

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81137

干燥方式对香芋条干燥特性及品质的影响

李晓云¹ 谢荣华² 陈 胜² 韩春阳³ 陈俊亮⁴ 任爱清^{1,3} 段振华^{1,3}

(1. 大连工业大学食品学院, 辽宁 大连 116034; 2. 贺州市农村技术发展中心, 广西 贺州 542899; 3. 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; 4. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000)

摘要: [目的] 减少采收香芋腐烂变质, 提高香芋干燥品质。[方法] 分析了真空微波干燥(VMD)、热风干燥(HAD)、热泵干燥(HPD)、远红外辐射干燥(FIRD) 4 种干燥方式对香芋条干燥特性、物理特性(复水率、硬度、色差)、水分迁移和分布情况及微观结构的影响。[结果] 香芋干燥效率方面, VMD 的自由水脱除时间最短, HAD 和 HPD 的次之; 色泽方面, L^* 值大小顺序为 HAD>HPD>FIRD>VMD; 硬度方面, VMD>FIRD>HPD>HAD; 复水率方面, FIRD>HPD>HAD>VMD。微观结构显示, VMD 和 HAD 香芋条表面收缩明显, 结构更致密; FIRD 和 HPD 香芋条表面结构较疏松, 孔道较多。[结论] HAD 香芋条品质更佳。

关键词: 香芋条; 干燥方式; 水分迁移; 微观结构; 品质

Effects of different drying methods on drying characteristics and quality of taro strips

LI Xiaoyun¹ XIE Ronghua² CHEN Sheng² HAN Chunyang³ CHEN Junliang⁴ REN Aiqing^{1,3}
DUAN Zhenhua^{1,3}

(1. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China;

2. Hezhou Rural Development Center, Hezhou, Guangxi 542899, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Health

Care Food Science and Technology, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China; 4. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: [Objective] To reduce postharvest spoilage of taro and improve the drying quality of taro strips. [Methods] Four drying methods, *i.e.*, vacuum microwave drying (VMD), hot air drying (HAD), heat pump drying (HPD), and far-infrared radiation drying (FIRD), were used to analyze their effects on the drying characteristics, physical properties (rehydration ratio, hardness, and color difference), moisture migration and distribution, and microstructure of taro strips. [Results] In terms of drying efficiency, VMD demonstrated the shortest free water removal time, followed by HAD and HPD. For color performance, the L^* value followed the order HAD>HPD>FIRD>VMD. In terms of hardness, the order was VMD>FIRD>HPD>HAD, while for rehydration ratio, the sequence was FIRD>HPD>HAD>VMD. Microstructural analysis showed that VMD- and HAD-treated taro strips exhibited significant surface shrinkage and denser structures, while FIRD- and HPD-treated samples showed looser surface structures with more porous channels. [Conclusion] HAD-treated taro strips demonstrated superior overall quality.

Keywords: taro strips; drying method; water migration; microstructure; quality

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目(编号:32160573); 广西重点研发计划项目(编号:桂科 AB23049007); 河南洛阳市科技计划项目(编号:2302021A)

通信作者: 任爱清(1984—), 男, 贺州学院教授, 博士。E-mail: 258032771@qq.com

收稿日期: 2027-11-07 **改回日期:** 2025-07-01

引用格式: 李晓云, 谢荣华, 陈胜, 等. 干燥方式对香芋条干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 196-202.

Citation: LI Xiaoyun, XIE Ronghua, CHEN Sheng, et al. Effects of different drying methods on drying characteristics and quality of taro strips[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 196-202.

香芋(*Colocasia esculenta*),天南星科芋属,是重要的蔬菜和粮食作物,富含粗蛋白、淀粉、粗纤维、多糖、多酚等物质^[1]。香芋块茎中水分含量高,保质期较短;而季节性较强更限制了新鲜香芋的供应。干燥可减少香芋采收腐烂变质并延长产品的保质期^[2]。干燥后的香芋可作为香芋系列食品加工的重要原料,例如香芋全粉、芋泥、膨化香芋等。

