

贺州香芋分段式微波真空干燥工艺及风味研究

卢 辉^{1,2} 罗 源² 龚钰雯^{1,2} 宋泳鑫² 李官丽² 罗杨合^{1,2} 黎小椿²

(1. 广西科技大学生物与化学工程学院, 广西 柳州 545006;

2. 贺州学院广西康养食品科学与技术重点实验室, 广西 贺州 542899)

摘要: [目的] 针对香芋及其速冻产品贮藏运输成本高、新鲜香芋干燥效率低、香芋全粉风味缺失等产业共性问题, 研究分段式微波真空干燥香芋工艺条件及香芋全粉的风味特征。[方法] 以贺州香芋为研究对象, 通过分析干燥曲线特点确定微波真空干燥模式, 通过分析白度值、干燥时间和感官评价结果确定最佳工艺, 采用固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术分析香芋全粉的风味特征。[结果] 分段式微波真空干燥贺州香芋的最佳工艺为真空度—95 kPa, 加速阶段微波功率 12.0 kW、干燥温度范围 60~70 °C、转换时间 12 min, 降速阶段微波功率 6.0 kW、干燥温度范围 40~60 °C, 样品干燥至含水率≤4%, 总耗时 34 min。最佳工艺条件下的香芋全粉香芋风味浓郁, 共检出 12 种挥发性风味成分, 其中关键挥发性风味成分 9 种, (E)-6,10-二甲基-5,9-十一烷二烯-2-酮可能是贺州香芋特有的风味成分。[结论] 分段式微波真空干燥是提高新鲜香芋干燥效率和提升香芋全粉风味的有效途径。

关键词: 香芋; 分段式微波真空干燥; 固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术; 风味特征

Segmented microwave vacuum drying process and flavor of Hezhou taro

LU Hui^{1,2} LUO Yuan² GONG Yuwen^{1,2} SONG Yongxin² LI Guanli² LUO Yanghe^{1,2} LI Xiaochun²

(1. College of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology,

Liuzhou, Guangxi 545006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Health Care Food Science and

Technology, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to solve the common problems in the taro industry, such as the high storage and transportation cost of taro and its quick-frozen products, the low drying efficiency of fresh taro, and the flavor loss of taro powder by investigating the conditions of segmented microwave vacuum drying process of taro and the flavor characteristics of taro powder. [Methods] By taking Hezhou taro as the research object, the microwave vacuum drying mode was determined by analyzing the characteristics of the drying curve, and the optimal process was determined by analyzing the whiteness value, drying time, and sensory evaluation results. The flavor characteristics of taro powder were analyzed by using solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS) technology. [Results] The optimal process of segmented microwave vacuum drying for Hezhou taro was as follows: vacuum degree of -95 kPa, microwave power of 12.0 kW at acceleration phase with drying temperature range of 60~70 °C, conversion time of 12 min, microwave power of 6.0 kW at deceleration phase with drying temperature range of 40~60 °C, moisture content of the sample to drying ≤4%, and total time consumption of 34 min. The taro powder obtained under the optimal process had a strong taro flavor, and a total of 12 volatile flavor components were detected, including nine key volatile flavor components, of which (E)-6,10-dimethyl-5,9-undecadien-2-one might be a unique flavor component of Hezhou taro. [Conclusion] Segmented microwave vacuum drying is an effective way to improve the drying efficiency of fresh taro and strengthen the taro flavor of taro powder.

Keywords: taro; segmented microwave vacuum drying; solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; flavor characteristic

基金项目: 广西重点研发计划 (编号: 桂科 AB23049007); 中央引导地方科技发展专项资金项目 (编号: 贺科 ZY2023004); 广西科技计划项目 (编号: 桂科 AC22080007)

通信作者: 罗杨合 (1969—), 男, 贺州学院教授, 广西科技大学硕士生导师, 博士。E-mail: luoyanghe@hzxy.edu.cn

黎小椿 (1987—), 女, 贺州学院高级实验师, 硕士。E-mail: 277792205@qq.com

收稿日期: 2024-07-13 **改回日期:** 2024-11-29

香芋又名槟榔芋,是一种营养丰富、风味独特、大众喜爱的大宗农产品。新鲜香芋容易腐烂,贮藏损耗严重。速冻可以减少香芋腐烂损失,但加工、贮藏和运输成本高。将香芋干燥后制成香芋全粉,既可解决上述产业难题,又可扩大香芋在食品加工中的应用^[1]。目前,常见的香芋干燥方法主要有日晒、热风干燥、喷雾干燥、真空冷冻干燥等。华军利等^[2]报道了60℃低温热风干燥所得香芋全粉的综合品质最佳,但耗时长,香芋风味缺失。杨玉等^[3]发现,热风干燥处理的香芋片中挥发性成分最少。张浪等^[4]优化得到香芋粉喷雾干燥的最佳工艺条件为55℃烫漂10 min、进风温度180℃、进料速度50 mL/min、料液质量浓度0.1 g/mL,但得率低,香芋香味不浓。林捷等^[5]报道了真空冷冻干燥得到的香芋片基本能保持原有的色、香、味、形,但能耗高、耗时长、操作复杂。因此,常见的香芋干燥方法普遍存在干燥效率低、香芋风味损失严重的共性问题。

