

不同干燥方式下淮山片理化性质的比较分析

李彦勋^{1,2}, 邹金浩¹, 郭时印¹, 苏小军^{1,3}, 王锋¹, 李燕², 李清明¹

(1. 生物质醇类燃料湖南省工程实验室, 湖南农业大学食品科学与技术学院, 湖南长沙 410128) (2. 广东茂名农林科技职业学院, 广东茂名 525000) (3. 湖南省植物功能成分利用协同创新中心, 湖南长沙 410128)

摘要: 为了研究不同干燥方式对淮山片理化特性、活性成分和糊化特性的影响, 采用热风干燥、红外干燥和红外-热风联合干燥干制淮山, 分析了干燥方式对干制淮山片的复水比、色泽、褐变度、活性成分、抗氧化能力、微观结构和淀粉糊化特性的影响, 并采用体外消化模拟实验分析不同干燥方式的淮山片淀粉体外消化性。结果表明, 三种干燥方式对淮山色泽、褐变度、复水比、可溶性多糖、多酚含量影响不显著 ($p>0.05$), 但微观结构和糊化性质存在差异。红外-热风联合干燥的淮山片黄酮含量为 0.29%、尿囊素含量为 0.95%、抗氧化能力为 61.64 mmol/L、DPPH 自由基清除能力为 7.73%和体外消化率为 25.59%, 显著高于另外两种干燥方式 ($p<0.05$), 表明红外热风联合干燥在淮山干制中具有良好的应用前景。

关键词: 干燥; 淮山; 抗氧化能力; 体外消化率; 糊化特性

文章编号: 1673-9078(2019)02-179-185

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.2.025

Comparative Analysis of Different Drying Methods on Physicochemical Properties of Yam Slice

LI Yan-xun^{1,2}, ZOU Jin-hao¹, GUO Shi-yin¹, SU Xiao-jun^{1,3}, WANG Feng¹, LI Yan², LI Qing-ming¹

(1. Hunan Engineering Laboratory for Alcohol Fuels from Biomass, College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

(2. Guangdong Maoming Agriculture & Forestry Technical College, Maoming 525000, China)

(3. Hunan Collaborative Innovation Center for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Changsha 410128, China)

Abstract: Effects of different drying methods (hot air drying, infrared drying and infrared-hot air drying) on physicochemical properties, antioxidant capacity and pasting properties were investigated. The rehydration rate, color, browning degree, bioactive components, antioxidant capacity, *in vitro* digestibility, microstructure and pasting properties were analyzed. Results indicated that there were no significant difference in color, browning degree, rehydration rate, reducing sugar and flavonoids content of yam dried with different drying methods ($p>0.05$), but there have obvious difference in the microstructure and pasting properties. Compared to hot air drying and infrared drying, higher content of flavonoids (0.29%) and allantoin (0.95%) were retained in infrared-hot air drying products, and the higher antioxidant capacity, DPPH scavenging ability and *in vitro* digestibility (61.64 mmol/L, 7.73% and 25.59%, respectively) were obtained. Therefore, infrared-hot air drying could be a more promising technique to develop the dried products of yam slice.

Key words: Drying methods; Yam; Antioxidant capacity; *in vitro* digestibility; Gelatinization characteristics

淮山 (*Dioscorea opposita* Thunb), 也称山药, 为薯蓣科植物块茎, 淮山贮藏期短, 为延长淮山的货架期, 减少贮藏损耗, 提高其产品的附加值, 常将淮山干制成片, 以满足消费需求。近些年很多学者对淮山热泵干燥^[1]、红外干燥^[2,3]、真空冷冻干燥^[4]、变温压差干燥^[5]等进行了干燥方式研究, 研究了淮山片的干

收稿日期: 2018-09-29

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2016NK2113); 湖南省教育厅重点项目 (16A100)

作者简介: 李彦勋(1989-), 男, 硕士, 研究方向: 食品加工与安全

通讯作者: 李清明(1973-), 男, 副教授, 研究方向: 农产品深加工

燥特性、干燥模型、感官品质和理化性质等方面。淮山是我国传统的药食同源食物, 含有多糖、尿囊素、黄酮和多酚类物质等多种活性成分, 而干燥方式对淮山片的活性成分和功能特性的影响方面鲜有报道。红外干燥具有加热效率高、干燥产品品质好等特点, 应用于苹果片^[6]、梨^[7]、草莓^[8]、马铃薯^[9]等一系列农产品干燥加工。汤尚文^[2]对红外干燥特性与数学模型进行了研究, 张丽丽^[10]利用淮山 BP 神经网络预测了红外干燥过程中山药切片的温度变化, 但对于红外干燥对淮山功能活性和糊化性质的影响尚未见报道。众所周知, 干燥方式与工艺对产品的性能、形态、质量等