目前,果蔬干燥常用的方式有真空微波干燥(VMD)、热风干燥(HAD)、热泵干燥(HPD)、远红外辐射干燥(FIRD)、真空冷冻干燥(VFD)等。程新峰等^[3]研究了香芋微波真空干燥中水分扩散特性,但未与其他干燥方式进行比较;林芳等^[4]、华军利等^[5]分别采用热泵干燥、热风干燥香芋粒和香芋片,拟合出热泵干燥、热风干燥动力学模型,但未分析其干燥后的品质;张浪等^[6]利用喷雾干燥技术确定了香芋粉喷雾干燥的最佳工艺,分析了其干燥过程中的水分变化规律;裯莉婷^[7]采用热风干燥—真空微波联合干燥香芋片,得出联合干燥的拟合模型及水分迁移规律,但未分析联合干燥下的微观结构变化;Wei等^[8]利用热风干燥—真空微波组合干燥技术研究了联合干燥下香芋片的品质变化及营养损失程度,但未分析其水分迁移变化规律;杨玉等^[9]对比了热风干燥、直触超声强化热风干燥、远红外辐射干燥、直触超声强化远红外辐射干燥和冷冻干燥5种干燥方式对香芋品质的影响,主要侧重于探索超声、远红外辐射辅助干燥对香芋品质的影响;林捷等^[10]采用真空冷冻干燥香芋脆片,得到了香芋脆片最佳生产工艺,但未分析香芋脆片的微观结构、水分迁移规律等。综上,有关香芋干燥的研究主要集中在单一干燥方式、联合干燥方式对香芋品质的影响及动力学模型的建立等方面,而有关香芋在干燥过程中水分迁移规律及品质变化等研究较少。

研究拟采用VMD、HAD、HPD和FIRD 4种常用的干燥方式对香芋条进行干燥,全面探讨其对香芋条干燥特性、水分迁移、微观结构和品质等方面的影响,为高质量香芋干燥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

新鲜香芋:市售;

水分测定仪:MX-50型,广州艾安得仪器有限公司;

真空微波干燥机:WBZ-10PLC型,贵阳新奇微波工业有限公司;

远红外干燥辐射干燥箱:HYHG-II-72型,上海跃进医疗器械有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9123A型,上海一恒科技有限公司;

闭环除湿热泵干燥机:WRH-100AB型,正旭新能源

设备科技有限公司;

物性测试仪:TA.XT PLUS型,英国 Stable Micro System公司;

色彩色差计:CR-400型,柯尼卡美能达(中国)投资有限公司;

核磁共振成像分析仪:NMI20型,苏州纽迈电子科技有限公司;

扫描电镜:S4800型,日本 Hitachi High-Tech Group 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 香芋前处理 将新鲜、无虫害、无损伤的香芋去皮后,切成6 mm×6 mm×20 mm条状。

1.2.2 干燥方法 采用VMD(微波强度1.0 W/g、真空度0.095 MPa)、HAD(温度60℃、相对湿度65%、风速1.0 m/s)、HPD(温度60℃、相对湿度65%、风速1.0 m/s)、FIRD(辐射距离10 cm、风速1.0 m/s、温度60℃)4种干燥方式对香芋条进行干燥。

1.2.3 含水率测定 分别按式(1)、式(2)计算含水率和干燥速率。

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g}, \quad (1)$$

$$V = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中:

M_t ——物料在 t 时刻的干基含水量,g/g;

m_t ——香芋条干燥至 t 时刻的总质量,g;

m_g ——绝干物料质量,g;

V ——干燥速率,g/(g·min);

$M_{t+\Delta t}$ ——物料在 $t+\Delta t$ 时刻的干基含水率,g/g;

Δt ——时间差,min^[11]。

1.2.4 低场核磁与MIR成像 利用低场核磁共振(LF-NMR)技术分析香芋条的横向弛豫时间(T_2)反演图谱和核磁共振成像(MRI)图像,探究香芋条在干燥过程中的水分状态及变化规律^[3]。干燥过程中每隔30 min采用五点取样,取出香芋条置于直径为12 mm的核磁线圈中,磁温保持(32±0.01)℃。硬脉冲90°脉宽5 μs,硬脉冲180°脉宽25 μs,重复采样间隔时间1 500 ms,射频延累加采样次数4,回波时间0.2 ms,回波个数7 000,反演迭代次数300 000。以自旋回波SE序列得到质子密度图像。主要参数:切片数量1,层宽3 mm,扫描次数4,回波时间18.124 ms,重复时间500 ms,选择纵剖面进行观察。

1.2.5 色泽测定 利用色彩色差计测定香芋条颜色 L^* (亮度)、 a^* (红色)和 b^* (黄色)。按式(3)计算总色差(ΔE)。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}, \quad (3)$$

式中:

L_0^*, a_0^*, b_0^* ——新鲜香芋条的颜色值;