微波真空干燥是一种干燥效率高、所得产品风味品质好的新技术^[6]。谭德馨等^[7]采用恒定式微波真空干燥,真空度-95 kPa下得到的马蹄脆片色泽白亮,酥脆可口,马蹄风味浓厚。叶大鹏等^[8]采用分段式微波真空干燥莲子,其蛋白质含量、膳食纤维含量和干燥速率均远高于恒定式微波真空干燥。丁宏斌等^[9]采用微波真空干燥籽瓜固形物,发现随着真空度的增大,物料水分比的下降速率增加,干燥效率提高,保证了籽瓜固形物的综合品质,提高了产品附加值。解梦梦^[10]采用分段式微波真空干燥豆渣,其干燥速率、复水率、可溶性膳食纤维含量、持水性和膨胀性均高于恒定式微波真空干燥。综上,高真空度有利于提高物料干燥效率,分段式微波真空干燥的效果优于恒定式微波真空干燥,成为食品干燥领域关注的焦点。目前,有关分段式微波真空干燥技术干燥香芋的研究尚未见报道。

研究拟以贺州香芋^[11]为研究对象,选取大容量的生产型干燥设备,最大真空度-95 kPa进行试验,在恒定真空度下,采用分段式微波真空干燥技术和固相萃取一气相色谱一质谱联用技术(SPME-GC-MS),考察分段式干燥对其品质、风味的影响,为提高新鲜香芋干燥效率和提升香芋全粉的香芋风味提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

香芋:挑选新鲜、大小均匀、无腐烂、无机械损伤的贺州香芋,市售。

1.1.2 主要仪器设备

快速水分测定仪:HX204型,梅特勒-托利多科技(中国)有限公司;

微波真空动态干燥机:VP-018AV型,上海镭泰微波设备制造有限公司;

红外测温仪:DM-5002型,杭州德力西集团有限公司;

色彩色差计:CR-400型,日本柯尼卡美能达公司;

磁力搅拌器:MR Hei-Tec(CN)型,德国 Heidolph 公司;

气相色谱一质谱联用仪:Trace 1300-ISQ QD型,美国 Agilent公司;

高速粉碎机:DFY-600D型,温岭市林大机械有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备 新鲜香芋清洗、去皮、切片,厚度1 cm,称取4 kg新鲜香芋片均匀铺至干燥框,备用。将微波真空干燥所得香芋片粉碎,过80目筛备用。

1.2.2 干燥指标测定

(1) 含水率、干基含水率和干燥速率:根据GB 5009.3—2016,新鲜香芋片含水率为79%,即绝干率为21%;分别按式(1)~式(3)计算含水率、干基含水率和干燥速率^[12]。

$$W_t = \frac{m_t - m}{m_t} \times 100\%, \quad (1)$$

$$M_t = \frac{m_t - m}{m} \times 100\%, \quad (2)$$

$$X_i = \frac{M_i - M_{i+1}}{t_{i+1} - t_i}, \quad (3)$$

式中:

W_t ——香芋片 t 时刻的含水率, %;

M_t ——香芋片 t 时刻的干基含水率, %;

m_t ——香芋片 t 时刻的质量, g;

m ——香芋片的绝干质量, g;

X_i ——香芋片 i 时刻的干燥速率, g/(g·min);

M_i ——香芋片 i 时刻的干基含水率, %;

M_{i+1} ——香芋片 $i+1$ 时刻的干基含水率, %;

$t_{i+1} - t_i$ —— $i+1$ 、 i 时刻的时间差值, min。

(2) 温度:采用红外测温仪测定香芋片表面温度。

(3) 色泽:参考文献[13]测定香芋片表面的白度值,即 L^* 值。

1.2.3 “热失速”临界温度的确定 将装有4 kg样品的干燥框放入微波真空干燥机内腔中,真空度调至-95 kPa,微波功率分别为6.0, 9.0, 12.0 kW,干燥温度范围40~120℃,样品每干燥3 min测温、称重一次。当含水率≤4%时停止干燥,绘制时间—温度变化特性曲线。根据曲线特点,确定样品的“热失速”临界温度和干燥温度范围。根据样品的干基含水率和干燥速率,绘制时间—干基含水率曲线和干基含水率—干燥速率曲线。

1.2.4 感官评价 由 10 位食品专业人员组成感官评价小组,采用盲样评定方法按表 1 对香芋片的气味、外形、质地进行感官评价,结合色差值确定微波真空干燥香芋片的最佳工艺。

表 1 微波真空干燥香芋片的感官评分标准

Table 1 Sensory scoring criteria of taro chips by microwave vacuum drying

指标	评分标准	分值
气味(40)	无香芋味	0~15
	略有香芋味	16~30
	香芋味浓郁	31~40
外形(30)	皱缩严重,破损严重	0~10
	稍有皱缩,稍有破损	11~20
	形状完整,无破损	21~30
质地(30)	硬度极大或极小,质地非常粗糙	0~10
	硬度较大或较小,质地较粗糙	11~20
	硬度适中,质地光滑	21~30

