

不同干燥方式对杨梅果粉品质的影响

李 伟^{1,2}, 郜海燕^{1,2,*}, 陈杭君², 吴伟杰²

(1.中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2.浙江省农业科学院食品科学研究所, 浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310021)

摘 要: 通过比较不同干燥方式所得杨梅果粉的水分含量、溶解性、流动性、色泽、香气成分、VC含量、花色苷含量和总酚含量, 研究真空干燥、真空冷冻干燥和热风-微波联合干燥3种干燥方式分别对杨梅果粉品质的影响。结果表明: 真空冷冻干燥所得杨梅果粉水分含量(3.68%)最低, 溶解性(57.68%)、流动性(34.25°)和色泽(a^* 值为24.48)最好, 干燥后杨梅的特征香气成分损失最少, VC、花色苷和总酚含量(分别为103.51、122.81、144.59 mg/100 g)最高; 其次是热风-微波联合干燥; 真空干燥效果最差。综合考虑杨梅果粉的品质、干燥效率和成本, 热风-微波联合干燥适宜在杨梅果粉加工产业推广应用。

关键词: 杨梅果粉; 真空干燥; 真空冷冻干燥; 热风-微波联合干燥; 品质

Effect of Drying Methods on Quality Characteristics of Bayberry Powder

LI Wei^{1,2}, GAO Haiyan^{1,2,*}, CHEN Hangjun², WU Weijie²

(1. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
2. Key Laboratory of Fruits and Vegetables Postharvest and Processing Technology Research of Zhejiang Province, Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: This investigation was aimed to study the effect of different drying methods namely, vacuum drying, vacuum-freeze drying and combined hot air-microwave drying on the quality of bayberry powder as indicated by moisture content, solubility, fluidity, color, aroma components, and the contents of VC, anthocyanins and total phenols. Results indicated that bayberry powder produced by vacuum-freeze drying had the lowest moisture content (3.68%), the best solubility (57.68%), fluidity (34.25 °) and color (a^* is 24.48), the least loss of characteristic aroma components, and the highest content of VC, anthocyanin and polyphenols (103.51, 122.81 and 144.59 mg/100 g), followed sequentially by combined hot air-microwave and vacuum drying. Taking into consideration of product quality and drying efficiency and cost, combined hot air-microwave drying was selected as the most suitable method for potential applications in the bayberry powder processing industry.

Key words: bayberry powder; vacuum drying; vacuum-freeze drying; combined hot air-microwave drying; quality characteristics

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201713013

中图分类号: TS255.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2017)13-0077-06

引文格式:

李伟, 郜海燕, 陈杭君, 等. 不同干燥方式对杨梅果粉品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 77-82. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201713013. <http://www.spkx.net.cn>

LI Wei, GAO Haiyan, CHEN Hangjun, et al. Effect of drying methods on quality characteristics of bayberry powder[J]. Food Science, 2017, 38(13): 77-82. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201713013. <http://www.spkx.net.cn>

杨梅 (*Myrica rubra* Sieb.et Zucc.) 属双子叶纲杨梅科杨梅属常绿灌木或小乔木, 我国是杨梅的主产国, 种植面积占世界栽种面积的98.5%以上, 主要分布在浙江、江苏、福建、广东等省份。杨梅果实色泽艳丽、酸甜可

口、风味独特, 富含有机酸、维生素、花色苷和多酚等物质, 具有较高的食用价值和保健功能^[1]。杨梅成熟期集中在高温多雨的梅雨季节, 上市集中, 流通性差, 常温货架期仅1~2 d, 极易霉变腐烂, 严重制约了鲜销产

收稿日期: 2016-08-17

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD0400904); 公益性行业(农业)科研专项(201303073); 国家自然科学基金青年科学基金项目(31501540)

作者简介: 李伟(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与安全。E-mail: weilii0115@163.com

*通信作者: 郜海燕(1958—), 女, 研究员, 博士, 研究方向为食品物流保鲜与质量控制。E-mail: spsgy@163.com

业的发展^[2]。将新鲜杨梅加工成杨梅果粉可降低果实的含水率,从而有效防止产品腐败变质,延长贮藏期,降低包装、贮藏、运输等环节成本。杨梅果粉既能单独食用,也可用作辅料添加到其他食品中以提升相关产品的色泽、性状、营养品质等,用途更加广泛^[3]。