L^*, a^*, b^* ——干燥香芋条的颜色值。

ΔE 越小,干燥后的香芋条与鲜芋的色泽越接近^[12]。

1.2.6 硬度测定 参照文献[9]的方法稍作修改。采用伸缩模式,使用 P2 型探头,测前距离 5 mm,测试距离 10 mm,测前速度 1 mm/s,测试速度 1 mm/s,测后速度 10 mm/s。

1.2.7 复水率测定 参照文献[13]的方法并修改。香芋条于蒸馏水中浸泡 2 h,用滤纸吸去表面水分,按式(4)计算复水率。

$$RR = \frac{M_0}{M_f} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

RR ——复水率,%;

M_0, M_f ——复水前后香芋条的质量,g。

1.2.8 香芋条品质指标加权综合评分测定 参照文献[14]。硬度、色泽和复水率 3 个指标加权系数分别为 0.5, 0.3, 0.2,并按式(5)~式(7)计算加权综合评分。

$$\text{对于正向指标: } Y = \frac{A - A_0}{A_1 - A_0}, \quad (5)$$

$$\text{对于逆向指标: } Y = \frac{A_1 - A}{A_1 - A_0}, \quad (6)$$

$$W = 0.5a + 0.3b + 0.2c, \quad (7)$$

式中:

Y ——加权评分;

A ——测定值;

A_0 ——测定最小值;

A_1 ——测定最大值;

W ——加权综合评分;

a ——硬度评分;

b ——色差评分;

c ——复水率评分。

1.2.9 扫描电镜 采用扫描电子显微镜进行分析。将

4 种香芋条切成 $2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 薄片,在 5 kV 加速电压及真空条件下,将香芋薄片样品表面镀金后观察其微观结构,放大倍数 250 倍^[15]。

1.3 数据分析

所有指标重复测定 3 次,采用 Excel、SPSS 26.0 软件进行数据分析,Origin 2022 软件绘图。

2 结果分析

2.1 香芋条的干燥特性

由图 1(a)可知,VMD、HAD、HPD 和 FIRD 所需干燥时间分别为 180, 210, 300, 240 min。VMD 干燥时间最短,HPD 的最长。根据图 1(b),VMD 主要存在升速—降速阶段;而 HAD、HPD、FIRD 有一段短暂的恒定阶段。干燥前期,VMD 干燥速率曲线在最上方,干燥速度最快,干燥速率曲线呈先快速上升再下降最后基本恒定的趋势。其次是 HAD、HPD 干燥速率曲线呈先快速上升再基本恒定最后快速下降的趋势。FIRD 干燥速率曲线在最下方,干燥速度最慢。这可能是香芋条表面形成了一层干燥薄膜,阻碍了自由水从内部迁移至香芋条表面蒸发。干燥后期,FIRD 干燥速率最快,由于水蒸气压的增加,样品中的孔隙打开更多,内部少量的半结合水被蒸发,因此干燥速率加快^[16-17]。HPD 的循环风使热量从外部传递到材料内部,传热方向与水分迁移方向相反,干燥速度相对较慢^[18]。当干燥时间不断延长,香芋条内部的自由水逐渐被蒸发,而结合水紧靠着氢键与蛋白质中的极性基团相结合,难以有效去除,故干燥速率显著降低。

2.2 香芋条干燥过程中水分迁移及分布

新鲜香芋中有 3 个 T_2 , 分别对应结合水 T_{21} (0.1~1.0 ms), 不易流动水 T_{22} (1~10 ms) 和自由水 T_{23} (100~1 000 ms)。由图 2 可知,干燥初期鲜芋中自由水含量较高,且延长干燥时间后,芋条内部的细胞结构逐渐被破坏,细胞外和液泡间的水分不断向外移动,不易流动水和自由水出现较明显变化。相较于其他 3 种干燥方式,