1.2.5 挥发性成分分析 称取 5 g 香芋全粉置于 20 mL 顶空瓶,迅速密封,置于水浴恒温加热磁力搅拌器中,插入萃取头,设置转速为 100 r/min,80 °C 下吸附 40 min 后,250 °C、GC 进样口解析 1.5 min。

(1) GC 条件: TG-5MS 色谱柱(30.00 mm×0.25 mm, 0.25 μm),进样口温度 250 °C,载气为高纯度氮气(纯度≥99.999%),流速 1.000 mL/min,不分流进样。升温程序为初始温度 45 °C,保持 5 min;以 6 °C/min 升至 100 °C,保持 3 min;以 10 °C/min 升至 180 °C,保持 5 min;以 10 °C/min 升至 250 °C,保持 3 min。

(2) MS 条件:电子电离源,电子电离能量 70 eV;离子源温度 230 °C,传输线温度 250 °C,四级杆温度 150 °C,全扫描监测模式,质量扫描范围 30~500 m/z,质谱库为 NIST 11。

(3) 定性与定量分析:采用 Xcalibar 软件进行分析,将检测到的质谱信息与 Library-Mainlib 标准普库相匹配,仅选取正反匹配度均>800 或有一个>900(最大值为 1 000)的挥发性成分,结合保留时间进行定性,用峰面积归一化法分析各组分相对含量。

1.2.6 相对气味活度值(ROAV)测定 按式(4)计算挥发性风味物质的 ROAV^[14-15]。

$$ROVA = \frac{C_{ri}}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

C_{ri} 、 T_i ——挥发性风味物质 i 的相对含量(%)及对应的气味阈值(ng/g);

C_{max} 、 T_{max} ——对总体风味贡献最大组分的相对含量

(%)及对应的气味阈值(ng/g)。

1.3 数据处理

各试验重复 3 次,结果用平均值±标准差表示;采用 Origin 2024,Excel 2022 软件进行数据分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 “热失速”临界温度及干燥温度范围

由图 1 可知,起始 3 min 左右,香芋片吸收了微波热量导致表面温度迅速升高至 40 °C 左右,然后保持上升,且微波功率越大上升期越短。这是由于香芋片吸收微波热量的速率与水分迁移带走热量的速率大致相等,香芋片中的大部分水分在此过程中被除去,微波功率越大,香芋片吸收热量越多,水分蒸发越快,温度上升期越短。干燥结束阶段,6, 9, 12 kW 对应的香芋片的表面温度分别从 74.47, 74.37, 72.97 °C 迅速上升至 100 °C 以上,部分香芋片中心出现烧焦现象,颜色呈焦黄色并伴有烧焦味。这是由于香芋片水分散失过多、内部热量迅速积累导致温度迅速上升而造成的“热失速”现象^[16]。香芋片的“热失速”现象发生在 72.97~74.47 °C,微波功率越大,发生“热失速”现象越快。为避免香芋片在干燥过程中出现烧焦现象,选择香芋片的“热失速”临界温度为 70 °C,确定干燥温度范围为 40~70 °C。

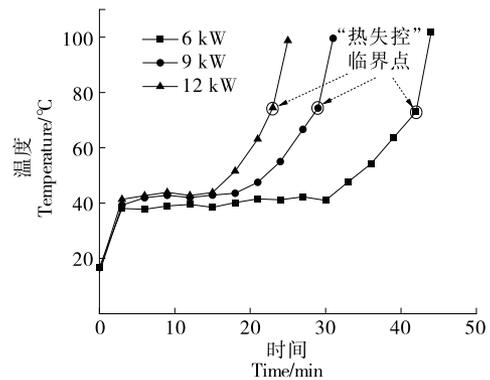


图 1 不同微波功率下干燥香芋片的时间—温度变化曲线
Figure 1 Time-temperature variation curves of drying taro chips at different microwave powers

2.2 香芋片的干燥特性曲线

由图 2 可知,随着干燥时间的延长,香芋片的干基含水率逐渐减小,微波功率越大,干燥至所需干基含水率用时越短。这是因为微波功率越大,穿透力越强,香芋片吸收的能量密度越大,传热和水分蒸发越快,干燥时间越短,与微波功率越大香芋片干燥结束所需时间越短结论一致。

由图 3 可知,从横坐标右侧的干燥开始阶段往左,香芋片由于不断吸收热量导致干基含水率逐渐降低,微波功率越大,香芋片吸收的热量越多,同一时间下的干燥速

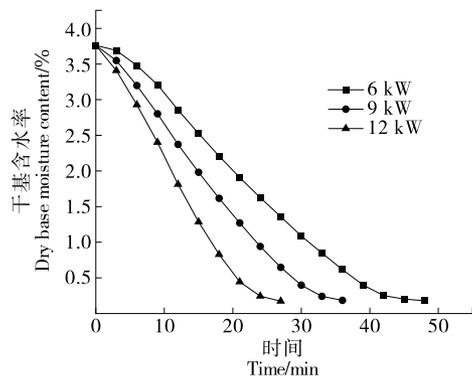


图2 微波功率对香芋片干基含水率的影响

Figure 2 Effect of microwave power on drying base moisture content of taro chips

率越大。不同微波功率下干燥开始阶段均为加速阶段, 12 min(第5个数据点)时达到最大干燥速率。降速阶段, 微波功率为12, 9, 6 kW所需干燥时间分别为15, 24, 36 min, 即微波功率越大干燥时间越短。这是由于微波功率越大, 香芋片吸收的能量越多, 水分蒸发越快。

