化了猕猴桃果粉的喷雾干燥工艺条件;王科堂等^[10]研究了热风干燥、真空干燥、冷冻干燥、热风联合真空干燥和气流膨化干燥对猕猴桃粉的营养品质、物理性质、微观结构、水分状态及抗氧化性的影响。而在报道中的猕猴桃果粉的干燥方式多为喷雾干燥和冷冻干燥,微波联合热泵干燥鲜见报道。

鉴于此,本研究比较了热风干燥、热泵干燥及微波联合热泵干燥对猕猴桃果粉品质的影响,对其粉体性质及微观结构等方面做了一定的分析,以期对猕猴桃果粉的加工提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄金奇异果由贵州燎原科技有限公司提供。

亚硫酸氢钠、磷酸三钙、二氧化硅、微晶纤维素(食品级,河南万邦化工科技有限公司);抗坏血酸标准品(纯度 99.0%,北京索莱宝科技有限公司);甲醇(色谱纯,美国

Sigma 公司);磷酸二氢钾(化学纯,国药集团化学试剂有限公司);十六烷基三甲基亚硝胺(分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司);乙腈(色谱纯,美国 Fisher 公司)。

1.2 仪器与设备

DHG-9053A 鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司);HT-KRZH-11V 热泵烘干机(贵州蓝冠达环保节能科技有限公司);WBZ-10ML 智能化静态微波真空干燥机(贵阳新奇微波工业有限责任公司);A11 高速粉碎机(德国 IKA 公司);MB35 卓越型快速水分测定仪(美国 OHAUS 公司);ATX124R 分析天平(精度 0.1 mg,日本岛津公司);HELOS-OASIS 全自动干湿极光粒度仪(德国新帕泰克公司);NH310 色差仪(广东三恩时科技有限公司);TMS-Pro 质构仪(美国 FTC 公司);SU8020 扫描式电子显微镜、MC1000 离子溅射仪(日本 HITACHI 公司);EX250 X 射线能谱仪(日本 HORIBA 公司);1260 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司);Sapphire 系列 C₁₈ 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm, 美国 Sepax 公司);PEN3 便携式电子鼻(德国 AIRSENSE 公司)。

1.3 猕猴桃果粉的制备

1.3.1 猕猴桃干燥前处理

选用成熟度 6~7 成,硬度 2 kg/cm² 左右,可溶性固形物 ≥ 10%,果径 30 mm 以下的黄金奇异果小果,去皮后切成 5 mm 厚薄片,用 0.2% 的亚硫酸氢钠溶液,以 1:5 (m:V) 的料液比浸泡黄金奇异果片 30 min 后,清水喷淋 30 s 并沥干水分,将黄金奇异果片平铺于镂空的托盘上待进行烘干。

1.3.2 干燥试验设计

热泵干燥条件:将果片放入闭环式热泵干燥机中,设置温度在 55℃,控制风机转速在 0.5~2.0 m/s,至果片终水分含量 5% 以下,大约需要 9.8 h,样品记为 HPD。

热风干燥条件:将果片放入热风干燥机中,设置温度在 55℃,打开鼓风,至果片终水分含量 5% 以下,大约需要 16 h,样品记为 HAD。

微波联合热泵干燥条件:将猕猴桃果片放于微波干燥机的干燥仓内,设置参数真空度为 0.08 MPa,物料重量(kg),物料水分 85%,干燥系数 0.85,物料最终含水量 20%,微波功率 2000 W、1500 W 分别干燥 4 min,1000 W 干燥 3 min,500 W 干燥 6 min,300 W 干燥 15 min,至果片终水分含量 20% 左右。将微波预干燥的果片放入闭环式热泵干燥机中,设置温度在 55℃,控制风机转速在 0.5~2.0 m/s,

至果片终水分含量 5%以下,共需要大约 4.2 h,样品记为 MW-HPD。

将干燥后的果片自然冷却后密封保存待用。

1.3.3 制 粉

将干燥的果片置于高速粉碎机中,加入食品级抗结剂 0.1%磷酸三钙、0.8%二氧化硅、0.2%微晶纤维素,粉碎 10~15 s 后取出过 100 目筛,未能过筛的果渣可再次粉碎,置于密封干燥处待用。