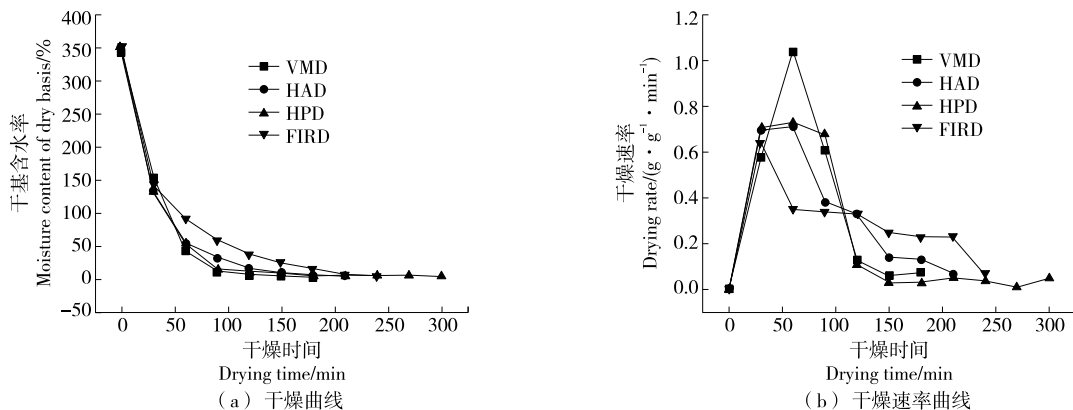


图 1 不同干燥方式下香芋条的干燥曲线和干燥速率曲线

Figure 1 Drying curve and drying rate curve of taro strips with different drying methods