都具有直接的影响,不同干燥方式都有其优势和不足。由于农产品物料的多样性及其性质的复杂性,单一形式的干燥技术往往很难满足最终产品的质量要求,因此,近些年很多学者研究根据物料的特点,将两种或两种以上的干燥方法进行联合,实现优势互补。联合干燥具有干燥过程易控制、干燥效率高、改善产品质量等优点,广泛应用于农产品的干制,尤其适用于农产品中的一些对热敏感、易氧化的物料^[11]。本文通过对热风干燥、红外干燥、红外-热风联合干燥淮山的理化性质、活性成分、抗氧化活性、淀粉体外消化率和显微结构等指标的综合比较,研究这三种干燥方式对淮山品质的影响,为淮山的干制加工提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 原料

淮山:小白嘴淮山,购自湖南农业大学东之源超市。

1.2 试剂与仪器

1.2.1 试剂

无水乙醇、亚硝酸钠、九水合硝酸铝、氢氧化钠、葡萄糖、六水合三氯化铁、乙酸铵、七水合硫酸亚铁均为分析纯,石油醚、甲醇、乙腈为色谱纯,国药集团化学试剂有限公司;Folin-酚试剂购自博美生物公司;TPTZ购自阿拉丁公司;DPPH自由基购自梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;DNS试剂购自福建厦门海标科技有限公司;芦丁、没食子酸标准品购自成都曼思特生物科技有限公司。

1.2.2 仪器

BS224S电子天平,赛多利斯科学仪器有限公司;CR400彩色色差计,日本柯尼卡美能达公司;UV 1601紫外/可见分光光度计,北京瑞利分析仪器公司;Centrifuge 5804R低温高速离心机,德国艾本德公司;Agilent 1260液相色谱仪,美国安捷伦科技有限公司;JSM 6380LV扫描电子显微镜,日本电子株式会社;RVA-S/N2112681快速黏度分析仪,瑞典perten仪器有限公司;红外-热风联合干燥试验机实验室自行组装。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

淮山清洗、去皮,切成3 mm厚的淮山片,进行干燥。热风干燥条件:70℃;红外干燥条件:功率1100 W;红外-热风联合干燥热风温度为70℃、功率

为1100 W干燥,均干燥到水分含量8%以下(热风干燥时间245 min,红外干燥110 min,红外-热风联合干燥60 min)。将淮山片粉碎,过80目筛,置于干燥器中备用。

1.3.2 检测指标与方法

1.3.2.1 物理指标

①色泽:采用柯尼卡美能达CR400彩色色差计,参照刘娟^[12]的方法进行;

②复水比:参照黄婷等^[13]的方法进行;

③褐变度^[14]:精确称取上述淮山粉5.000 g,加入100 mL 10%的乙醇溶液,37℃超声提取2.5 h,10000 r/min离心10 min定容于100 mL,在420 nm处测定吸光度,褐变度以吸光值的大小表示。

1.3.2.2 活性成分

①可溶性多糖:参照聂凌鸿^[15]的方法进行。

②尿囊素含量测定^[16]:采用高效液相色谱法,色谱条件:色谱柱为HILIC柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm);检测器为紫外吸收检测器;流动相为乙腈-水(97:3);检测波长210 nm;柱温30℃;流速0.5 mL/min,进样量10 μL。精确称取上述样品粉末1.000 g于50 mL离心管中,加入20 mL石油醚,10 mL甲醇10 mL去离子水,涡旋振荡15 min,在0~4℃温度下过夜,在1000 W超声波处理2次,每次30 min,在9000 r/min的高速冷冻离心机中离心10 min,去掉石油醚层和沉淀,保留甲醇-水层,移入200 mL容量瓶定容,待用。

③黄酮含量测定^[17]:准确称淮山粉1.000 g,准确称量至50 mL具塞离心管中,用15 mL 95%乙醇反复超声提取3次,每次45 min。过滤提取液,洗涤残渣和滤液合并定容于50 mL容量瓶中,并加95%的乙醇定容至刻度并摇匀,取1 mL样液于10 mL比色管中。以芦丁为标准品,在511 nm处测定其吸光值。