1.3.4 猕猴桃果粉理化特性的测定

(1)出粉率

参照 CANO 等^[1]的方法,出粉率以干燥前猕猴桃质量与干燥后果粉质量百分比计算,如公式(1)。

$$X/\%=\frac{m_1}{m_2}\times100\% \tag{1}$$

式中: X 为猕猴桃果粉得率,%; m_1 为粉碎后果粉质量, g; m_2 为干燥前猕猴桃片的质量, g。

(2)水分含量

用 MB35 卓越型快速水分测定仪进行测定,每个样品重复 3 次取平均值。

(3)堆积密度

准确称取 5.000 g 猕猴桃粉,将猕猴桃粉以相同的下落高度落入 25 mL 量筒中,微微振动使猕猴桃粉的表面基本水平,记录体积 V ,堆积密度计算如公式(2)。

$$B=\frac{m}{V} \tag{2}$$

式中 B 为堆积密度, g/mL; m 为质量, g; V 为体积, mL。

(4)休止角

将漏斗固定于试管架上,漏斗口距离桌面 8 cm,漏斗下端水平放置一张绘图纸,将 10 g 猕猴桃粉沿漏斗落下至绘图纸上,待果粉完全落下呈圆锥形,量取底部直径记为 $2R$,圆锥高度记为 H ,休止角 A' 的大小如公式(3)。

$$A'=\arctan\frac{H}{R} \tag{3}$$

式中 A' 为休止角,°; H 为果粉散落圆锥高度, cm; R 为果粉散落后底部半径, cm。

(5)粒径

用 HELOS-OASIS 全自动干湿极光粒度仪进行测定。

(6)溶解度

1 g 猕猴桃粉加入 50 mL 蒸馏水中,在涡旋振荡器上高速搅拌 5 min, 3000×g 离心 5 min,取上 40 mL 上清液于 105℃下烘至恒重,计算上清液中固形物含量占总体的比例如公式(4)。

$$Y/\%=\frac{A}{B}\times100\% \tag{4}$$

式中 Y 为猕猴桃粉的溶解度,%; A 为上清液中固形物的质量, g; B 为猕猴桃粉的质量, g。

(7)色泽

采用色差仪测定猕猴桃粉的色泽。以仪器白板色为标准,用色差仪测定明度 L ($L=0$ 表示黑色; $L=100$ 表示白色)、彩度指数 a^* (正数表示红色,负数表示绿色)和 b^* (正数表示黄色,负数表示蓝色)。

$$\Delta E=\sqrt{(L-L^*)^2+(a-a^*)^2+(b-b^*)^2} \tag{5}$$

式中 ΔE 为猕猴桃粉与标准白板($L^*=79.08$ 、 $a^*=4.12$ 、 $b^*=26.71$)的色差值; L 为明度的变化; a 为颜色从绿色($-a$)到红色($+a$)的变化; b 为颜色从蓝色($-b$)到黄色($+b$)的变化。

(8)质构

用质构仪进行全质构测试(texture profile analyses, TPA),测试条件为: 30 mm 圆盘探头、起始力 1.5 N、测试速度 120 mm/min、测后速度 600 mm/min、形变百分比 60%。

(9)微观形貌

用扫描式电子显微镜进行测试,观察其外观形貌。

(10) VC

VC 含量的测定使用 GB 5009.86—2016《食品中抗坏血酸的测定》中的高效液相色谱法。

(11)气味成分分析

利用电子鼻对不同处理方式的猕猴桃果粉进行测试(表 1),并且进行载荷分析、主成分分析(principal component analysis, PCA)和线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)。

表 1 PEN3 便携式电子鼻传感器性能
Table 1 Performance of PEN3 portable electronic nose sensor

阵列序号	传感器名称	性能描述	备注
S1	W1C	芳烃化合物	甲苯 10 mL/m ³
S2	W5S	氮氧化物	NO ₂ 1 mL/m ³
S3	W3C	氨、芳香分子	苯 10 mL/m ³
S4	W6S	氰化物	H ₂ 100 mL/m ³
S5	W5C	烯烃、芳族、极性分子	丙烷 1 mL/m ³
S6	W1S	烷类	CH ₄ 100 mL/m ³
S7	W1W	硫化物	H ₂ S 1 mL/m ³
S8	W2S	乙醇、部分芳香族化合物	CO 100 mL/m ³
S9	W2W	芳烃化合物、硫的有机化合物	H ₂ S 1 mL/m ³
S10	W3S	烷类和脂肪族	CH ₄ 10 mL/m ³

1.4 数据处理

试验每个处理均设置 3 个平行,采用电子鼻配套的 Winmuster 软件进行和载荷分析、PCA 和 LDA;用 WPS、Office (12.1.0.16729)进行数据统计分析,结果以平均值±标准偏差表示,用 SPSS (25.0.0.0)做显著性分析,显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 干燥方式对猕猴桃果粉物理特性的影响