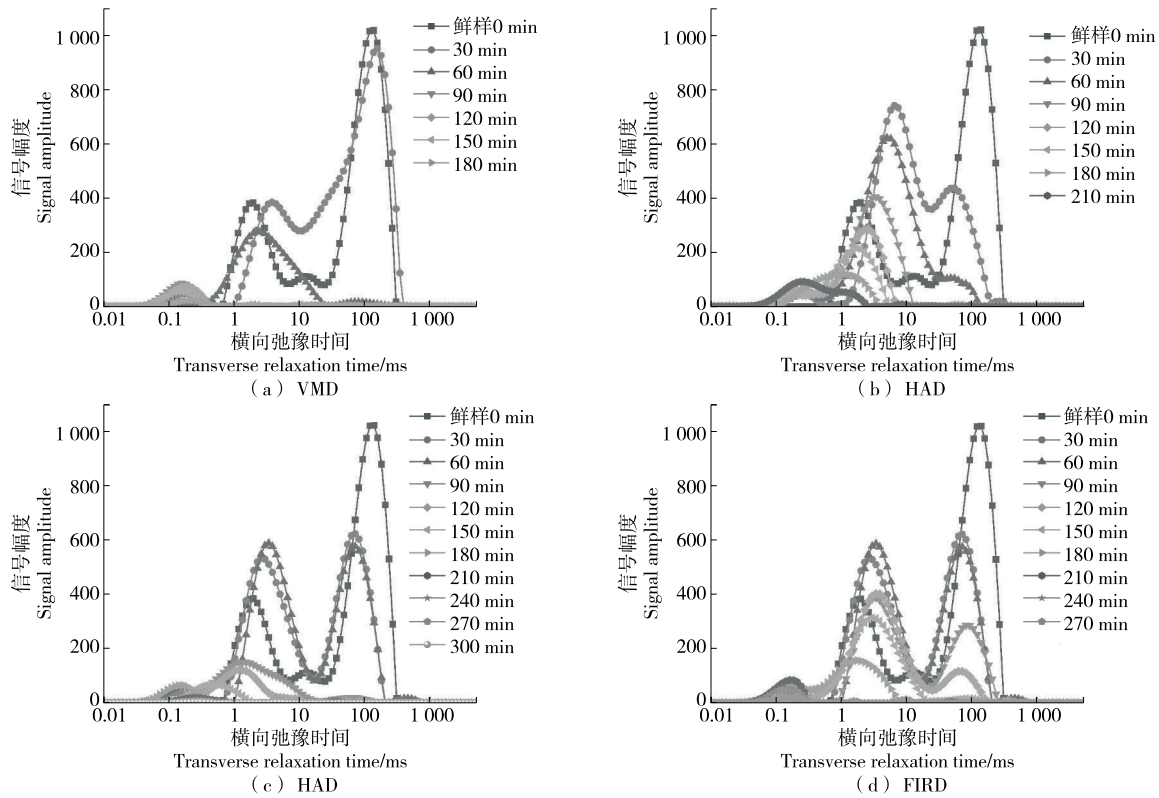


图2 不同干燥方式下香芋条的弛豫时间曲线

Figure 2 Relaxation time curves of taro strips with different drying methods

VMD在30 min后 T_{23} 迅速向左移动,表明其自由水迅速减少; T_{22} 也逐渐减小,表明其水分的流动性逐渐降低,60 min后基本未检测到 T_{23} 。这可能是VMD在干燥初期微波辐射致使物料内部水分子吸收能量向外迅速迁移,提高了干燥速度并降低了能耗^[19-20]。HAD的 T_{23} 逐渐向左移动,与 T_{22} 存在部分融合现象,部分自由水向结合水转变;HPD、FIRD的峰形基本相同,其自由水逐渐向半结合水转变,主要以不易流动水为主。4种干燥方式在干燥初期均表现出自由水相对含量整体呈快速减少,不易流动水增加的趋势,尤其是VMD,这可能是干燥后期由于微波辐射不均导致样品的细胞结构被破坏,不易流动水与细胞中的大分子紧密结合,水分无法完全蒸发。

由图3可知,VMD在干燥60 min后基本检测不到氢质子信号,而HAD、HPD在干燥90 min后氢质子信号消失,表明香芋条内部水分基本去除。VMD主要由于微波内部加热促进水分从内部转移到外部,水分由内向外蒸发^[21];HAD、HPD则是由外到内去除水分;FIRD香芋条整体逐渐变小,黄绿色向绿色转变,说明水分外部向内部逐渐减少。总体上,随着干燥时间的延长,红绿色区域面积不断减小,且从香芋条边缘不断向内部收缩,在150 min后基本检测不到水分信号,水分基本被去除。

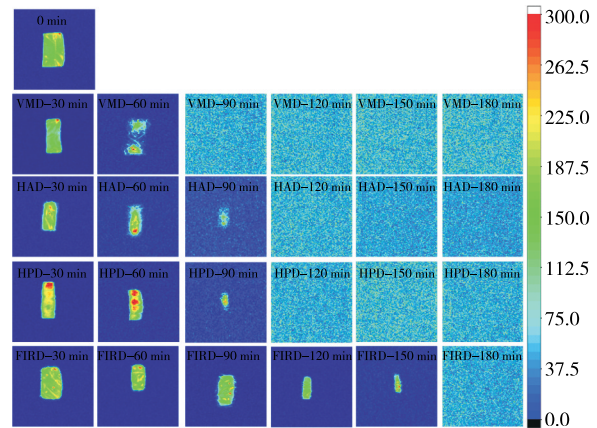


图3 不同干燥方式下香芋条MRI成像图

Figure 3 MRI images of taro strips with different drying methods

2.3 对香芋条品质的影响

由表1可知,4种干燥方法对香芋条颜色的 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值有显著差异 ($P < 0.05$)。 L^* 值由高到低为 HAD > HPD > FIRD > 鲜样 > VMD; a^* 值由大到小为 鲜样 > FIRD > VMD > HAD > HPD; b^* 值由大到小为 FIRD > HPD > HAD > 鲜样 > VMD。 ΔE 由大到小为 HAD > HPD > FIRD > VMD。VMD的 ΔE 值最小,其余3种干燥方式无

显著性差异。 L^* 值、 b^* 值明显降低,导致 ΔE 变小,与唐小闲等^[22]的研究结果一致。这可能是前期 VMD 干燥速度较快,在真空环境下香芋条氧化和褐变被抑制,能较好地保持原有的色泽^[23]。HAD、HPD 干燥时间较长,酚类化合物与氧气接触时间相应较长,发生了酶促褐变反应^[24]。综上,VMD 整体色泽更接近鲜芋,HAD、HPD、FIRD 色泽更明亮,HAD 整体色差更大。

由图 4 可知,4 种干燥方式对香芋条硬度的影响差异显著($P<0.05$),由大到小为 VMD>FIRD>HPD>HAD。VMD 的硬度最大,可能是真空环境下,香芋条的膨化效应得到了增强,收缩率变小。魏秋羽等^[25]研究发现,水分含量的快速减少会导致淀粉糊化时吸收水分不足,而淀

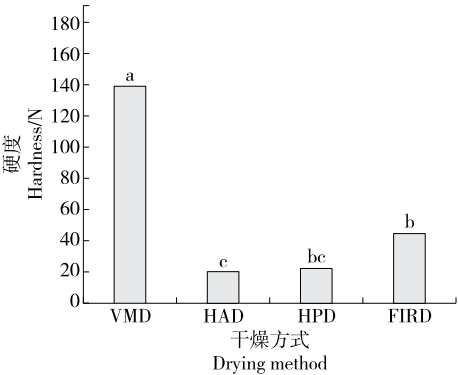
粉颗粒吸水膨胀程度变低后则会降低香芋条内部组织膨胀程度,导致硬度变大。HAD 的硬度最小,更适合进一步加工成香芋粉等产品。