④多酚含量测定^[18]:准确称取经以上处理的样品1.000 g,分别装入圆底烧瓶中,加入体积分数为80%乙醇50 mL,摇匀,在70℃水浴中回流提取2 h,真空条件下抽滤,清洗残渣2次,合并2次的洗涤液。将溶剂提取液减压浓缩至没有乙醇气味,再用蒸馏水将浓缩物溶解并定容至50 mL,移取1 mL样液于10 mL比色管中,以没食子酸为标准品,在400~900 nm范围内进行波长扫描,只存在一个单峰,且最大吸收波长为764 nm,确定764 nm为检测波长,进行标准曲线绘制和样品测定。

⑤还原糖含量测定:参照李环^[19]的方法进行。

1.3.2.3 抗氧化活性

①抗氧化能力测定^[20,21]:样品测定:精确称取淮山粉1.000 g于离心管中,加入30 mL 10%的乙醇溶

液, 45 °C 超声提取 2 h, 10000 r/min 离心 10 min。取上清液定容于 50 mL 容量瓶。取 200 μ L 样液, 加 3 mL FRAP 工作液, 测定方法同标准曲线。样品的抗氧化能力以 FRAP 值表示: 1 FRAP 单位=1 mmol/L FeSO₄, 即样品的抗氧化能力相当于 FeSO₄ 的毫摩尔数。

②DPPH 自由基清除率测定^[22]: 精确称取 0.100 g 淮山粉置于离心管中, 加入无水乙醇 30 mL。37 °C 超声提取 2.5 h, 12000 r/min 离心 15 min, 取上清液用无水乙醇定容至 50 mL。移取 200 μ L 样液, 加入 0.06 mmol/L DPPH 溶液 4.8 mL, 摇匀后置于 37 °C 条件下避光水浴 1 h, 用无水乙醇调零, 不加样品组为对照, 在 517 nm 处测定吸光值。

清除率%=[1-A_{517 样品组}/A_{517 对照组}] \times 100%

1.3.2.4 淀粉体外消化率测定^[23]

精确称取上述淮山粉 1.000 g, 加入磷酸盐缓冲液 50 mL (pH=6.9), 置于 37 °C 水浴中消化处理 5 min 后, 取 1 mL 消化上清液(用于测初始还原糖含量), 1 min 后再加入酶活力为 4000 U 的 α -淀粉酶溶液, 置于 37 °C 水浴中继续消化处理。分别在第 10、20、40、70、100、130、150 min, 分别取消化液 1 mL 于 10 mL 比色管中, 加 0.75 mL DNS 试剂, 于沸水中煮沸 5 min, 加超纯水到刻度, 在波长为 510 nm 处测定吸光值。以加酶水解后生成的还原糖的量占样品干重的百分含量(db%)表示淀粉的体外消化率。

体外消化率=($m_t - m_0$)/ $m \times 100\%$

式中: m_t : 酶解 t 时刻的葡萄糖含量/g; m_0 : 酶解前葡萄糖含量/g; m : 样品质量/g。

1.3.2.5 糊化性质^[24]

参照国标 GB/T 24853-2010 进行。

1.3.2.6 显微结构

采用扫描电镜 (SEM) 对三种干燥方式的淮山全粉颗粒进行结构分析。

1.3.3 数据处理

所有实验进行 3 次重复, 所得数据采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析, 显著性水平为 $p < 0.05$, 通过 Excel 2010 绘制标准曲线和含量计算。

2 结果与讨论

2.1 干燥方式对淮山色泽、褐变度、复水比的影响

明度指数 L* 值可以一定程度的反应色泽的好坏, L* 值越大, 表示淮山的色泽越好, 淮山中色泽、褐变度、复水比, 结果见表 1。由表 1 可知, 三种不同干燥方式的淮山 L* 值、褐变度和复水比没有显著差异 ($p > 0.05$), 三种干燥方式干制得到的淮山褐变较轻, 都有较好的色泽和复水比。

2.2 干燥方式对淮山中活性成分含量的影响

可溶性多糖、尿囊素、黄酮、多酚类物质是淮山中重要的活性物质, 具有降糖、抗衰老、调节免疫、抗突变、降血脂等功效^[25]。测定了不同干燥方式制备的淮山中可溶性多糖、尿囊素、黄酮和多酚类物质含量, 结果见表 2。不同干燥方式的淮山黄酮和尿囊素含量存在显著差异 ($p < 0.05$), 红外-热风联合干燥黄酮类物质和尿囊素含量最高 (0.28% 和 0.95%); 不同干燥方式的淮山可溶性多糖和多酚类物质含量差异不显著 ($p > 0.05$); 红外干燥的还原糖含量为 4.7%, 显著高于其他两种干燥方式。Chen 等报道, 不同干燥方法 (自然风干、硫磺熏蒸、热风干燥、冷冻干燥和微波干燥) 对淮山粉中尿囊素含量影响显著, 淮山粉尿囊素含量从 0.99%~2.57%, 可溶性多糖含量为 0.97~1.10 mg/g^[26]。