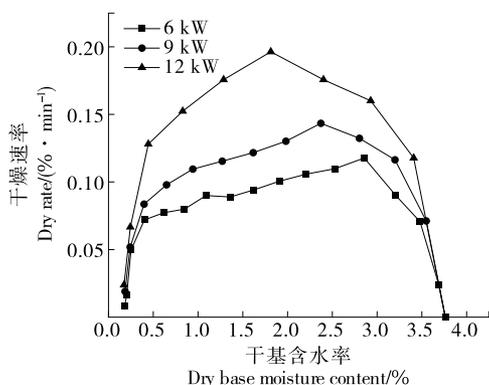


图3 微波功率对香芋片干燥速率的影响

Figure 3 Effect of microwave power on drying rate of taro chips

综上, 微波真空干燥香芋片可分为加速阶段和降速阶段。因此, 设计表2所示的分段式微波真空干燥香芋片试验方案, 其中样品质量、含水率、真空度等条件与1.2.3的一致。

表2 分段式微波真空干燥香芋片试验方案

Table 2 Experimental scheme of taro chips by segmented microwave vacuum drying

模式	加速阶段		转换时 间/min	降速阶段	
	功率/kW	温度/°C		功率/W	温度/°C
模式1	12.0	60~70	12	9.0	40~60
模式2	12.0	60~70		6.0	40~60
模式3	9.0	60~70		6.0	40~60

2.3 分段式微波真空干燥香芋片的最佳工艺

经色差仪测定, 模式1、2、3所得香芋片的白度值分别为91.54, 92.86, 90.01, 模式2所得香芋片的品质最好^[17]。这是由于模式1的加速阶段和降速阶段的微波功率均最大, 香芋片表面水分快速干燥时产生少许焦黄色, 导致白度值低于模式2; 而模式3是由于干燥时间太长导致白度值降低。

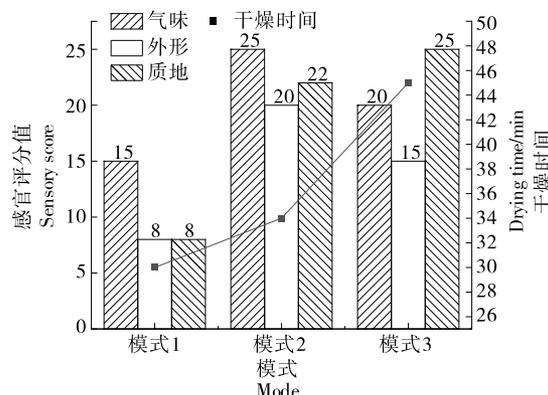


图4 分段式微波真空干燥香芋片的时间和感官评价结果

Figure 4 Time and sensory evaluation results of taro chips by segmented microwave vacuum drying

由图4可知, 模式1、2、3的干燥时间分别为30, 34, 45 min。结合表2可知, 不管是加速阶段还是降速阶段, 微波功率越大, 干燥时间越短。

香芋片气味、外形的感官评分均为模式2>模式3>模式1, 质地的感官评分为模式3>模式2>模式1。这是因为微波功率越大, 样品温度升高越快, 气味散失越严重, 外形和质地受破坏的程度越大^[18], 所以模式1的各项感官评分最低。但微波功率过小, 样品温度升高太慢, 干燥时间太长, 会导致样品气味散失过多, 质地受到破坏, 故模式2的感官评分高于模式3。

综上, 模式2最适合干燥香芋片, 由此确定分段式微波真空干燥香芋片的最佳工艺为真空度-95 kPa, 加速阶段微波功率12.0 kW、干燥温度范围60~70 °C、转换时间12 min, 降速阶段微波功率6.0 kW、干燥温度范围为40~60 °C, 样品干燥至含水率≤4%, 总耗时34 min。

2.4 香芋全粉的挥发性成分分析

由表3可知, 3种干燥模式所得香芋全粉中共检出99种挥发性成分。不同模式下检出的同一种挥发性成分的相对含量存在一定差异, 可能是其前体物质在干燥过程中发生美拉德反应或脂肪降解所致^[26]。39种共同挥发性成分中, 已明确风味特征的有12种, 包括醛类7种、醇类3种、酮类1种、烃类1种。其中, 模式2有8种挥发性风味成分相对含量高于模式1和模式3, 其香芋风味最浓郁, 与其气味感官评分最高的结果一致。

表 3 不同干燥模式下香芋全粉的挥发性成分含量[†]

Table 3 Volatile component content of taro powder obtained from different drying modes