复水率越大,说明其复水后与鲜芋的含水率越接近,能够恢复到原先鲜芋状态程度越高,干燥效果越好^[26]。由图 5 可知,4 种干燥方式对复水率影响显著($P<0.05$),复水率由大到小依次为 FIRD>HAD>HPD>VMD。在 VMD 过程中,微波能量过高或不均匀对某些物料具有穿透细胞壁的破坏作用,因而香芋条内部细胞严重收缩变形,复水率降低。HPD、FIRD 表现出更好的复水率,主要是干燥过程中香芋条内部结构疏松,多孔性越好,水分进入更快,复水率也越好。

表 1 不同预干燥方式下香芋条的色泽和加权综合评分[†]

Table 1 Comprehensive scores of color and weight of taro strips with different pre-drying methods					
干燥方式	L^*	a^*	b^*	ΔE	加权综合评分
鲜样	82.98±1.24 ^c	5.58±0.16 ^a	4.37±0.78 ^d	/	
VMD	78.66±1.84 ^d	5.14±0.28 ^{ab}	2.42±0.53 ^c	4.85±0.71 ^b	0.49
HAD	96.56±1.68 ^a	4.48±0.26 ^{bc}	8.83±0.27 ^b	14.34±1.56 ^a	0.60
HPD	95.48±1.14 ^{ab}	4.14±0.17 ^c	9.32±0.80 ^{ab}	13.15±0.57 ^a	0.52
FIRD	93.42±3.11 ^b	5.48±0.88 ^a	10.26±0.47 ^a	11.90±3.14 ^a	0.49

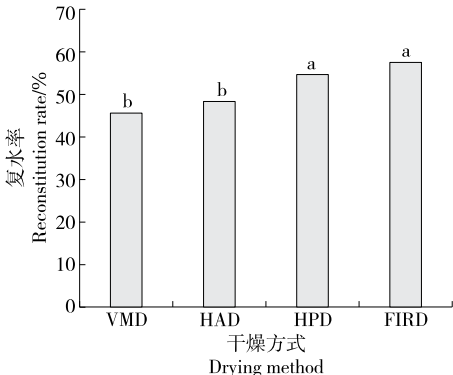
† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 4 不同干燥方式下香芋条的硬度

Figure 4 Hardness of taro strips with different drying methods



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 5 不同干燥方式下香芋条的复水率

Figure 5 Rehydration rate of taro strips with different drying methods

综上,HAD 的香芋条总体评分更高,品质更佳。

2.4 微观结构

由图 6 可知,VMD、HAD 的香芋条表面结构较致密,微孔道较少。VMD 主要是由于微波辐照能量导致香芋条的细胞收缩,细胞结构受到严重破坏。HAD 需要较长的干燥时间,因此其质地更紧密,与杨玉等^[9]的研究结果一致。HPD、FIRD 的香芋条结构较疏松,微孔道增多且更大,可减少物料收缩。HPD 较长的干燥时间加速了香芋

条的传热过程,加快表面水分蒸发的速度,增加了香芋条微孔^[27]。FIRD 样品表面孔隙多,洞孔不规则,主要是由于 FIRD 热源穿透物料表面加热,使得内部温度快速升高,水分蒸发,形成更多细小微孔。更多微孔的形成成为 FIRD 后期加快干燥速率提供了条件^[28-29]。当干燥速率较快时,淀粉颗粒糊化程度较低^[17, 30]。综上,干燥速率的快慢影响着香芋条淀粉的糊化程度,进而影响其微观结构变化。