从表 2 中可以看到, 根据 1.3.2 的 3 种干燥方式及 1.3.3 中的制粉方法制备的猕猴桃果粉水分含量均在 5% 以下, 含水量是直接影响干燥产品质量与货架期的重要指标, 通常来说, 含水量越低, 产品贮藏期内稳定性越好, HAD 与 MW-HPD 的水分含量分别为 4.13% 和 4.26%, 差异不显著 ($P>0.05$), HPD 脱水较完全, 水分含量较低, 仅为 3.73%, 显著低于 HAD 和 MW-HPD。3 种干燥方式的出粉率有显著差异 ($P<0.05$), MW-HPD 的出粉率最高, 能达到 68.07%; HAD 的出粉率最少, 仅为 21.46%, 出粉率由大到小的顺序依次为: MW-HPD>HPD>HAD。堆积密度是评价粉体加工特性的一项重要指标, 是反映其多孔性结构的参数^[12], 其大小与商业运输成本成反比关系^[13], 对同一物料而言, 堆积密度增大取决于干燥过程中物料自身组织坍塌而引起的空气体积减小。3 种干燥方式制备的猕猴桃果粉堆积密度有显著差异 ($P<0.05$), 由大到小依次为: HAD>HPD>MW-HPD, 引起这种现象的主要原因可能是, MW-HPD 在微波阶段, 物料在负压状态下迅速升温、快速脱水, 使其内部形成疏松多孔的网络结构, 颗粒间间隙大, 从而堆积密度较小; 而 HAD 在干燥过程中, 容易在物料表面形成紧实的硬壳^[14], 以至于果粉颗粒比较致密, 颗粒间隙小, 堆积密度大。休止角是衡量粉体流动性的重要指标, 反应了粉体的摩擦特性和散落性能^[15], 休止角越小, 内摩擦力越小, 粉体流动性越好, 一般认为休止角 $\theta\leq 30^\circ$ 时流动性较好, $\theta\leq 40^\circ$ 时可满足生产中的流动性要求^[16]。WM-HPD 的休止角小于 HAD 和 HPD, 因此 WM-HPD 的流动性略好于 HAD 和 HPD, 但三者间差异不显著。WM-HPD 的溶解度略小于 HPD, 3 种干燥方式对猕猴桃粉的溶解性差异不显著 ($P>0.05$)。

3 种不同的干燥方式所制得的猕猴桃果粉的粒径分布

表 2 不同干燥方式对猕猴桃果粉物理特性的影响				
Table 2 Influences of different drying methods on the physical properties of kiwifruit powder				
检测指标	干燥方式			
	HPD	HAD	MW-HPD	
水分含量/%	3.73±0.15 ^a	4.13±0.34 ^b	4.26±0.41 ^b	
出粉率/%	43.46±2.43 ^b	21.46±2.64 ^a	68.07±6.89 ^c	
堆积密度/(g/mL)	0.39±0.009 ^b	0.40±0.008 ^c	0.36±0.010 ^a	
休止角/°	43.30±0.20 ^a	42.91±1.04 ^a	41.73±0.82 ^a	
溶解度/%	22.08±0.11 ^a	21.94±0.13 ^a	21.97±0.57 ^a	

注: 同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下表 3~5 同。

如表 3 所示。粒径大小、表面积平均粒径 S_m 和离散度均是反应粉体粒径分布的指标, 中值粒径 D_{50} 又叫中位径, 通常用来表示粉体的平均粒度; S_m 即表面积平均粒径, 其大小与粉体粒径成反比, S_m 值越大, 粉体粒径越小; 离散度表征粉体颗粒大小的均匀程度, 离散度越小, 表示粒径分布越均匀^[17]。由表 3 可看到, 不同干燥方式的猕猴桃果粉的 D_{50} 和 S_m 都具有显著差异 ($P<0.05$), D_{50} 由大到小依次为 HPD>HAD>MW-HPD; S_m 由大到小依次为 MW-HPD>HAD>HPD, 均说明 MW-HPD 的较另外两种干燥方式的粒径更小; 从整体的粒径分布上来看, MW-HPD 没有 HPD 和 HAD 的粒径分布均匀, HPD 和 HAD 二者间的离散度差异不显著。ZHANG 等^[18]研究表明, 香菇粉末的颗粒越小, 流动性越好, 这一结果与表 2 中休止角的规律也相吻合。

表 3 不同干燥方式猕猴桃果粉的粒径分布
Table 3 Particle size of kiwifruit powder processed by different drying methods

检测指标	干燥方式		
	HPD	HAD	MW-HPD
$D_{10}/\mu\text{m}$	74.65±2.22 ^c	52.14±0.19 ^b	44.64±0.43 ^a
$D_{50}/\mu\text{m}$	165.51±1.86 ^c	119.99±2.74 ^b	111.13±1.49 ^a
$D_{90}/\mu\text{m}$	316.81±18.39 ^b	222.77±13.90 ^a	234.22±7.38 ^a
$S_m/(\text{cm}^2/\text{g})$	166.60±4.84 ^a	223.84±0.35 ^b	239.90±2.80 ^c
离散度	1.46±0.11 ^a	1.42±0.09 ^a	1.71±0.05 ^b