类别	化合物	风味特征 ^[19-25]	相对含量/%			
			模式 1	模式 2	模式 3	
醛类	壬醛	柑橘、玫瑰香	15.64±2.11	16.62±3.66	12.84±1.09	
	癸醛	甜香、花香	4.04±0.25	9.15±1.40	4.17±0.06	
	乙醛	清香、脂香	1.03±0.83	1.23±0.42	1.06±0.62	
	正辛醛	高度稀释有甜橙、蜂蜜香	1.44±0.44	1.16±0.07	0.79±0.03	
	十一醛	脂蜡香、花香	0.82±0.05	0.91±0.10	0.44±0.13	
	十二烷基醛	—	0.61±0.08	0.87±0.65	0.55±0.06	
	庚醛	稀释后具有甜杏、坚果香	0.24±0.01	0.22±0.04	0.16±0.04	
	2,6-壬二烯醛	黄瓜香	0.15±0.03	0.23±0.08	0.08±0.01	
	反-2-辛烯醛	脂香	0.20±0.02	0.19±0.02	—	
	(Z)-2-壬烯醛	甜橙香、脂香	1.60±0.35	—	—	
	醇类	2-己基-1-辛醇	薄荷香	2.94±0.25	1.19±0.01	2.52±0.28
		辛醇	柠檬香	1.42±0.29	1.71±0.27	1.26±0.18
1-辛烯-3-醇		蘑菇香	0.21±0.05	0.38±0.04	0.04±0.03	
反式-9-十六烯-1-醇		—	0.43±0.08	0.47±0.07	0.49±0.07	
2-乙基-1-十二醇		—	0.34±0.10	0.30±0.13	0.30±0.05	
十六烷硫醇叔		—	0.10±0.04	0.02±0.01	0.07±0.02	
2-己基癸醇		—	—	0.59±0.06	0.40±0.05	
十一醇		脂香、果香	0.56±0.20	—	0.51±0.16	
9-十六烯-1-醇		—	—	1.00±0.16	1.03±0.07	
(Z)-2-辛烯-1-醇		青草香	—	0.27±0.01	—	
2-甲基-1-十六醇		—	—	0.08±0.01	—	
E-2,13-十八碳二烯-1-醇		甜香	—	0.07±0.01	—	
酯类		亚硫酸戊基十四烷基酯	—	0.77±0.18	0.72±0.11	0.75±0.12
		十六酸甲酯	—	0.22±0.12	0.30±0.18	0.67±0.14
	邻苯二甲酸二丁酯	—	0.12±0.11	0.16±0.26	0.34±0.07	
	9,12-十八碳二烯酸甲酯	—	—	0.03±0.00	0.03±0.02	
	1,2-苯二甲酸二(甲基环己基)酯	—	0.35±0.06	—	—	
	邻苯二甲酸己-3-基异丁酯	—	—	0.36±0.45	—	
	10-十八碳烯酸甲酯	—	—	0.03±0.00	—	
	邻苯二甲酸二异丁酯	微芳香味	—	—	15.8±1.69	
	环己基异硫氰酸酯	—	—	—	0.29±0.06	
	二氯乙酸十四烷基酯	—	—	—	0.22±0.05	
	反式-6-十八烯酸甲酯	—	—	—	0.12±0.17	
	酮类	(E)-6,10-二甲基-5,9-十一烷二烯-2-酮	花香、果香	2.91±0.04	3.03±0.09	2.27±0.23
		N-[4-溴正丁基]-2-哌啶酮	—	0.66±0.08	0.78±0.07	0.99±0.13
		3,4-环氧-3-乙基-2-丁酮	—	—	0.08±0.00	—
3-辛烯-2-酮		—	—	0.06±0.00	—	
6-甲基-5-庚烯-2-酮		—	—	—	0.04±0.02	
酸类	正十六烷酸	微脂香	—	0.17±0.02	—	
烃类	十四烷	—	20.20±75.16	17.41±2.22	13.80±1.20	
	十二烷	—	8.83±2.61	8.78±1.08	6.47±1.18	