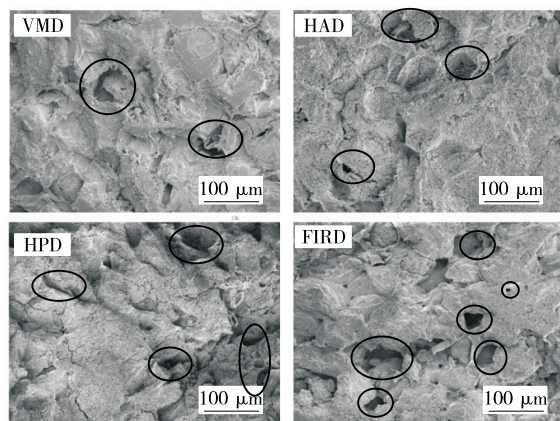


图6 不同干燥方式下香芋条的电镜图

Figure 6 Electron microscope images of taro strips with different drying methods

3 结论

4种干燥处理对香芋条的干燥特性、品质、水分迁移及微观结构均有显著影响。香芋干燥效率方面,真空微波干燥的自由水脱除时间最短,热风干燥和热泵干燥的次之,远红外辐射干燥的最长;色泽方面,热风干燥>热泵干燥>远红外辐射干燥>真空微波干燥;硬度方面,真空微波干燥>远红外辐射干燥>热泵干燥>热风干燥;复水率方面,远红外辐射干燥>热泵干燥>热风干燥>真空微波干燥。微观结构显示,真空微波干燥和热风干燥香芋条表面收缩明显,结构更致密;远红外辐射干燥和热泵干燥香芋条表面结构较疏松,孔道较多。综上,热风干燥的干燥效率、复水率居中,色泽明亮,硬度最小,因此热风干燥更适合作为香芋条干燥处理方式。后续可深入研究热风干燥对香芋干燥过程中的营养成分和风味物质的影响。

参考文献

- [1] PEREIRA P R, DE AQUINO MATTOS É B, NITZSCHE TEIXEIRA FERNANDES CORRÊA A C, et al. Anticancer and immunomodulatory benefits of taro (*Colocasia esculenta*) corms, an underexploited tuber crop[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 22(1): 265.
- [2] MUJUMDAR A S, DEVAHASTIN S. Fundamental principles of drying[J]. Exergex, Brossard, Canada, 2000, 1(1): 1-22.
- [3] 程新峰,周守标,杭华,等.基于LF-NMR的香芋微波真空干燥中水分扩散特性研究[J].现代食品科技,2019,35(2): 17-23.
- CHENG X F, ZHOU S B, HANG H, et al. Study on water diffusion characteristics of taro slices during microwave vacuum drying based on LF-NMR[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(2): 17-23.
- [4] 林芳,吴钊龙,唐永德,等.香芋粒热泵干燥特性及其动力学

模型研究[J].应用化工,2021,50(S2): 81-86.

LIN F, WU Z L, TANG Y D, et al. Characteristics and kinetic model of heat pump drying for taro granules[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(S2): 81-86.

- [5] 华军利,梁锦霞,朱定和,等.乐昌香芋热风干燥动力学及模型拟合[J].粮油食品科技,2020,28(3): 85-90.

HUA J L, LIANG J X, ZHU D H, et al. Drying kinetics and model fitting of Lechang taro during hot-air drying process[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(3): 85-90.

- [6] 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.

- [7] 裯莉婷.香芋脆片热风与真空微波联合干燥加工工艺及其动力学研究[D].大连:大连工业大学,2017: 9-35.

XUAN L T. Study on process and kinetics of hot air drying combined vacuum microwave for *Colocasia esculenta* schott crisp slices[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017: 9-35.

- [8] WEI Q Y, HUANG J P, ZHANG Z Y, et al. Effects of different combined drying methods on drying uniformity and quality of dried taro slices[J]. Drying Technology, 2019, 37(3): 322-330.

- [9] 杨玉,肖婷,孙雪,等.不同干燥方式对香芋片品质特性的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(22): 142-149.

YANG Y, XIAO T, SUN X, et al. Effect of different drying methods on quality characteristics of taro chips[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(22): 142-149.

- [10] 林捷,蒋旭,林晓静,等.真空冷冻干燥香芋脆片生产工艺研究[J].食品科技,2007,32(2): 96-99.

LIN J, JIANG D, LIN X J, et al. Investigations of vacuum freeze drying process of taro crisp slice[J]. Food Science and Technology, 2007, 32(2): 96-99.

- [11] 卜玲娟,高晗,顾正东,等.低温热风干燥对柠檬片干燥特性及品质的影响[J].食品工业,2024,45(4): 92-97.

BU L J, GAO H, GU Z D, et al. The influence of low temperature hot air drying on drying characteristics and quality of lemon slices[J]. The Food Industry, 2024, 45(4): 92-97.

- [12] 邢晓凡,刘浩楠,姚飞,等.不同干燥方式对黄桃果干品质的影响[J].食品工业科技,2023,44(24): 327-333.

XING X F, LIU H N, YAO F, et al. Effects of different drying methods on the quality of dried yellow peach slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 327-333.