表 1 不同干燥方式对淮山色泽、褐变度、复水率的影响

Table 1 Color, browning degree and rehydration rate of yam prepared by different drying methods

项目	色泽/L*值	褐变度/A ₄₂₀	复水比/(g/g)
热风干燥	86.16 \pm 0.38 ^a	0.303 \pm 0.000 ^a	2.30 \pm 0.29 ^a
红外干燥	82.21 \pm 3.12 ^a	0.277 \pm 0.065 ^a	2.00 \pm 0.03 ^a
红外-热风联合干燥	84.69 \pm 3.87 ^a	0.278 \pm 0.036 ^a	2.14 \pm 0.08 ^a

注: 同列不同上标小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$), 表 2、表 3、表 4 同。

表 2 不同干燥方式对淮山可溶性多糖、黄酮、多酚、尿囊素含量的影响

Table 2 Soluble polysaccharides, flavonoids, polyphenols and allantoin contents of yam flour prepared by different drying methods

项目	可溶性多糖/%	黄酮/%	多酚/%	尿囊素/%	还原糖/%
热风干燥	0.98 \pm 0.03 ^a	0.16 \pm 0.01 ^c	0.03 \pm 0.01 ^a	0.86 \pm 0.02 ^b	2.21 \pm 0.05 ^b
红外干燥	0.96 \pm 0.04 ^a	0.26 \pm 0.01 ^b	0.02 \pm 0.00 ^a	0.60 \pm 0.01 ^c	4.72 \pm 0.03 ^a
红外-热风联合干燥	0.95 \pm 0.02 ^a	0.29 \pm 0.01 ^a	0.02 \pm 0.00 ^a	0.95 \pm 0.05 ^a	2.22 \pm 0.04 ^b

2.3 干燥方式对淮山抗氧化能力的影响

相关研究表明植物多酚类和黄酮类化合物可以作为还原剂、氢原子供体和氧自由基清除剂^[27]。由表3可知,不同干燥方式对淮山抗氧化能力和DPPH自由基清除能力影响显著($p < 0.05$),红外-热风联合干燥的淮山抗氧化能力和DPPH·自由基清除能力均为最高,分别为61.64 mmol/L和7.73%。淮山中多酚和黄酮含量的总量与DPPH自由基清除能力变化规律一致,DPPH自由基清除能力大小能反应淮山中抗氧化活性物质的含量高低。Hsu等人^[28]研究了台农2号和紫淮山等3个品种在FD、HD和滚筒干燥条件下的抗氧化能力,发现抗氧化能力与品种、浓度和干燥方式有关,紫淮山的自由基清除能力和还原力最强,FD的淮山全粉抗氧化能力最强。

表3 不同干燥方式对淮山抗氧化能力、DPPH自由基清除能力的影响

Table 3 Antioxidant capacity and DPPH· free radical scavenging ability of yam flour prepared by different drying methods

项目	FRAP 值/(mmol/L)	DPPH 自由基清除能力/%
热风干燥	51.92±1.33 ^c	4.49±0.13 ^c
红外干燥	56.83±1.17 ^b	6.60±0.28 ^b
红外-热风联合干燥	61.64±1.00 ^a	7.73±0.54 ^a

2.4 干燥方式对淮山淀粉体外消化率的影响

本研究采用体外模拟法分析了不同干燥方式对淮山淀粉的体外消化性的影响。试验结果见图1。如图1所示,不同干燥方式的淮山淀粉的体外消化率存在显著性差异($p < 0.05$),红外-热风联合干燥的淮山淀粉体外消化率最高(25.59%),红外干燥的淮山体外消化率最低(18.24%)。其原因可能与淮山干燥过程中三种不同的干燥方式对应的温度有关。热风干燥整个过程中淮山环境温度始终高于内部温度;红外干燥过程中淮山环境温度在短时间内迅速升高,而且在整个干燥过程一直处于升高的趋势,导致淮山表面出现明显的焦糊和板结,严重破坏了淀粉的结构;红外-热风联合干燥过程中,由于环境温度由对流热风控制,在干燥过程中,淮山表面温度始终接近于环境温度,但淮山内部温度略高于环境温度,可能在一定程度上打破了淀粉的有序排列,增加了 α -淀粉酶酶解的作用位点,促使淀粉水解率略有所提高,此推断和王鹏等^[29]的研究结果一致。Chen等研究了自然风干、硫磺熏蒸、热风干燥、冷冻干燥和微波干燥对淮山粉体外消化率