果蔬粉的干燥方法主要包括热风干燥、微波干燥、真空干燥、冷冻干燥、膨化干燥、喷雾干燥等。热风干燥(hot air drying, HA)由于成本低且干燥速率和容量相对较大,应用比较广泛;但是由于干燥过程中需要较长的时间和较高的温度,极易导致营养物质的降解和产品色泽的劣变^[4]。相比于热风干燥,微波干燥(microwave drying, MW)的立体式加热^[5]能够使水分快速蒸发,缩短干燥时间,但是会造成物料局部过热,果粉褐变较为严重。将热风与微波2种方式结合起来,在提高干燥速率、降低能耗、提高产品质量方面具有优势。真空干燥(vacuum drying, VD)通过低压力诱导水分的蒸发,干燥时间随着压力的降低而缩短,可在一定程度上减少干燥过程中植物材料生物活性组分的热降解^[6]。由于干燥过程温度低且不存在液态水,真空冷冻干燥(vacuum-freeze drying, FD)过程中几乎不存在有效成分的热降解,最大程度地保留了果蔬中的生物活性物质,但干燥时间长、能耗高^[7]。有关杨梅干燥产品的研究相关的报道比较少,张国栋^[3]对杨梅粉真空冷冻干燥工艺及贮藏稳定性进行了研究;弓志青^[8]利用响应面分析研究了喷雾干燥杨梅粉的优化工艺,还做了有关喷雾干燥杨梅粉玻璃化转变温度与结块特性研究^[9];解红霞^[10]对冷冻干燥和喷雾干燥的杨梅全粉干燥工艺及贮藏性质进行了研究。但是先前报道的杨梅果粉的干燥方式多为喷雾干燥和真空冷冻干燥,热风-微波联合干燥和真空干燥国内鲜见报道。

本研究比较了3种不同的干燥方式(热风-微波联合干燥、真空干燥和真空冷冻干燥)对杨梅果粉品质的影响,对其理化特性和营养风味做了较为全面的分析比较,以为杨梅果粉的加工提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

杨梅属东魁杨梅,购于浙江仙居,采摘当天用保鲜车运回浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室,4℃条件下贮藏备用。

1.2 仪器与amp;设备

DHG-9079A型电热恒温鼓风干燥箱、DZF-6050型真空干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;Free Zone冻干机 美国Labconco公司;G70F20CN3L-C2(C0)型微波炉 广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;

HGB500组织捣碎机 美国Waring公司;M20研磨机艾卡(广州)仪器设备有限公司;CR-400手持色差仪日本Sensing公司;Hygrolabta台式水分活度仪 瑞士Rotronic公司;差示扫描量热仪、HB43-S卤素水分测定仪 瑞士Mettler Toledo公司;Finnigan Trace GC Ultra Trace DSQ气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)仪 美国Thermo公司;Cintra 20紫外-可见分光光度计 澳大利亚GBC公司。

1.3 杨梅果粉的制备

1.3.1 杨梅干燥前处理

挑选新鲜、成熟、无机械损伤、无腐烂的杨梅,用去核器去除果核后,置于护色液(1%柠檬酸+0.02%乙二胺四乙酸二钠)中浸泡20 min,对杨梅果肉进行基本的护色处理,减轻干燥过程中杨梅花色苷的降解。经护色处理的杨梅果肉沥干后置于组织捣碎机中匀浆,匀浆后的杨梅果浆备用。

1.3.2 干燥条件

每次称取(380±5)g原料在不同干燥方式下进行干燥,各干燥方式的干燥条件在预实验基础上确定。1)真空干燥:温度50℃,真空度0.09 MPa,干燥时间约48 h。2)真空冷冻干燥:−30℃条件下预冻3 h,冷阱温度−82℃,压强0.01 kPa,auto模式自动解析和干燥约36 h。3)微波-热风联合干燥:第一阶段40℃热风干燥约24 h;第二阶段微波干燥功率与质量比2 W/g,间歇式干燥,微波5 min,间歇2 min,微波共计30 min;通过以上干燥方式干燥后物料的水分含量控制在安全水分含量内,均在8%以下^[11]。