2.2 干燥方式对猕猴桃果粉色泽的影响

不同的干燥方式对猕猴桃果粉的色泽有较大的影响 (表 4), 从明度值 L^* 上看, HPD 与 HAD 差异不显著, 均小于 MW-HPD, 可能与干燥时间的长短有关, HPD 与 HAD 比 MW-HPD 所需的干燥时间长, 增加了猕猴桃在空气中暴露的时间, 长时间的高温使其褐变程度更大, 颜色更暗^[19], 该结果与刘殿宇等^[20]在研究干燥时间长短对茶粉色泽的影响结果相似; 从红绿值 a^* 上看, HPD 与 MW-HPD 差异不显著, 均小于 HAD; HPD 与 HAD 的黄蓝值 b^* 差异不显著, 均大于 MW-HPD, 由此可以看出 HAD 相比于 HPD 和 MW-HPD 更偏红, HPD 和 HAD 相比于 MW-HPD 更偏黄, 颜色的变化原因可能是叶绿素和类胡萝卜素的降解^[21]和美拉德反应^[22]产生。3 种干燥方式对总色差值 ΔE 的影响差异显著 ($P<0.05$), MW-HPD 的总体色差最小, 显著低于 HPD、HAD, VALADEZ 等^[23]的研究结果也显示, 与 HAD 相比, 微波干燥能更好的保留产品色泽, 与本研究结果一致。

表 4 不同干燥方式对猕猴桃果粉色泽的影响
Table 4 Influences of different drying methods on the color of kiwifruit powder

检测指标	干燥方式		
	HPD	HAD	MW-HPD
L^*	-8.55 ± 0.23^a	-8.72 ± 0.26^a	-6.94 ± 0.07^b
a^*	2.26 ± 0.03^a	3.96 ± 0.04^b	2.18 ± 0.05^a
b^*	21.11 ± 0.03^b	21.60 ± 0.15^b	17.43 ± 0.17^a
ΔE	22.89 ± 0.11^b	23.63 ± 0.14^c	18.88 ± 0.17^a

2.3 干燥方式对猕猴桃质构的影响

干燥后猕猴桃果片的质构特性对于后期制粉具有重要意义,因此对果片进行了 TPA 分析测试。表 5 为 3 种不同的干燥方式猕猴桃的质构特性参数,从表 5 中可以看到,3 种干燥方式对破裂力、硬度、胶黏性、咀嚼性都有较为显著的影响($P<0.05$),最大黏附力的差异不显著($P>0.05$),可能是由于随干燥的持续,物料内部溶质分子向表面迁移积累形成硬壳的同时,温度催化某些酶的活性,影响蛋白质和碳水化合物降解,从而改变物料的质构^[24]。MW-HPD 在两次下压过程中的硬度、胶黏性、咀嚼性都显著高于另外两种干燥方式,但其破裂力又最小,由此可以推测出 MW-HPD 相对来说是更酥脆的,这个结果也可以从脆性的数值上体现出来,MW-HPD 的脆性值是三者之中最大的,因此 MW-HPD 更有利于猕猴桃制粉。

表 5 不同干燥方式对猕猴桃质构的影响
Table 5 Influences of different drying methods on the texture of kiwifruit powder

检测指标	干燥方式		
	HPD	HAD	MW-HPD
破裂力/N	134.20 ± 0.26^c	102.30 ± 4.95^b	15.40 ± 0.78^a
硬度 1/N	143.13 ± 9.62^b	99.60 ± 7.03^a	221.60 ± 9.33^c
最大黏附力/N	-0.30 ± 0.49^a	-0.10 ± 0.00^a	-0.10 ± 0.00^a
黏附性/mJ	0.11 ± 0.04^b	0.05 ± 0.02^a	0.08 ± 0.02^{ab}
硬度 2/N	117.73 ± 11.00^b	84.33 ± 4.44^a	218.63 ± 14.84^c
弹性/mm	2.28 ± 0.43^b	1.34 ± 0.30^a	2.01 ± 0.13^b
胶黏性/N	78.90 ± 14.59^b	44.80 ± 9.00^a	119.47 ± 10.46^c
咀嚼性/mJ	196.20 ± 0.36^b	58.21 ± 7.10^a	226.52 ± 7.69^c
脆性/N	13.68 ± 0.44^a	16.53 ± 4.20^{ab}	19.08 ± 9.32^b

2.4 干燥方式对猕猴桃果粉微观形貌的影响

图 1 是不同干燥方式猕猴桃果粉的微观形貌图,由于不同的干燥过程水分迁移和分布不同,制备的猕猴桃果粉样品的微观结构有明显差异,整体呈现出形状大小不规则,颗粒表面较粗糙,有大量褶皱,裂隙等的形貌。由图 A₁~C₁ 可看到,HPD 和 HAD 颗粒之间空隙较 MW-HPD 大,MW-HPD 能观察到更多较小的颗粒碎片团聚在大碎片周围,HAD 颗粒大小更均匀,与粒径分布的结果一致;由图 A₂~C₂ 可观察到,HPD 和 HAD 颗粒表面更粗糙,并且有均