的影响,结果表明不同干燥方式对淮山粉的体外消化率影响显著。

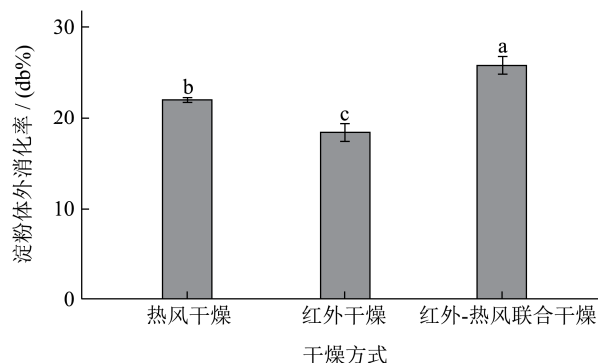


图1 不同干燥方式对淀粉体外消化率的影响

Fig.1 In vitro digestibility of yam flour prepared by different drying methods

2.5 干燥方式对糊化性质的影响

淮山块茎的干物质主要由淀粉组成,淀粉占干物质质量分数为60%~70%,干燥后的淮山制品糊化特性主要取决于淀粉。兰冬梅^[30]在优化微波对锥栗抗性淀粉形成的最佳条件中指出温度会使锥栗淀粉颗粒的外部表现和内部结构都受到一定程度的改变,在一定程度上影响了锥栗全粉的理化性质。三种不同的干燥方式在干燥过程中淮山内部温度不同(红外干燥>红外-热风联合干燥>热风干燥)。糊化特性常作为衡量淀粉品质的重要指标,从表4看出,热风干燥、红外干燥、红外-热风联合干燥三种干燥方式的淮山糊化温度没有显著性差异($p > 0.05$)。峰值粘度有显著性差异($p < 0.05$),热风干燥最高为1861 cp。红外干燥与另外两种干燥方式在最低粘度、最终粘度、回生值、峰值时间有显著性差异($p < 0.05$),红外干燥的淮山淀粉最低粘度、最终粘度、回生值均较小,分别为1061 cp、1306 cp和236 cp,与另外两种干燥方式相比均降低20%左右,红外干燥的淮山淀粉峰值时间最长,为5.40 min。三种干燥方式的淮山淀粉衰减值得存在显著性差异($p < 0.05$),红外干燥的淮山淀粉衰减值得最低小,为347 cp。尹慧敏^[31]研究结果表明干燥温度高于糊化温度时,糊化使马铃薯淀粉双螺旋结构氢键解开,温度越高,糊化越严重,糊化焓值显著降低。

峰值粘度是淀粉糊化过程中的最高粘度,主要跟样品的分子量、物质分子之间的结合形式、直链淀粉与支链淀粉的比例等因素有关。表4看出红外干燥的淮山粉峰值粘度最低,可能是由于在干燥过程中有部分直链淀粉糊化、分解为葡萄糖,这推断和上述测得的红外干燥还原糖含量最高相吻合;衰减值得通常用于反应淀粉在高温下的耐剪切能力,其大小反应了淀粉

糊化的稳定性, 红外干燥的衰减值最小, 说明红外干燥的淮山粉热糊稳定性最好; 回生值的大小反应了冷

糊的稳定性和老化趋势, 红外干燥的淮山粉回生值最小, 说明其冷糊稳定性最好, 不易老化。

表4 不同干燥方式对淮山淀粉糊化性质的影响

Table 4 Pasting properties of yam flour prepared by different drying methods

项目	峰值粘度/cp	最低粘度/cp	最终粘度/cp	回生值/cp	峰值时间/min	糊化温度/°C	衰减值/cp
热风干燥	1861±36 ^a	1326±15 ^a	1640±25 ^a	314±14 ^a	5.33±0.00 ^a	83.41±0.04 ^a	535±25 ^a
红外干燥	1416±76 ^c	1061±80 ^b	1306±106 ^b	236±17 ^b	5.40±0.00 ^b	83.40±0.00 ^a	347±12 ^c
红外-热风联合干燥	1759±12 ^b	1324±23 ^a	1634±16 ^a	309±18 ^a	5.31±0.05 ^a	83.63±0.57 ^a	434±19 ^b