1.3.3 制粉

将干燥后的杨梅置于研磨机中打粉,粉碎后过80目筛,过筛后的杨梅果粉备用。

1.3.4 杨梅果粉理化特性测定

1.3.4.1 得率的测定

参照薛志成^[12]的方法,杨梅果粉得率以干燥前杨梅果浆质量与干燥后果粉质量百分比计算,见式(1)。

$$Y\% = \frac{m_d}{m_w} \times 100 \quad (1)$$

式中:Y为得率%; m_d 为干粉质量/g; m_w 为果浆质量/g。

1.3.4.2 水分含量的测定

运用HB43-S卤素水分测定仪,选择Carrot powder方法,按照要求加入适量杨梅果粉,运行方法直至终点后读取仪器示数值即水分含量值。

1.3.4.3 溶解性的测定

称取1 g杨梅干粉于烧杯中,加入100 mL的蒸馏水,高速搅拌5 min,3 000 r/min离心5 min,取上清液25 mL于105℃烘箱中烘干至恒质量,计算上清液中干物质含量所占的比例^[10]。

1.3.4.4 色泽的测定

参照国际照明委员会对物体颜色测定建立的可见光谱的颜色空间标准最常用的Lab色彩空间测定^[13], 采用CR-400手持色差仪测定 L^* 、 a^* 和 b^* 值。

1.3.4.5 休止角 θ 的测定

将漏斗固定在试管架上, 漏斗下端距桌面距离为8 cm, 取20 g杨梅果粉置于漏斗中使其自由下落形成锥形^[14]。测定果粉堆积圆锥的半径 r 与圆锥的高度 h , 以 h 与 r 的比值作正切值来计算休止角见式(2)。

$$\tan\theta = \frac{h}{r} \quad (2)$$

1.3.4.6 堆积密度的测定

将杨梅粉装入10 mL量筒中, 填充至刻度, 振实。杨梅果粉的堆积密度(ρ_b)表示为10 mL单位体积杨梅的质量^[15], 堆积密度计算如式(3)所示。

$$\rho_b / (\text{g/mL}) = \frac{m_2 - m_1}{10} \quad (3)$$

式中: m_1 为量筒的质量/g; m_2 为杨梅果粉和量筒的总质量/g。

1.3.4.7 水分活度的测定

杨梅果粉的水分活度参考Hygrolab水分活度仪说明书测定。

1.3.4.8 玻璃化转变温度的测定

准确称取适量的杨梅果粉放入坩埚中, 压盖备用。空坩埚为参比物, 整个实验在氮气保护下进行。测试程序: 以5 °C/min从20 °C降温至-30 °C, 保温10 min, 再从-30 °C以5 °C/min升温至150 °C。

1.3.4.9 杨梅果粉香气成分测定

香气成分的测定参考Cheng Huan等^[16]方法。

杨梅鲜果前处理: 采用顶空固相微萃取(solid phase micro extraction, SPME), 萃取头型号DVB/CAR/PDMS(50/30 μm)。取6 g杨梅果肉, 置于样品瓶中, 环己酮(0.95 $\mu\text{g/g}$)为内标, 平衡15 min后将老化后的SPME头插入样品瓶中, 45 °C条件下萃取30 min。

杨梅果粉前处理: 采用SPME, 萃取头型号DVB/CAR/PDMS(50/30 μm)。取3 g杨梅果粉, 置于样品瓶中, 环己酮(0.95 $\mu\text{g/g}$)为内标, 平衡15 min后将老化后的SPME头插入样品瓶中, 45 °C条件下萃取30 min。

GC条件: 毛细管柱为DB-1柱(30 m \times 250 μm , 0.25 μm), 以高纯氮气为载气, 恒定流速为1.0 mL/min。柱箱采用程序升温, 起始温度40 °C, 保持2 min, 以5 °C/min升到160 °C, 保持1 min, 再以10 °C/min升到250 °C, 保持4 min。进样口温度250 °C, 采用不分流进样模式。

MS条件: 采用全扫描模式(scan mode)采集信号, 电离方式EI, 电子轰击能量为70 eV; 接口温度280 °C,

离子源温度250 °C, 四极杆温度150 °C, 扫描质量范围 m/z 45.00~350.00, 扫描频率4.58 s^{-1} 。

定性定量分析: 化合物经数据库检索选择较高匹配度的检索结果, 并结合文献报道的已知化合物确认检测物成分。利用内标法, 求得各个不同挥发性化学组分的含量。

1.3.4.10 VC含量的测定

采用分光光度法测定VC含量^[17]。1 g杨梅果粉加入5 mL 20g/L三氯乙酸溶液, 离心, 取上清液。反应体系如下: 提取液0.5 mL、20 g/L三氯乙酸溶液1.5 mL、无水乙醇1 mL、4%磷酸-乙醇溶液0.5 mL、5 g/L邻菲罗啉-乙醇溶液1 mL、0.3 g/L三氯化铁-乙醇溶液0.5 mL; 对照组加2 mL三氯乙酸溶液。将混合液置于30 °C中水浴60 min, 以对照组调零, 534 nm波长处测定吸光度。