- [13] LI X Y, ZHANG Y, ZHANG Y T, et al. Relative humidity control during shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) hot air drying based on appearance quality[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 315: 110814.

- [14] 罗登林,赵影,徐宝成,等.天然菊粉对面团发酵流变学和面包品质的影响[J].食品科学,2018,39(6): 26-31.

- LUO D L, ZHAO Y, XU B C, et al. Effect of natural inulin on dough rheological properties and bread quality[J]. Food Science, 2018, 39(6): 26-31.
- [15] GUO X J, HAO Q D, QIAO X G, et al. An evaluation of different pretreatment methods of hot-air drying of garlic: drying characteristics, energy consumption and quality properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 180: 114685.
- [16] 刘钊含, 杨同香, 许韩山, 等. 干燥方式对百香果皮理化、功能及抗氧化特性的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 166-174.
- LIU Z H, YANG T X, XU H S, et al. The influence of drying methods on the physicochemical, functional, and antioxidant properties of passion fruit peel[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 166-174.
- [17] HUANG D, YANG P, TANG X H, et al. Application of infrared radiation in the drying of food products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 765-777.
- [18] FATHI F, EBRAHIMI S N, MATOS L C, et al. Emerging drying techniques for food safety and quality: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(2): 1 125-1 160.
- [19] MUJUMDAR P A S. Research and development in drying: recent trends and future prospects[J]. Drying Technology, 2004, 22(1/2): 1-26.
- [20] 赵莹婷, 王为为, 庄玮婧, 等. 莲子微波真空干燥特性及其微观结构的分形特征[J]. 现代食品科技, 2016, 32(8): 213-218.
- ZHAO Y T, WANG W W, ZHUANG W J, et al. Microwave vacuum drying characteristics of lotus seeds and the fractal characteristics of their microstructures[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(8): 213-218.
- [21] ISHIBASHI R, NUMATA T, TANIGAWA H, et al. In-situ measurements of drying and shrinkage characteristics during microwave vacuum drying of radish and potato[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 323: 110988.
- [22] 唐小闲, 陈海荣, 任爱清, 等. 不同干燥方法对三华李片干燥特性及营养成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(24): 42-50.
- TANG X X, CHEN H R, REN A Q, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and nutrient quality of Sanhua plum slices[J]. Food Research and Development, 2022, 43(24): 42-50.
- [23] ZIELINSKA M, MARKOWSKI M, ZIELINSKA D. The effect of freezing on the hot air and microwave vacuum drying kinetics and texture of whole cranberries[J]. Drying Technology, 2019, 37(13): 1 714-1 730.
- [24] 于宛加, 金鑫, 胡丽娜, 等. 预干燥过程水分分布对热风-真空冷冻干燥桃脆片微观结构与质构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 69-79.
- YU W J, JIN X, HU L N, et al. Effect of water distribution during pre-drying on the microstructure and texture properties of peach crisps produced by hot air-vacuum freeze drying[J]. Food Science, 2023, 44(15): 69-79.
- [25] 魏秋羽, 张钟元, 李大婧, 等. 不同芋头品种真空微波干燥品质变化的比较[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 235-241.
- WEI Q Y, ZHANG Z Y, LI D J, et al. Quality changes in different varieties of taro treated by microwave vacuum drying [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(1): 235-241.
- [26] 陈麟, 徐健, 唐睿, 等. 不同干燥方式对菠萝果干品质的影响研究[J]. 食品安全导刊, 2024(10): 138-141.
- CHEN L, XU J, TANG R, et al. Effect of different drying methods on the quality of dried pineapple[J]. China Food Safety Magazine, 2024(10): 138-141.
- [27] HAN L C, JIN T X. Effects of combined vacuum and heat pump drying on drying characteristics and physicochemical properties of pineapple[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 192: 115727.
- [28] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声—远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 277-286.
- LIU Y H, LI X F, MIAO S, et al. Drying characteristics and microstructures of pumpkin slices with ultrasound combined far-infrared radiation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 277-286.
- [29] WANG X Q, ZHONG J H, HAN M, et al. Drying characteristics and moisture migration of ultrasound enhanced heat pump drying on carrot[J]. Heat and Mass Transfer, 2023, 59(12): 2 255-2 266.
- [30] BAI - NGEW S, THERDTHAI N, DHAMVITHEE P, et al. Effect of microwave vacuum drying and hot air drying on the physicochemical properties of durian flour[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(2): 305-312.