2.6 干燥方式对淮山显微结构的影响

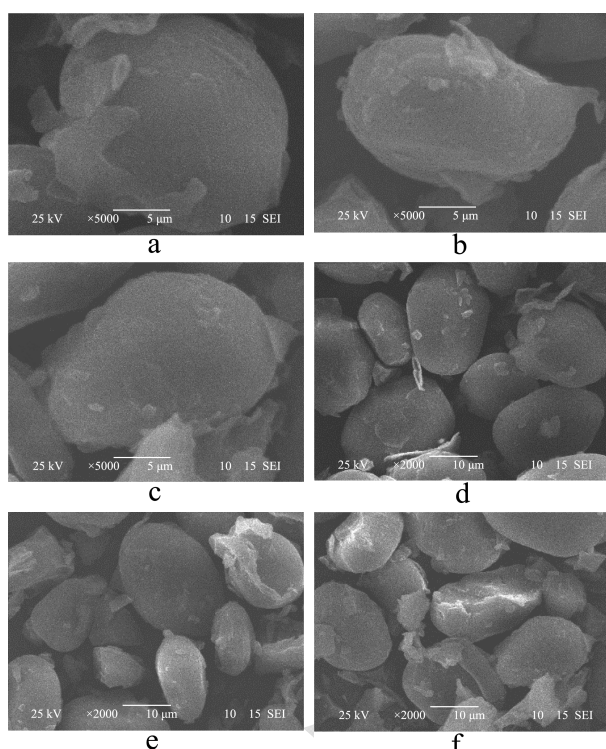


图2 三种干燥方式制备的淮山全粉扫描电镜图

Fig.2 Scanning electron micrographs (SEM) of yam flour prepared by different drying methods

注: a、b、c 分别为热风干燥、红外干燥、红外-热风联合干燥淮山全粉 5000 倍 SEM (扫描电子显微镜) 图; d、e、f 分别为热风干燥、红外干燥、红外-热风联合干燥淮山全粉 2000 倍 SEM 图。

图2为三种不同干燥方式的淮山全粉颗粒结构扫描电镜图, 通过图2SEM照片可以看出, 其中淮山淀粉颗粒呈椭圆形, 表面光滑, 结构基本完整。各样品中散布着薄片状物体, 此为淮山粉碎过程中破损的细胞壁, 它的主要成分为纤维素和果胶等。热风干燥样品 SEM 照片中淀粉颗粒表面有较多的薄片状物体附着; 红外干燥的淮山全粉颗粒表面最为光滑, 附着薄片最少; 红外-热风联合干燥的淮山淀粉颗粒表面最为粗糙。红外干燥和红外-热风联合干燥样品中部分淀粉颗粒表面出现明显的糊化现象。干燥时, 当干燥介质

温度高于淀粉的糊化温度时, 淮山中才会发生糊化, 热风干燥温度为 70 °C, 低于淮山淀粉糊化温度, 因此热风干燥样品未出现糊化现象。而红外干燥和联合干燥过程中, 由于红外辐射作用, 表面温度较高, 当淀粉颗粒含有足够使其糊化的水分时, 淀粉发生糊化。

3 结论

3.1 通过对三种不同干燥方式制备的淮山的色泽、褐变度、可溶性多糖、黄酮含量、多酚含量、尿囊素含量、抗氧化能力、DPPH 自由基清除能力、淀粉体外消化率及淀粉的糊化特性的测定, 对不同的干燥方式的淮山理化性质进行了评价。三种干燥方式干制得到的淮山褐变较轻, 都有较好的色泽; 红外-热风联合干燥的淮山抗氧化能力和 DPPH 自由基清除能力均最高, 干燥方式对黄酮含量、尿囊素含量、抗氧化能力和 DPPH 自由基清除能力影响趋势一致(红外-热风联合干燥>红外干燥>热风干燥); 红外-热风联合干燥淮山淀粉体外消化率最高; 红外干燥的淮山淀粉热稳定性最好, 衰减值和回生值均最低。三种不同的干燥方式中, 红外-热风联合干燥的淮山黄酮、尿囊素含量、FRAP 值、DPPH 自由基清除率和淀粉体外消化率明显高于另外两种干燥方式。

3.2 红外干燥的淮山中还原糖含量显著高于热风干燥和红外-热风联合干燥, 可能是由于短时间内大量的红外辐射能量被淮山表面吸收, 红外效应引起淮山表面淀粉的糊化和降解, 其机理有待进一步研究。

参考文献

- [1] 李丽, 孙健, 盛金凤, 等. 山药热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(10): 212-217
LI li, SUN Jian, SHENG Jin-feng, et al. Heat pump drying characteristics and mathematical modeling of Chinese yam [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(10): 212-217
- [2] 汤尚文, 孙永林, 王同齐, 等. 山药红外干燥特性与数学模型[J]. 食品科技, 2016, 41(6): 93-99
TANG Shang-wen, SUN Yong-lin, WANG Tong-qi, et al.