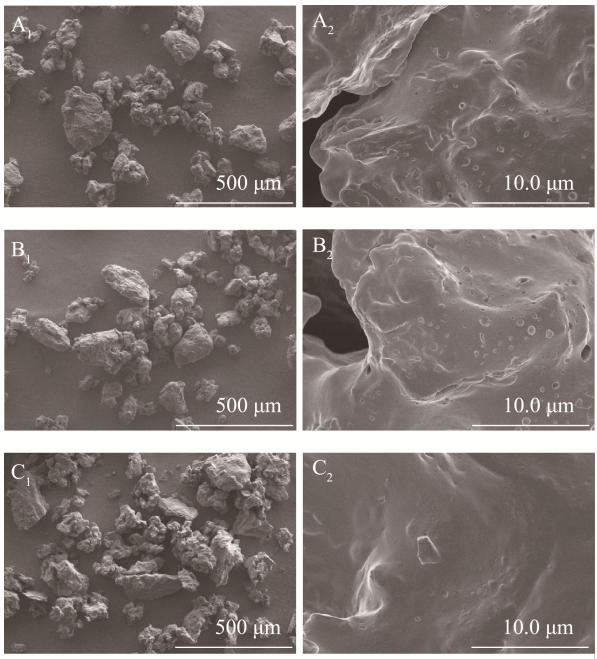
匀的圆孔状结构和大量堆叠,可能是由于长时间的热处理,使物料表面发生皱缩而形成。MW-HPD 颗粒表面较平整、光滑,组织堆叠少,可能是由于微波预干燥过程中,水分散失快,能一定程度的保持完整细胞结构有关,与张映萍等^[25]的研究结果一致。

2.5 干燥方式对猕猴桃果粉 VC 含量的影响

VC 对光、热和氧都较为敏感,加工过程中极易氧化损失,如图 2,3 种干燥方式所得的猕猴桃果粉的 VC 含量有显著差异($P<0.05$),其含量由大到小依次为 MW-HPD>HPD>HAD,HPD 和 HAD 干燥的猕猴桃需在高温的空气中长时间暴露,使 VC 的有氧降解和无氧降解速度都加快^[26],导致 VC 损失严重,虽然微波预干燥过程中温度短暂升高,但可大幅度减少后续的干燥时间,因此 MW-HPD 的 VC 更高。

2.6 干燥方式对猕猴桃果粉气味的影响

为了探究不同的干燥方式对猕猴桃果粉的挥发性气味物质的影响,通过电子鼻对 HPD、HAD 及 MW-HPD 进行电子鼻测试,并进行了载荷分析、主成分分析和线性判别分析,结果如图 3~5 所示。载荷分析主要反映主成分和相应的原始变量间的密切程度^[27],用来判别 10 个传感器对气味的贡献率^[28],传感器响应值越接近于 1,该成分的贡献率越大。由图 3 看出,W5S 和 W1W 传感器在第一、第二主成分中的贡献率均超过 70%,贡献率最大,对该样



注: A. HPD; B. HAD; C. MW-HPD。

图1 不同干燥方式对猕猴桃果粉微观形貌的影响
Fig.1 Influences of different drying methods on the microstructure of kiwifruit powder

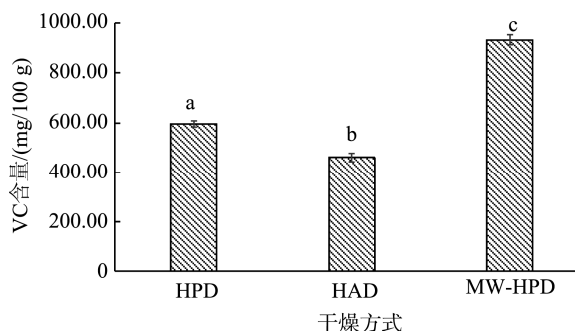


图2 不同干燥方式对猕猴桃果粉VC含量的影响

Fig.2 Influences of different drying methods on the VC content of kiwifruit powder

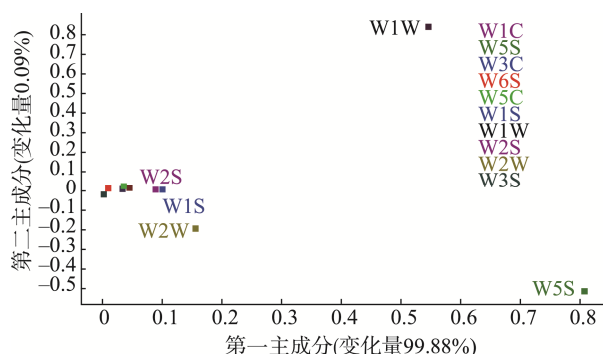


图3 不同干燥方式的猕猴桃果粉载荷分析图

Fig.3 Loading analysis of kiwifruit fruit powder with different drying methods

品挥发性气味的识别影响较大, 是猕猴桃果粉中的主要气味成分, 表明氮氧化物和硫化物为猕猴桃果粉中主要的气味成分。W2W、W1S 和 W2S 这 3 个传感器的贡献率低于 W5S 和 W1W, 说明芳烃化合物、硫的有机化合物、烷类、醇和部分芳香族化合物在猕猴桃果粉的气味中也有重要贡献, 其他的传感器贡献率可忽略不计。