续表 3

类别	化合物	风味特征 ^[19-25]	相对含量/%		
			模式 1	模式 2	模式 3
烃类	<i>d</i> -柠檬烯	柑橘果香	3.68±0.38	3.55±0.32	2.95±0.30
	十六烷	—	3.51±1.18	2.20±1.40	2.41±0.79
	3-甲基十三烷	—	2.84±0.19	2.69±0.35	3.97±0.23
	(R,1E,5E,9E)-1,5,9-三甲基-12-(丙-1-烯-2-基)环十四烷-1,5,9-三烯	—	1.81±0.67	1.27±0.36	2.51±0.12
	4-甲基十四烷	—	1.42±0.12	1.64±0.29	1.58±0.08
	3-甲基十五烷	—	1.52±0.20	1.37±0.26	1.61±0.27
	2,6,10-三甲基十三烷	—	1.51±0.44	1.09±0.66	1.15±0.29
	2,6,10-三甲基十五烷	—	1.39±0.29	0.66±0.32	0.51±0.14
	丁基化羟基甲苯	—	1.00±0.25	0.94±0.31	0.85±0.13
	2-乙基-1-十二烯	—	0.93±0.13	1.37±0.20	1.27±0.13
	1,2,3-三甲基-4-((<i>E</i>)-丙-1-烯基)萘	—	0.82±0.22	0.47±0.34	1.01±0.32
	5-甲基十三烷	—	0.64±0.12	0.51±0.04	0.64±0.03
	十一烷	—	0.56±0.34	0.66±0.26	0.33±0.21
	7-甲基十五烷	—	0.51±0.14	0.44±0.25	0.44±0.12
	8-丙氧基-柏木烷	—	0.42±0.15	0.38±0.33	0.32±0.12
	2,3-二甲基十一烷	—	0.27±0.02	0.22±0.04	0.35±0.07
	2,6,11,15-四甲基十六烷	—	0.21±0.12	0.16±0.03	0.19±0.02
	7-甲基十七烷	—	0.81±0.18	0.38±0.07	—
	(-)- α -椰油烯	—	0.65±0.01	0.59±0.16	—
	2-溴十二烷	—	0.43±0.08	0.39±0.05	—
	1,2-环氧癸烷	—	0.30±0.09	0.41±0.13	—
	3-甲基十七烷	—	0.11±0.04	0.12±0.02	—
	2-甲基二十烷	—	0.10±0.02	—	0.08±0.00
	2,7,10-三甲基十二烷	—	—	0.54±0.11	0.54±0.08
	2,6,10,14-四甲基十七烷	—	—	0.39±0.16	0.33±0.09
	(<i>E</i>)-2-十二烯	—	—	0.34±0.06	0.22±0.09
	十七烷	—	—	0.22±0.18	0.29±0.10
	贝壳木-16-烯	—	—	0.01±0.00	0.20±0.03
	十五烷	—	5.24±1.13	—	—
	(<i>Z</i>)-3-十六碳烯	—	1.09±0.17	—	—
	庚基环己烷	芳香味	0.48±0.10	—	—
	2,6,11-三甲基十二烷	—	—	4.26±0.23	—
	[1R-(1R*,4Z,9S*)],4,11,11-三甲基-8-亚甲基-双环[7.2.0]十一碳-4-烯	—	—	0.81±0.05	—
	顺式-1-己基-2-丙基环丙烷	—	—	0.45±0.07	—
	4-甲基十六烷	—	—	0.32±0.09	—
	6-甲基十三烷	—	—	0.31±0.01	—
	2-甲基十六烷	—	—	0.10±0.04	—
	2,3,5,8-四甲基癸烷	—	—	0.05±0.00	—
	β -石竹烯	松油味、木质香	—	—	1.04±0.08
	2,6,10-三甲基十二烷	—	—	—	0.73±0.07
	5-丙基十五烷	—	—	—	0.56±0.08

续表 3

类别	化合物	风味特征 ^[19-25]	相对含量/%		
			模式 1	模式 2	模式 3
烃类	10-甲基二十碳烷	—	—	—	0.52±0.05
	3,5,24-三甲基四碳烷	—	—	—	0.32±0.04
	2,5-二甲基十二烷	—	—	—	0.32±0.02
	2,7,10-三甲基十二烷	—	—	—	0.26±0.02
	10-甲基十一烷	—	—	—	0.25±0.06
	10-甲基十九烷	—	—	—	0.27±0.01
	4-乙基十四烷	—	—	—	0.36±0.07
	2-甲基十八烷	—	—	—	0.15±0.03
	2-甲基十三烷	—	—	—	0.11±0.05
杂环及 其他类	1-亚甲基-1H-茛	—	0.08±0.01	0.09±0.01	0.07±0.03
	辛基十四烷基醚	—	1.37±0.30	—	1.26±0.20
	2-十二烯基-丁二酸酐	—	0.04±0.02	—	—
	壬基十四烷基醚	—	—	1.15±0.30	—
	十二烷基壬基醚	—	—	0.43±0.13	—
	正庚基羟胺	—	—	—	0.65±0.08
	2,2',5,5'-四甲基联苯基	—	—	—	0.22±0.07
	N,N-二乙基甲酰胺	—	—	—	0.07±0.03

† “—”表示未检出。

由表 4 可知,模式 1、2、3 中分别检出挥发性成分 53、67、68 种,说明挥发性成分种类与微波功率大小、干燥时间长短有关。醛类物质的气味阈值较低、气味强烈,是食品风味的主要来源。模式 2 的醛类相对含量远高于模式 1 和模式 3,故其气味感官评分最高。酯类物质也是食品风味另一主要来源,模式 3 的酯类相对含量远远高于模式 1,故其气味感官评分高于模式 1。

表 4 不同干燥模式下香芋全粉挥发性成分类别及相对含量[†]

Table 4 Comparison of volatile components and relative contents of taro powder obtained from different drying modes

类别	模式 1		模式 2		模式 3	
	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%
醛类	10	25.77	9	30.58	8	20.09
醇类	7	6.00	11	6.08	9	6.62
酯类	4	1.46	6	1.60	8	18.22
酮类	2	3.57	4	3.95	3	3.30
酸类	0	0.00	1	0.17	0	0.00
烃类	29	61.71	37	55.95	38	49.50
杂环及其他类	3	1.49	3	1.67	5	2.27
合计	53	100.00	67	100.00	68	100.00

综上,模式 2 的干燥效率、白度值、感官评分最高,为分段式微波真空干燥香芋片的最佳工艺。

2.5 香芋关键挥发性风味物质分析

由表 5 可知,模式 2 样品中共检出 12 种挥发性风味成分,ROAV>1 的 9 种,为贺州香芋的关键挥发性风味物质,对香芋的总体风味贡献较大;0.1<ROAV<1 的 1 种,对贺州香芋的总体风味有修饰作用;ROAV<0.1 的 2 种,对贺州香芋的总体风味无实际影响。9 种关键挥发性风味物质的协同作用形成了贺州香芋特有的风味特征。其中,8 种关键挥发性风味物质在文献^[27-28]中有所报道,但(E)-6,10-二甲基-5,9-十一烷二烯-2-酮在香芋风味研究文献中未见报道,可能是贺州香芋特有的特征风味物质,有待进一步证实。综上,分段式微波真空干燥是提升香芋全粉风味的有效途径。