- Infrared radiation drying characteristics and mathematical model of yam [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(6): 93-99
- [3] 白峻文,肖瑞,董晨,等.山药催化式红外干燥特性及色泽评价[J].*食品工业科技*,2017,38(7):221-225
BAI Jun-wen, XIAO Rui, DONG Chen, et al. Drying characteristic and product color evaluation of yam by catalytic infrared drying [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(7): 221-225
- [4] 马丽娜,阮传清,周先治,等.淮山片真空冷冻干燥工艺的优化[J].*食品安全质量检测学报*,2017,8(9):3466-3472
MA Li-na, RUAN Chuan-qing, ZHOU Xian-zhi, et al. Optimization of the vacuum freeze drying process of chinese yam slices [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8(9): 3466-3472
- [5] 李清明,李志雅,张丽茹,等.淮山片变温压差干制工艺优化及其特性研究[J].*南方农业学报*,2016,47(10):1743-1748
LI Qing-ming, LI Zhi-ya, ZHANG Li-ru, et al. Optimization of explosion puffing drying process of yam slice and study of its properties [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(10): 1743-1748
- [6] 巨浩羽,肖红伟,白峻文,等.苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J].*农业机械学报*,2013,44(S2):186-191
JU Hao-yu, XIAO Hong-wei, BAI Jun-wen, et al. Medium and short wave infrared drying characteristics and color changing of apple slices [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(S2): 186-191
- [7] 唐璐璐,易建勇,毕金峰,等.干燥方式对丰水梨片酚类物质含量及其抗氧化活性的影响[J].*中国食品学报*,2017,17(12):129-138
TANG Lu-lu, YI Jian-yong, BI Jin-feng et al. Effects of drying methods on the phenolics content and antioxidant activity of hosui pear [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(12): 129-138
- [8] 赵悦,陈芹芹,毕金峰,等.草莓中短波红外干燥动力学拟合及品质变化分析[J].*食品与发酵工业*,2016,42(4):137-143
ZHAO Yue, CHEN Qin-qin, BI Jin-feng, et al. Drying kinetics and quality change analysis of short and medium-wave infrared radiation dried strawberry [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(4): 137-143
- [9] Shiva Ruhanian, Kamyar Movagharnjad. Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer [J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2016, 9(1):84-91
- [10] 张丽丽,王相友,张海鹏.山药切片红外干燥温度神经网络预测[J].*农业机械学报*,2014,45(11):246-249,336
ZHANG Li-li, WANG Xiang-you, ZHANG Hai-peng. Temperature prediction of yam under infrared drying based on neural networks [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 246-249, 336
- [11] 苏丹,李树君,赵凤敏,等.农产品联合干燥技术的研究进展[J].*农机化研究*,2014,11:236-240
SU Dan, LI Shu-jun, ZHAO Feng-min, et al. Research developments of combination drying technology for crops [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 11: 236-240
- [12] 刘娟,梁延超,余斌,等.马铃薯薯条色泽和质地特性及薯条加工型品系筛选[J].*中国农业科学*,2017,50(22):4247-4265
LIU Juan, LIANG Yan-chao, YU Bin, et al. Screening for french fries processing potato lines according to colour qualities and texture properties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(22): 4247-4265
- [13] 黄婷,乔庆杰,张海晖,等.萝卜缨微波真空干燥工艺优化及其特性[J].*食品科技*,2015,40(2):72-77
HUANG Ting, QIAO Qing-jie, ZHANG Hai-hui, et al. Microwave vacuum characteristics and drying technology optimization of radish leaves [J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(2): 72-77
- [14] Vaikousi H, Koutsoumanis K, Biliaderis C G Kinetic modelling of non-enzymatic browning in honey and diluted honey systems subjected to isothermal and dynamic heating protocols [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 95(4): 541-550
- [15] 聂凌鸿,宁正祥.广东淮山多糖提取工艺的研究[J].*食品工业科技*,2003,12:43-45
NEI Ling-hong, NING Zheng-xiang. Study on extraction technology of polysaccharides from Guangdong [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2003, 12: 43-45
- [16] 裴贵珍,漆新文.高效液相色谱法同时测定缩泉胶囊中尿囊素和乌药醚内酯的含量[J].*山西医药杂志*,2016,45(21):2548-2549
PEI Gui-zhen, QI Xin-wen. Simultaneous determination of allantoin and urcaprolactone in Suoquan capsules by HPLC [J]. *Shanxi Medical Journal*, 2016, 45(21): 2548-2549
- [17] PengHuang, QingZhang, Hongye Pan et al. Optimization of integrated extraction-adsorption process for the extraction and purification of total flavonoids from *Scutellariae barbatae* Herba [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 175: 203-212
- [18] Marjorie R. Rover, Robert C. Brown. Quantification of total