1.3.4.11 总酚含量的测定

总酚含量的测定采用Folin-Ciocalteu方法^[18]。取1 g杨梅果粉置于10 mL离心管中, 加入5 mL 80%的乙醇, 超声提取30 min, 离心取上清液。准确量取0.5 mL提取液于25 mL刻度试管中, 蒸馏水定容至6 mL, 摇匀, 再加1 mL福林-酚试剂, 充分摇匀。1 min之后, 加入20%碳酸钠溶液1.5 mL, 混匀定容。30 °C条件下避光0.5 h, 760 nm波长处比色测定吸光度。

1.3.4.12 花色苷含量的测定

花色苷含量的测定采用pH示差法^[13]。取1 g杨梅果粉放入锥形瓶内, 加入5 mL 70%乙醇, 用HCl调节pH 3, 于36 °C条件下浸提2 h, 抽滤或过滤, 取滤液。取0.025 mol/L的氯化钾缓冲液(pH 1)和0.4 mol/L醋酸钠缓冲液(pH 4.5)各9 mL, 分别加入待测样品1 mL, 平衡1 h, 用蒸馏水作空白, 测定 $A_{510 \text{ nm}}$ 和 $A_{700 \text{ nm}}$, 并按式(4)计算稀释样品吸光度 A , 按式(5)计算花色苷含量。

$$A = (A_{510 \text{ nm, pH } 1.0} - A_{700 \text{ nm, pH } 1.0}) - (A_{510 \text{ nm, pH } 4.5} - A_{700 \text{ nm, pH } 4.5}) \quad (4)$$

$$\text{原样中花色苷含量} / (\text{mg}/100 \text{ g}) = \frac{A \times M_r \times \text{DF} \times 100}{\varepsilon \times 1} \quad (5)$$

式中: 相对分子质量 M_r 为449.2; 消光系数 ε 为26 900 mol^{-1} ; 稀释因子DF。

1.4 数据处理

本实验除特殊说明外, 所有指标测定均重复3次, 结果所示数据均为3次平行实验的平均值。采用Excel 2007、SPSS 22.0软件对数据进行分析处理, 用LSD多重比较进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 3种干燥方式对杨梅果粉物理特性的影响

由表1可知, 杨梅果粉的得率和水分含量由大到小依次为: 真空干燥 > 热风-微波联合干燥 > 真空冷冻干

燥, 3种干燥方式所得杨梅果粉水分含量有显著差异 ($P < 0.05$), 真空干燥和热风-微波联合干燥的果粉得率分别为15.97%和15.10%, 差异不显著 ($P > 0.05$), 而真空冷冻干燥脱水较完全, 水分含量和得率均较低。

表1 3种干燥方式对杨梅果粉物理特性的影响
Table 1 Effect of three drying methods on physical properties of bayberry powder

物理特性	干燥方式		
	真空干燥	真空冷冻干燥	热风-微波联合干燥
得率/%	15.97±0.56 ^a	14.41±0.23 ^b	15.10±0.16 ^{ab}
水分含量/%	7.32±0.08 ^a	3.68±0.03 ^c	5.74±0.05 ^b
溶解性/%	49.32±0.32 ^b	57.68±0.27 ^a	35.32±0.52 ^c
休止角/(°)	41.72±0.34 ^a	34.25±0.16 ^b	41.19±0.79 ^a
堆积密度/(g/mL)	0.46±0.03 ^b	0.35±0.02 ^c	0.54±0.02 ^a

注: 同行肩标小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。表3、5同。

溶解性描述了粉末在水溶液中的行为, 是评价果粉优劣的重要指标之一。真空冷冻干燥获得的杨梅果粉溶解性最好, 真空干燥次之; 3种干燥方式所得的杨梅果粉溶解性存在显著差异 ($P < 0.05$)。休止角反映了果粉的摩擦特性和散落性能, 物料休止角越大, 内摩擦力愈大, 流动性越差^[19]。由表1可知, 真空冷冻干燥所得果粉休止角为34.25°, 其流动性最好, 真空干燥和热风-微波联合干燥的休止角分别为41.72°和41.19°, 两者差异不显著 ($P > 0.05$)。不同的干燥方法对果粉的溶解性和流动性均有一定的影响, 真空冷冻干燥果粉水分含量较低, 颗粒间疏松摩擦小, 较大的空隙有利于亲水基对水吸附溶解^[20]。