3 结论

根据干基含水率—干燥速率曲线特点,采用分段式微波真空干燥技术干燥贺州香芋片,通过干燥效率、白度值和感官评价结果确定最佳工艺条件为真空度—95 kPa,加速阶段微波功率 12.0 kW、干燥温度范围 60~70 °C、转换时间 12 min,降速阶段微波功率 6.0 kW、干燥温度范围 40~60 °C,样品干燥至含水率≤4%,总耗时 34 min,此条件下的香芋全粉香芋风味浓郁。在检出的 12 种挥发性风味成分中,关键挥发性风味物质有

表 5 香芋全粉的挥发性风味成分 ROAV

Table 5 Comparison of ROAV for volatile flavor components of taro powder

名称	风味特征	相对含量/	气味阈值/(ng·g ⁻¹)	ROAV
2,6-壬二烯醛	黄瓜香	0.23±0.08	0.01	138.39±48.13
壬醛	柑橘、玫瑰香	16.62±3.66	1.00	100.00±6.00
正辛醛	高度稀释有甜橙、蜂蜜香	1.16±0.07	0.70	99.71±0.60
<i>d</i> -柠檬烯	柑橘果香	3.55±0.32	34.00	66.75±0.06
癸醛	甜香、花香	9.15±1.40	1.00	55.05±8.40
(<i>E</i>)-6,10-二甲基-5,9-十一烷二烯-2-酮	花香、果香	3.03±0.09	2.36	7.73±0.23
乙醛	清香、脂香	1.23±0.42	1.50	4.93±1.68
1-辛烯-3-醇	蘑菇香	0.38±0.04	1.50	1.52±0.16
十一醛	脂蜡香、花香	0.91±0.10	5.00	1.10±0.12
庚醛	稀释后具有甜杏、坚果香	0.22±0.04	3.00	0.44±0.08
辛醇	柠檬香	1.71±0.27	110.00	0.09±0.00
2-己基-1-辛醇	薄荷香	1.19±0.01	120.00	0.06±0.00

9种,其中(*E*)-6,10-二甲基-5,9-十一烷二烯-2-酮可能是贺州香芋特有的风味物质。综上,分段式微波真空干燥是提高新鲜香芋干燥效率和提升香芋全粉风味的有效途径。

参考文献

- [1] 胡冰洋, 段振华. 香芋的加工利用研究进展[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(8): 31-34.
HU B Y, DUAN Z H. Research advancement on processing and utilization of fragrant taro[J]. Food and Nutrition in China, 2016, 22(8): 31-34.
- [2] 华军利, 卢苑, 曾婷. 不同干燥条件对张溪香芋全粉品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(6): 33-36.
HUA J L, LU Y, ZENG T. Effect of different drying conditions on quality of Zhangxi taro flour[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(6): 33-36.
- [3] 杨玉, 梁端, 宋佩, 等. 干燥方式对香芋片挥发性物质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 171-179.
YANG Y, LIANG D, SONG P, et al. Effects of different drying methods on volatile substances of taro slices[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 171-179.
- [4] 张浪, 雷华平, 张辉, 等. 香芋粉喷雾干燥工艺研究[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(1): 14-17.
ZHANG L, LEI H P, ZHANG H, et al. Study on spray drying of taro powder[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(1): 14-17.
- [5] 林捷, 蒋妲, 林晓静, 等. 炭布香芋真空冷冻干燥工艺研究[J]. 现代食品科技, 2006, 22(4): 118-121.
LIN J, JIANG D, LIN X J, et al. Investigation of vacuum freeze drying process of Tanbu's taro[J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 22(4): 118-121.
- [6] 姚志勇, 万金庆, 庞文燕, 等. 微波低温真空干燥技术的应用研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 40(13): 106-109.
YAO Z Y, WAN J Q, PANG W Y, et al. Advances in application studies on the technology of microwave low-temperature vacuum dehydration[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(13): 106-109.
- [7] 谭德馨, 唐小闲, 张奕涛, 等. 马蹄脆片微波真空干燥工艺优化及其水分变化[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(3): 107-115.
TAN D X, TANG X X, ZHANG Y T, et al. Optimization of microwave vacuum drying process for water chestnut crisps and its moisture change[J]. Food Research and Development, 2024, 45(3): 107-115.
- [8] 叶大鹏, 崔蕴涵, 翁海勇, 等. 莲子间歇式微波分段变功率真空干燥方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 288-295.
YE D P, CUI Y H, WENG H Y, et al. Lotus seed drying by intermittent phased varying power microwave under vacuum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 288-295.
- [9] 丁宏斌, 吴亮, 臧泽鹏, 等. 籽瓜固形物微波真空干燥特性及其品质研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(8): 88-94.
DING H B, WU L, ZANG Z P, et al. Study on microwave vacuum drying characteristics and quality of seed melon solids [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 88-94.
- [10] 解梦梦. 豆渣分段变温真空微波干燥及咀嚼片研制[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021.
XIE M M. Development of segmented variable temperature vacuum microwave drying and chewable tablets of soybean dregs[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021.
- [11] 麦达远. 贺州香芋无公害高产栽培技术[J]. 南方园艺, 2009, 20(4): 58-59.
MAI D Y. Harmless and high-yield cultivation technology of Hezhou taro[J]. South Horticulture, 2009, 20(4): 58-59.