- phenols in bio-oil using the Folin-ciocalteu method [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 104: 366-371
- [19] 李环,陆佳平,王登进.DNS 法测定山楂片中还原糖含量的研究[J].食品工业科技,2013,34(18):75-77
- LI Huan, LU Jia-ping, WANG Deng-jin, Study on determination of reducing sugar from haw flakes with DNS colorimetry method [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(18): 75-77
- [20] Marcin Ozarowski, Radosław Kujawski, Przemysław Mikolajczak, et al. Comparison of antioxidant activities of fractionated extracts from seedlings and herb of *Chelidonium majus* L. using DPPH, ABTS and FRAP methods [J]. Herba Polonica, 2016, 62(4): 22-38
- [21] 范金波,蔡茜彤,冯叙桥,等.5种天然多酚类化合物抗氧化活性的比较[J].食品与发酵工业,2014,40(7):77-83
- FAN Jin-bo, CAI Xi-tong, FENG Xu-qiao, et al. The comparison of five natural phenolic compounds on antioxidant activity *in vitro* [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(7): 77-83
- [22] Angela Fadda, Maria Serra, Maria Giovanna Molinuetal. Reaction time and DPPH Concentration influence antioxidant activity and kinetic parameters of bioactive molecules and plant extracts in the reaction with the DPPH radical [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2014, 35(2): 112-119
- [23] ShujunWang, PeiyanLi, Teng Zhangetal. *In vitro* starch digestibility of rice flour is not affected by method of cooking [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 84: 536-543
- [24] 国家标准委员会.GB/T24853-2010 食品检验方法-理化检验[S]
- National Standard Committee. GB/T24853-2010 Physical and Chemical Examination of Food Inspection Methods [S]
- [25] 陈佳希,李多伟.山药的功能及有效成分研究进展[J].西北药学杂志,2010,25(5):398-400
- CHEN Jia-xi, LI Duo-wei. Research progress in function and effective components of Chinese yam [J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2010, 25(5): 398-400
- [26] Chen X, Li X, Mao X, et al. Effects of drying processes on starch-related physicochemical properties, bioactive components and antioxidant properties of yam flours [J]. Food Chemistry, 2017, 224: 224
- [27] 逯阳.几种植物多酚捕获体内自由基反应机理的理论研究[D].哈尔滨理工大学,2017
- LU Yang. A theoretical study on the reaction mechanisms of several plant polyphenols scavenging radical *in vivo* [D]. Harbin University of Science and Technology, 2017
- [28] HSU C L, CHEN W, WENG Y M, et al. Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods [J]. Food Chemistry, 2003, 83(1): 85-92
- [29] 王鹏,程志强,祖亿等.杂粮淀粉体外消化特性的分析[J].食品科技,2017,42(10):170-174
- WANG Peng, CHENG Zhi-qiang, ZU Yi, et al. Effect of starch grains on the *in vitro* digestibility in different processing methods [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(10): 170-174
- [30] 兰冬梅.微波对锥栗全粉理化性质的影响及即食锥栗的研制[D].福建农林大学,2016
- LAN Dong-mei. Effect of microwave irradiation on the physicochemical properties of *Castanea henryi* powder and the development of instant *Castanea henryi* [D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2016
- [31] 尹慧敏,吴文福,窦建鹏,等.热风干燥条件对马铃薯全粉糊化品质的影响[J].农业工程学报,2017,33(12):293-300
- YIN Hui-min, WU Wen-fu, DOU Jian-peng, et al. Influence of hot-air drying condition on dehydrated potato flour gelatinization quality [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 293-300