就商业角度而言堆积密度存在一定的经济价值, 堆积密度越大, 包装和运输成本越低^[21]。干燥温度和干燥时间对堆积密度有较大的影响, 干燥温度是杨梅果粉堆积密度的主要影响因素; 3种干燥方式所得杨梅果粉堆积密度存在显著性差异 ($P < 0.05$), 依次为: 热风-微波联合干燥 > 真空干燥 > 真空冷冻干燥。造成这一现象的原因可能是热风-微波干燥过程中, 微波阶段物料温度快速升高使物料部分发生碳化, 致使堆积密度变大^[7]; 真空冷冻干燥过程中, 干燥温度较低, 脱水较完全, 使得冻干粉表面疏松多孔且颗粒间空隙较大, 堆积密度较小。

2.2 3种干燥方式对杨梅果粉色泽的影响

表2 3种干燥方式对杨梅果粉色泽的影响
Table 2 Effect of three drying methods on color of bayberry powder

干燥方式	L^*	a^*	b^*
新鲜杨梅	35.54±0.93 ^c	22.54±0.07 ^a	11.24±0.04 ^a
真空干燥	52.47±0.21 ^a	12.84±0.03 ^c	8.02±0.06 ^b
真空冷冻干燥	53.95±0.60 ^a	24.48±0.09 ^a	11.85±0.15 ^a
热风-微波联合干燥	48.08±0.46 ^b	16.44±0.73 ^b	5.68±0.48 ^c

注: 同列肩标小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

由表2可知, 干燥后的杨梅果粉的亮度 (L^*) 较新鲜杨梅亮度均有所提高, 真空干燥和真空冷冻干燥的杨

梅果粉亮度差异不显著 ($P > 0.05$), 热风-微波干燥后的杨梅果粉亮度相对较低。真空冷冻干燥杨梅果粉的 a^* 与 b^* 值与新鲜杨梅相比也略有升高, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。这表明真空冷冻干燥过程中干燥温度较低, 对杨梅中的花色苷等呈色物质破坏较小, 能够较好地保持杨梅原有的色泽。热风-微波联合干燥杨梅果粉 a^* 值大于真空干燥, 但两者均小于真空冷冻干燥, 原因可能是热风-微波联合干燥与真空干燥在加热过程引起的酶褐变、氧化型褐变以及花色苷降解使得 a^* 值下降, 但热风-微波联合干燥过程中干燥时间短且温度低, 所以 a^* 值较真空干燥高。

2.3 3种干燥方式所得杨梅果粉的玻璃化转变温度

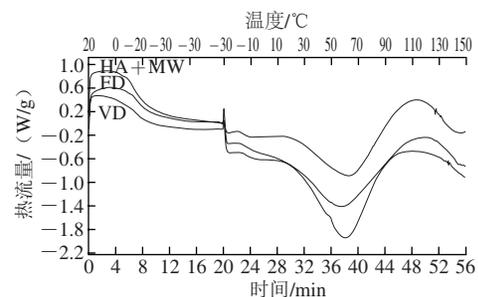


图1 3种干燥方式杨梅果粉DSC曲线

Fig. 1 Typical DSC thermograms of bayberry powder produced by three drying methods

玻璃化转变温度 (T_g) 是指非晶态聚合物 (包括晶态聚合物的非晶态部分) 从玻璃态到橡胶态或橡胶态到玻璃态转变的特征温度^[22]。玻璃化转变温度可以用作参考参数来表征食品的性质, 质量和稳定性^[23]。水分活度是指系统中水分存在的状态, 即水分的结合程度 (游离程度), 根据水分活度理论, 食品在 (或低于) 其单分子层含水率时贮藏最稳定^[24]。不同干燥方式所得杨梅果粉的玻璃化转变温度结合其水分含量、水分活度指标, 可以对判断、预测食品的货架期、贮藏期和选择适宜的杨梅果粉加工与贮藏条件提供参考, 确保其贮藏质量、安全性和稳定性^[25]。由图1可知, 杨梅果粉玻璃化转变出现在整个过程的22~26 min之间。由表3可知, 3种干燥方式的玻璃化转变温度由高到低依次为真空冷冻干燥 > 真空干燥 > 热风-微波联合干燥, 真空干燥和热风-微波联合干燥的玻璃化转变温度差异不显著 ($P > 0.05$); 水分活度由高到低依次为热风-微波联合干燥 > 真空干燥 > 真空冷冻干燥。不同干燥方式所得杨梅果粉水分活度越高其玻璃态转变温度越低, 这与弓志青等^[9]的研究结果一致。