PCA 图是以散点图为基础, 每个点代表一个样品的一次检验, 点与点之间的距离代表不同检验次数之间特征差异的大小^[29]。如图 4 所示, 第一主成分方差贡献率为 99.88%, 第二主成分方差贡献率为 0.09%, 累计方差贡献率为 99.97% $\geq$ 85%, 且两轴总变化量 $>95\%$, 表示提取到的气味信息较为完全, 分析中没有其他气味干扰成分^[30], 可用来表征猕猴桃果粉的气味特征。可以看到图中 3 种猕猴桃果粉能够被完全区分开, 说明其气味差异较大, 干燥方式对猕猴桃的气味有较显著的影响。

在 LDA 中, 判别式 LD₁ 与 LD₂ 的贡献率分别为 88.74%和 9.82%, 总贡献率为 98.56%。3 组样品在第二主成分上的差异不显著, 主要差异在第一主成分上, 该结果与 PCA 结果相一致。3 种干燥方式中 HPD 中气味分子在第一主成分上的贡献值最大, 其次是 HAD, MW-HAD 贡献

值最小。另外, 如图 5 所示, 3 种干燥方式的 LDA 图能做明显区分, 因此电子鼻能够较好的判别不同干燥方式猕猴桃果粉的气味。

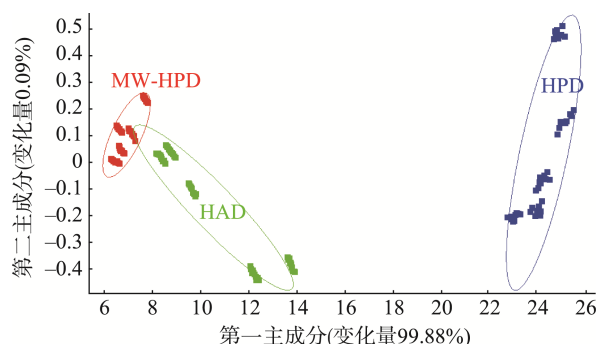


图4 不同干燥方式的猕猴桃果粉主成分分析图

Fig.4 Principal component analysis of kiwifruit fruit powder with different drying methods

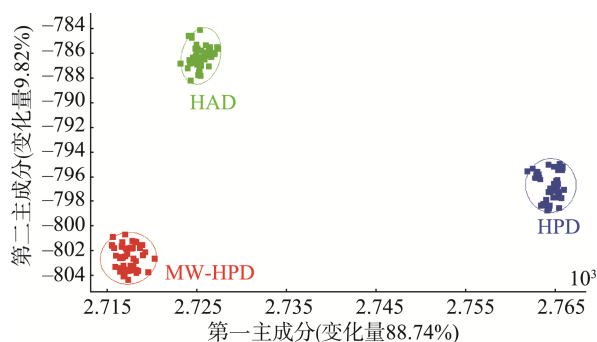


图5 不同干燥方式的猕猴桃果粉线性判别分析图

Fig.5 Linear discriminant analysis of kiwifruit fruit powder with different drying methods

3 结 论

本研究探究了不同的干燥方式对猕猴桃粉体特征、色泽、质构、微观结构、VC 含量以及气味的影响, 结果显示在安全水分之下, MW-HPD 的出粉率显著高于 HPD 和 HAD, 更疏松, 流动性和溶解度差异不显著, MW-HPD 的平均粒径更小, HPD 与 HAD 粒径分布更均匀。HPD 与 HAD 的色泽比 MW-HPD 的明度更暗, 颜色更偏红和偏黄, MW-HPD 的总体色差显著小于 HPD 和 HAD。MW-HPD 在全质构测试中的硬度、胶黏性、咀嚼性、脆性都显著高于另外两种干燥方式。HPD 和 HAD 颗粒之间空隙较 MW-HPD 大, HAD 颗粒大小更均匀, 与粒径分布的结果一致, HPD 和 HAD 颗粒表面更粗糙, 并且有均匀的圆孔状结构和大量堆叠, MW-HPD 颗粒表面较平整、光滑、组织堆叠少。MW-HPD 的 VC 含量显著高于 HPD 和 HAD。氮氧化物和硫化物为猕猴桃果粉中主要的气味成分, 芳烃化

合物、硫的有机化合物、烷类、醇和部分芳香族化合物次之, 3 种干燥方式的猕猴桃果粉气味有较大区别, 电子鼻能够较好的判别。综上所述, 在本研究的 3 种干燥方式中, MW-HPD 更适宜在猕猴桃果粉的加工中, 但粉体流动性还较差, 有待进一步研究。