- [12] 张鹏飞, 薛东晓, 程春, 等. 人造米热风干燥特性及干基含水率预测模型[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(3): 33-38.
ZHANG P F, XUE D X, CHENG C, et al. Hot air drying characteristics of artificial rice and prediction model of dry base moisture content[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(3): 33-38.
- [13] FENG L, XU Y, XIAO Y, et al. Effects of pre-drying treatments combined with explosion puffing drying on the physicochemical properties, antioxidant activities and flavor characteristics of apples[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128015.
- [14] 罗静, 李敏, 张莹, 等. 电子鼻结合 GC-MS 分析不同干燥方式对罗非鱼片挥发性风味成分的影响[J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 135-143.
LUO J, LI M, ZHANG Y, et al. Effect of different drying methods on volatile components of tilapia fillets analyzed by electronic nose combined with GC-MS[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(1): 135-143.
- [15] 王丹, 丹彤, 孙天松, 等. SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析单菌及复配发酵牛乳中关键性风味物质[J]. 食品科学, 2017, 38(8): 145-152.
WANG D, DAN T, SUN T S, et al. Analysis of key volatile compounds in fermented cow milk produced by pure and mixed cultures by SPME-GC-MS combined with ROAV[J]. Food Science, 2017, 38(8): 145-152.
- [16] 张志勇, 李元强, 刘成海, 等. 基于“热失控”规律的香菇微波干燥工艺优化[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 230-237.
ZHANG Z Y, LI Y Q, LIU C H, et al. Optimization of microwave drying of shitake mushrooms considering thermal runaway[J]. Food Science, 2020, 41(10): 230-237.
- [17] 唐小闲, 唐文称, 任爱清, 等. 不同加工方式对柿子脆片物理特性及营养品质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 185-191.
TANG X X, TANG W C, REN A Q, et al. Comparative analysis of physical characteristics and nutritional quality of persimmon chips prepared using different processing methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 185-191.
- [18] WU X F, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Effects of microwave-assisted pulse-spouted bed freeze-drying (MPS-FD) on volatile compounds and structural aspects of *Cordyceps militaris*[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(12): 4 634-4 643.
- [19] 李官丽, 吴秋月, 陈锡霞, 等. 干燥方式对油茶粉品质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 210-216.
LI G L, WU Q Y, CHEN X X, et al. Effects of drying methods on the quality and volatile flavor compounds of oil tea powder[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 210-216.
- [20] 陈俊宇, 凌建刚, 杜丽慧, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同干燥方式花菇的挥发性风味成分差异[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 43-52.
CHEN J Y, LING J G, DU L H, et al. Differences in volatile components between different drying methods of *Lentinus edodes* analyzed by GC-IMS[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 43-52.
- [21] WANG K, MU N, LI L, et al. Analysis of aroma components in fermented sausage with different starter cultures[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(14): 177-181, 196.
- [22] 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.
- [23] LIU H. Study on techniques of flavoring based on Maillard reaction and comparison of flavor with related products[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2010.
- [24] 庞凌云, 詹丽娟, 李家寅, 等. 干燥方式对铁棍山药片挥发性风味成分的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 301-314.
PANG L Y, ZHAN L J, LI J Y, et al. Effects of drying methods on the volatile components of *dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun Slices[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 301-314.
- [25] 张宁, 陈海涛, 孙宝国, 等. 固相微萃取和同时蒸馏萃取方法比较传统腊牛肉的风味成分[J]. 中国食品学报, 2016, 16(6): 247-258.
ZHANG N, CHEN H T, SUN B G, et al. A comparison of solid-phase microextraction with simultaneous distillation for the analysis of volatile aroma compositions in traditional preserved beef[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(6): 247-258.
- [26] 张思颖, 罗凤莲, 邓森, 等. 干燥及冷冻处理对囊荷花苞挥发性成分的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 159-166.
ZHANG S J, LUO F L, DENG M, et al. Effects of drying and freezing on volatile components of *Zingiber mioga* (Thunb.) Rose[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 159-166.
- [27] 黎小椿, 罗杨合, 梁宁, 等. 不同蒸制时间下红芽芋的风味品质评价[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 230-239.
LI X C, LUO Y H, LIANG N, et al. Evaluation of flavor quality of red bud taro steamed for different time periods[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 230-239.
- [28] 李官丽, 苏可珍, 聂辉, 等. 基于 SPME-GC-MS 技术优化荔浦芋挥发性物质的萃取条件[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(10): 68-77.
LI G L, SU K Z, NIE H, et al. Optimization of extraction conditions of Lipu taro volatile substances based on SPME-GC-MS technology[J]. China Food Additives, 2023, 34(10): 68-77.