表3 3种干燥方式对杨梅果粉的水分活度和玻璃化转变温度的影响
Table 3 Effect of three drying methods on water activity and glass transition temperature of bayberry powder

指标	干燥方式		
	真空干燥	真空冷冻干燥	微波-热风联合干燥
水分活度	0.338±0.060 ^a	0.204±0.030 ^b	0.372±0.070 ^a
玻璃化转变温度/°C	-13.390±0.395 ^b	-11.290±0.005 ^a	-13.740±0.215 ^b

2.4 3种干燥方式对杨梅果粉挥发性成分的影响

表4 3种干燥方式对杨梅果粉挥发性成分的影响

Table 4 Effect of three drying methods on volatile composition of bayberry powder

编号	化合物	化学式	挥发性物质含量/($\mu\text{g}/100\text{g}$)			
			新鲜杨梅	真空冷冻干燥	真空干燥	热风-微波联合干燥
醛类						
1	糠醛	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$	—	—	41.99	107.64
2	正己醛	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	11.29	—	—	—
3	2-己烯醛	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$	11.55	—	—	—
4	5-羟甲基糠醛	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_3$	—	—	—	11.59
5	反式-2-辛烯醛	$\text{C}_8\text{H}_{14}\text{O}$	0.53	—	—	—
6	反式-2-壬醛	$\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}$	0.82	19.54	17.12	—
7	椰子醛	$\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}_2$	1.04	12.40	—	—
	总和		25.23	31.94	59.11	119.23
醇类						
8	糠醇	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$	—	—	—	1.83
9	叶醇	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	0.74	57.57	—	—
10	正己醇	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	0.99	58.05	—	—
11	2-乙基己醇	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	1.15	—	—	—
12	壬醇	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$	1.11	106.30	—	21.44
13	顺-3-壬烯-1-醇	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$	2.92	23.48	—	—
14	3,6-亚壬基-1-醇	$\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}$	—	22.29	—	—
15	芳樟醇	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	16.88	79.02	12.58	24.32
16	4,4-二甲基四环十三烷醇	$\text{C}_{13}\text{H}_{24}\text{O}$	26.01	76.28	21.71	36.87
17	石竹烯醇	$\text{C}_{15}\text{H}_{26}\text{O}$	—	—	—	3.24
	总和		49.80	422.99	34.29	87.70
萜烯类						
18	3-萜烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	3.13	12.40	—	—
19	罗勒烯异构体混合物	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	—	65.12	3.07	—
20	罗勒烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	—	—	15.41	27.88
21	别罗勒烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	0.74	10.66	3.63	10.42
22	异丁子香烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	11.62	495.70	—	34.78
23	反式石竹烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	306.38	5 223.82	2 400.70	2 794.22
24	α -葎草烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	14.15	341.35	226.73	200.94
25	葎烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	0.66	—	—	5.62
26	摩勒烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	—	10.74	11.54	8.46
27	β -瑟琳烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	—	39.97	33.95	27.85
28	α -瑟琳烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	2.23	32.02	33.31	28.48
29	α -法尼烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	2.57	11.30	34.70	17.24
30	杜松二烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	—	16.20	6.32	9.29
31	α -广藜香萜烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	—	—	20.52	—
	总和		341.48	6 265.98	2 789.88	3 165.18
其他						
32	十四烷	$\text{C}_{14}\text{H}_{30}$	—	—	3.34	0.85
33	十六酸乙酯	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$	—	5.05	—	—
34	异香橙烯环氧化物		3.42	52.82	7.74	—
35	石竹烯氧化物		70.97	209.74	99.66	91.91
36	2-正戊基咪唑	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}$	—	29.42	—	2.64
	总和		74.39	293.03	110.74	95.4

注：— 未检出。

新鲜东魁杨梅中主要芳香成分为萜烯类化合物(69.56%)，其次为醇类化合物(26.09%)；其中反式石竹烯含量最高，是杨梅鲜样中主要的呈味物质，醛类物质一般阈值很低，即使含量很低也可对水果风味产生较大的贡献^[26]。从3种杨梅果粉中共分离鉴定出32种主要组分，如表4所示，其中醛类4种、醇类9种、萜烯