考文献

- [1] 农小蜂智库. 2023 年中国猕猴桃产业发展分析简报[EB/OL]. [2023-06-01]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1767510635797912843&wfr=spider&for=pc> [2023-12-21].
Nongxiaofeng think tank. Analysis and briefing on the development of China's kiwi industry in 2023 [EB/OL]. [2023-06-01]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1767510635797912843&wfr=spider&for=pc> [2023-12-21].
- [2] DONGXIAO SW, JUAN C, CHERYLL C, *et al.* Kiwifruit-based polyphenols and related antioxidants for functional foods: Kiwifruit extract-enhanced gluten-free bread [J]. *Int J Food Sci Nutr*, 2009, 60(s7): 251–264.
- [3] 邓代清, 史明波, 白兴萍, 等. 猕猴桃产业发展的现状、问题与对策[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(17): 90–92.
DENG DQ, SHI MB, BAI XP, *et al.* The current situation, problems, and countermeasures of the development of kiwifruit industry [J]. *Agric Eng Inform*, 2023, 43(17): 90–92.
- [4] 黄伟, 万明长, 乔荣. 贵州猕猴桃产业发展现状与对策[J]. *贵州农业科学*, 2012, 40(4): 184–186.
HUAGN W, WAN MC, QIAO R. Current situation and countermeasures of kiwifruit industry development in Guizhou province [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2012, 40(4): 184–186.
- [5] 毕金峰, 陈芹芹, 刘璇, 等. 国内外果蔬粉加工技术与产业现状及展望[J]. *中国食品学报*, 2013, (3): 8–14.
BI JF, CHEN QQ, LIU X, *et al.* Research on techniques and industry and prospect for fruit-vegetable powder processing in domestic and abroad [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2013, (3): 8–14.
- [6] 韩旭, 董京磊, 宫俊杰, 等. 果蔬干燥技术的研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2020, 26(9): 4.
HAN X, DONG JL, GONG JJ, *et al.* Application and developments of fruit and vegetable drying technology [J]. *Food Nutr China*, 2020, 26(9): 4.
- [7] 李琳, 王桢. 果蔬干燥技术研究进展[J]. *中国果菜*, 2020, 40(3): 9.
LI L, WANG Z. Research progress on drying technologies of fruits and vegetables [J]. *China Fruit Veg*, 2020, 40(3): 9.
- [8] 林陈芳. 猕猴桃 VC 降解规律及果粉干燥工艺的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2015.
LIN CF. Study on the degradation kinetic of VC in kiwi fruit and the dry processing technology of fruit powder [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2015.
- [9] 祝义伟, 冯臻, 周令国, 等. 响应面法优选猕猴桃果粉的喷雾干燥工艺条件[J]. *中国食物与营养*, 2015, 21(12): 57–59.
ZHU YW, FENG C, ZHOU LG, *et al.* Optimizing conditions of spray drying technology of kiwi fruit powder by response surface method [J]. *Food Nutr China*, 2015, 21(12): 57–59.
- [10] 王科堂, 陈雪峰, 陈梦音, 等. 干燥方式对猕猴桃果粉品质及抗氧化性的影响[J]. *食品科技*, 2022, (5): 120–126.
WANG KT, CHEN XF, CHEN MY, *et al.* Effects of drying methods on the quality and antioxidant properties of kiwi fruit powder [J]. *Food Sci Technol*, 2022, (5): 120–126.
- [11] CANO MP, HERNANDEZ A, ANCOS BD. High pressure and temperature effects on enzyme inactivation in strawberry and orange products [J]. *J Food Sci*, 1997, 62(1): 85–88.
- [12] LIU ZB, ZHANG M, WANG YC. Drying of restructured chips made from the old stalks of *Asparagus officinalis*: Impact of different drying methods [J]. *J Sci Food Agric*, 2016, 96(8): 2815–2824.
- [13] BHANDARI B, BANSAL N, ZHANG M, *et al.* Handbook of food powders: Processes and properties [Z]. 2013.
- [14] 王秀丽, 赵龙, 刘立彬, 等. 热风、真空微波干燥红枣红豆浆的研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(16): 257–259.
WAGN XL, ZHAO L, LIU LB, *et al.* Study on hot-air, vacuum-microwave drying of processing jujube and red bean puree [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(16): 257–259.
- [15] 王江涛, 于源, 刘家祥. 利用石英粉体休止角表征其团聚状态的研究[J]. *北京化工大学学报: 自然科学版*, 2012, 39(5): 49–52.
WANG JT, YU Y, LIU JX. Characterization of the agglomeration parameter by using the angle of repose of quartz powder [J]. *J Beijing Univ Chem Technol (Nat Sci Ed)*, 2014, 35(16): 257–259.
- [16] 陈晓旭, 易建勇, 毕金峰, 等. 不同联合干燥方式对火龙果粉品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(1): 106–112.
CHEN XX, YI JY, BI JF, *et al.* Effect of different combined drying methods on the quality characteristics of pitaya powder [J]. *Food Ferment Ind*, 2015, 41(1): 106–112.
- [17] 李明娟, 张雅媛, 游向荣, 等. 不同干燥技术对核桃粕蛋白粉品质特性及微观结构的影响[J]. *食品科学*, 2021(5): 92–98.
LI MJ, ZHANG YY, YOU XR, *et al.* Effects of different drying technologies on the quality characteristics and microstructure of walnut meal protein powder [J]. *Food Sci*, 2021(5): 92–98.
- [18] ZHANG ZP, SONG HG, PENG Z, *et al.* Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods [J]. *J Food Eng*, 2012, 109(3): 406–413.
- [19] 钱晓燕, 周梦琪, 吕远平, 等. 不同干燥工艺对猕猴桃粉理化性质、微观结构及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(17): 237–242.
QIAN XY, ZHOU MQ, LV YP, *et al.* Effects of different drying processes on physicochemical properties, microstructure, and quality of kiwifruit powder [J]. *Food Ferment Ind*, 2023, 49(17): 237–242.
- [20] 刘殿宇, 陈丽. 影响速溶茶粉色泽的几个因素[J]. *饮料工业*, 2011, (12): 25–26.
LIU DY, CHEN L. Several factors affecting color of instant tea powder [J]. *Bever Ind*, 2011, (12): 25–26.
- [21] WEEMAES CV, OOMS V, INDRAWAT I, *et al.* Pressure-temperature degradation of green color in broccoli juice [J]. *J Food Sci*, 1999, 64(3): 504–508.
- [22] MASKAN M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying [J]. *J Food Eng*, 2001, 48(2): 169–175.
- [23] VALADEZ CL, CORTEZ G, ROSA M, *et al.* Effect of microwave drying and oven drying on the water activity, color, phenolic compounds content and antioxidant activity of coconut husk (*Cocos nucifera* L.) [J]. *J Food Sci Technol*, 2016, 53(9): 3495–3501.
- [24] 陈月清, 牛坡. 热风干燥下不同品种猕猴桃果干感官评价与质构特性

- 的相关性分析[J/OL]. 食品工业科技, 1-12. [2024-08-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090156>
- CHEN YQ, NIU P. Correlation analysis of sensory evaluation and texture characteristics of dried kiwifruit of different varieties under hot air drying [J/OL]. Sci Technol Food Ind, 1-12. [2024-08-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090156>
- [25] 张映萍, 张丹, 宗迎, 等. 不同干燥方式对香露兜叶粉理化特性和功能性物质的影响[J]. 食品研究与开发, 1-12. [2024-08-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1231.TS.20240426.1517.002.html>
- ZHAGN YP, ZHAGN D, ZONG Y, *et al.* Effects of different drying methods on physicochemical properties and functional material of *Pandanus amaryllifolius* powder [J]. Food Res Dev, 1-12. [2024-08-13]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1231.TS.20240426.1517.002>
- [26] 李玉兰, 魏永义, 于红樱. 不同储存方式对猕猴桃维生素 C 含量的影响[J]. 中国园艺文摘, 2014, 30(4): 43-44.
- LI YL, WEI YY, YU HY. The influence of different storage methods to vitamin C content in kiwi fruit [J]. Chin Hort Abstr, 2014, 30(4): 43-44.
- [27] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 等. 基于电子鼻的果园荔枝成熟阶段监测[J]. 农业工程学报, 2015, (18): 240-246.
- XU S, LU HZ, ZHOU ZY, *et al.* Electronic nose monitoring mature stage of litchi in orchard [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2015, (18): 240-246.
- [28] DONG YS, GAO FZ, YU Z, *et al.* Electronic nose monitoring the Maillard reaction flavors of sesame oil from different production processes [J]. Adv J Food Sci Technol, 2014, 6(7): 910-920.
- [29] 田婷, 邱树毅, 文聆吉, 等. 电子鼻技术对不同轮次酱香型白酒的区分与识别[J]. 中国酿造, 2017, 36(10): 71-75.
- TIAN T, QIU SY, WEN LJ, *et al.* Discrimination and identification of different rounds Moutai-flavor Baijiu by electronic nose [J]. Chin Brew, 2017, 36(10): 71-75.
- [30] 程荣, 刘瑞玲, 吴伟杰, 等. 电子鼻结合气相色谱-离子迁移谱法鉴别不同干燥方式的膳食虾肉复合果蔬棒风味变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 9(15): 187-196.
- CHENG R, LIU RL, WU WJ, *et al.* Flavour changes of dietary shrimp composite fruit and vegetable sticks with different drying methods identified by electronic nose combined with gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2024, 9(15): 187-196.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



罗其琪, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品加工及贮藏保鲜。
E-mail: luoqiqi6777@163.com



李咏富, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工及贮藏保鲜。
E-mail: liyongfu1985@163.com