类14种及其他5种，其中含量较高的成分为反式石竹烯、异丁子香烯、 α -葎草烯、糠醛、壬醇、石竹烯氧化物等。真空冷冻干燥杨梅果粉的挥发性组分共24种，其组成与杨梅鲜样最接近，干燥过程中醛类物质损失较严重，其他成分变化较小仅有少量的萜烯类和脂类物质生成，这说明真空冷冻干燥能够较好地保持杨梅的原有香气，但因物料在真空低温条件下放置时间较长，可能会发生一些化学反应导致物料中的香气成分损失以及新的香气成分产生^[27]。热风-微波联合干燥和真空干燥的杨梅果粉分离鉴定出挥发性物质分别为21种和18种，挥发性组分损失较严重尤其是醛醇类物质，反式石竹烯等主要的香气物质与真空冷冻干燥相比有所减少；在干燥过程中由于加热生成了特征性的香气成分糠醛类物质，可能的原因是真空干燥和微波-热风干燥过程长时间的加热造成呈味物质的分解同时造成香气组分的相互转换和增多。

2.5 3种干燥方式对杨梅果粉营养成分的影响

表5 3种干燥方式对杨梅果粉VC、总酚、花色苷含量的影响

Table 5 Effect of three drying methods on the contents of VC, total phenol and anthocyanins in bayberry powder

指标	干燥方式		
	真空干燥	真空冷冻干燥	热风-微波联合干燥
花色苷含量	77.09 \pm 0.54 ^c	122.81 \pm 0.41 ^a	93.31 \pm 0.79 ^b
总酚含量	74.72 \pm 1.47 ^c	144.59 \pm 3.19 ^a	122.81 \pm 0.33 ^b
VC含量	70.33 \pm 1.60 ^b	103.51 \pm 1.75 ^a	55.24 \pm 0.52 ^b

花色苷是杨梅中主要的呈色物质，能够清除自由基、螯合金属离子、结合蛋白等，具有强抗氧化作用^[28]；多酚类物质同样具有较强的抗氧化功能，通过抑制氧化过程中的酶活性来抑制或减弱氧化反应的产生^[29]。如表5所示，3种干燥方式所得杨梅果粉中总酚和花色苷含量高低依次为：真空冷冻干燥>热风-微波联合干燥>真空干燥。花色苷的结构不稳定，在加工过程中易受到各种理化因素的影响发生降解。真空冷冻干燥温度较低，能较好地保持冻干粉中的总酚和花色苷；热风-微波联合干燥和真空干燥在热处理过程中造成了抗氧化活性物质的损失，而真空干燥时间较长且温度比热风-微波联合干燥稍高，造成花色苷和总酚含量均显著低于热风-微波联合干燥($P<0.05$)。

VC性质不稳定，对光、热和空气敏感，易被氧化^[30]。

3种干燥方式所得杨梅果粉VC含量依次为：真空冷冻干燥>真空干燥>热风-微波联合干燥，其中真空干燥和热风-微波联合干燥所得果粉VC含量无显著性差异($P>0.05$)。说明在干燥过程中氧气和温度是影响VC稳定性的主要因素，真空干燥过程的低氧环境有利为VC的保持，但干燥时间相对较长对VC造成了一定的损失；热风-微波联合干燥虽然缩短了干燥时间，但微波干燥的过程中物料温度过高，造成VC的大量氧化降解。

3 结论

通过实验比较了真空干燥、真空冷冻干燥和热风-微波联合干燥对杨梅果粉理化特性和营养风味的影响,可为杨梅的干燥工艺提供数据支持,为杨梅果粉的加工产业提供参考。结果表明:真空冷冻干燥杨梅果粉水分含量和堆积密度相对较低,色泽、流动性、溶解性较好,对香气成分和营养物质的保持较好,其综合品质最好;其次是热风-微波联合干燥果粉;真空干燥果粉品质较差。真空冷冻干燥时间长,生产成本低;真空干燥过程中产生的大量的冷凝水,需要配备一套抽水蒸气的真空设备,增加了成本,且真空干燥本身效率不高;热风-微波联合干燥缩短了干燥时间,且成本相对较低,杨梅果粉品质相对较好,相对适宜在杨梅果粉的加工产业推广。

参考文献:

- [1] 蒋依辉, 钟云, 曾继吾, 等. 杨梅成熟期间有机酸、糖的动态变化分析[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 235-238. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201318048.
- [2] 陈文烜, 邵海燕, 房祥军, 等. 快速预冷对杨梅采后生理和品质的影响[J]. 中国食品学报, 2010, 10(3): 169-174. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2010.03.025.
- [3] 张国栋. 杨梅粉真空冷冻干燥工艺及质量稳定性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012: 10-13.
- [4] WOJDYLO A, FIGIEL A, LECH K, et al. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(3): 829-841. DOI:10.1007/s11947-013-1130-8.
- [5] ZIELINSKA M, MICHALKA A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 671-680. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.06.003.
- [6] LEWICHI P P. Design of hot air drying for better foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(4): 153-163. DOI:10.1016/j.tifs.2005.10.012.
- [7] MICHALSKA A, WOJDYLO A, LECH K, et al. Physicochemical properties of whole fruit plum powders obtained using different drying technologies[J]. Food Chemistry, 2016, 207: 223-232. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.03.075.
- [8] 弓志青. 速溶杨梅-甘蓝固体饮料的加工及贮藏工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 39-54.
- [9] 弓志青, 陈相艳, 程安玮, 等. 喷雾干燥杨梅粉玻璃化转变温度和结块特性研究[J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(2): 43-46. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2013.02.009.
- [10] 解红霞. 杨梅全粉干燥工艺及贮藏性质的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2015: 18-19.
- [11] 陈瑞娟, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对胡萝卜粉品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 48-53. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201411010.
- [12] 薛志成. 如何确定出粉率计算模式[J]. 西部粮油科技, 2002, 27(4): 18-19. DOI:10.3969/j.issn.1007-6395.2002.04.007.
- [13] GIUSTI M M, WROLSTAD R E. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy[M]// WROLSTAD R E, ACREE T E, DECKER E A, et al. Current protocols in food analytical chemistry. Hoboken: John Wiley and Sons, 2001: 63-69. DOI:10.1002/0471142913.faf0102s00.
- [14] MIN Z, ZHANG C J, SHRESTHA S. Study on the preparation technology of superfine ground powder of agrocybe chaxing Huang[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(3): 333-337.
- [15] BHUSARI S N, MUZAFFAR K, KUMAR P. Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder[J]. Powder Technology, 2014, 266: 354-364. DOI:10.1016/j.powtec.2014.06.038.
- [16] CHENG Huan, CHEN Jianle, LI Xin, et al. Differentiation of the volatile profiles of Chinese bayberry cultivars during storage by HS-SPME-GC/MS combined with principal component analysis[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 100: 59-72. DOI:10.1016/j.postharvbio.2014.09.003.
- [17] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 39-41.
- [18] SELLAPPAN S, AKOCH C C, KREWER G. Phenolic compounds and antioxidant capacity of Georgia-grown blueberries and blackberries[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(8): 2432-2438. DOI:10.1021/jf011097r.
- [19] 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. DOI:10.13543/j.cnki.bhxbzr.2012.05.003.
- [20] 叶磊, 邵海燕, 周拥军, 等. 热风干燥与真空冷冻干燥对桑葚果粉品质的影响比较[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(2): 155-159. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2014.02.042.
- [21] BHANDARI B, BANSAL N, ZHANG M, et al. Handbook of food powders: processes and properties[M]. Sawston: Handbook of Food Powders Processes & Properties, 2015: 16-19.
- [22] ISLAM M Z, KITAMURA Y, YAMANO Y, et al. Effect of vacuum spray drying on the physicochemical properties, water sorption and glass transition phenomenon of orange juice powder[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 169: 130-141. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.08.024.
- [23] 石启龙, 赵亚, 马占强. 真空干燥雪莲果粉玻璃化转变温度与贮藏稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 215-219. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.036.
- [24] 李琳, 万素英. 水分活度(a_w)与食品防腐[J]. 中国食品添加剂, 2000(4): 33-37.
- [25] 周顺华, 陶乐仁, 刘宝林. 玻璃化转变温度及其对干燥食品加工贮藏稳定性的影响[J]. 真空与低温, 2002, 8(1): 46-50.
- [26] 程焕, 陈健乐, 林雯雯, 等. SPME-GC/MS联用测定不同品种杨梅中挥发性成分[J]. 中国食品学报, 2014, 14(9): 263-270.
- [27] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201322036.
- [28] 钟兰兰, 屠迪, 杨亚, 等. 花青素生理功能研究进展及其应用前景[J]. 生物技术进展, 2013(5): 346-352. DOI:10.3969/j.issn.2095-2341.2013.05.07.
- [29] 王霄霄. 不同品种杨梅果实品质和抗氧化活性的比较[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 5-7.
- [30] 朱庆珍. HPLC法测定枇杷和杨梅中维生素C的含量[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(5): 133-134. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2010.05.039.