

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.06.034

淮山微波真空干燥工艺优化及功能活性评价

Optimization of microwave vacuum drying technology of yam and the evaluation of its functional activity

夏磊¹ 黄昭¹ 欧阳华峰¹ 郭时印¹

XIA Lei¹ HUANG Zhao¹ OU-YANG Hua-feng¹ GUO Shi-yin¹

苏小军^{1,2} 王锋¹ 李清明¹

SU Xiao-jun^{1,2} WANG Feng¹ LI Qing-ming¹

(1. 湖南农业大学食品科学与技术学院生物质醇类燃料湖南省工程实验室, 湖南 长沙 410128;

2. 湖南省植物功能成分利用协同创新中心, 湖南 长沙 410128)

(1. Hunan Engineering Laboratory for Alcohol Fuels from Biomass, College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Collaborative Innovation Center for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Changsha, Hunan 410128, China)

摘要:以多糖含量、白度、复水率为评价指标,通过单因素与二次旋转正交试验优化了淮山微波真空干燥工艺,并对其功能活性成分和抗氧化能力进行了评价。得到最佳工艺条件为干燥温度 55 °C、切片厚度 3 mm、真空度 -0.08 MPa,此条件下的淮山干燥产品多糖含量为 (4.12±0.08)%、白度为 (78.04±0.82)、复水率为 (223.29±1.31)%,其清除 DPPH 自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基的半抑制率浓度 (IC_{50}) 分别为 (18.61±0.11), (19.86±0.15), (21.06±0.14) mg/mL,多酚、黄酮、尿囊素含量分别为 (0.71±0.05), (1.32±0.04), (6.86±0.08) mg/g。微波真空干燥产品质量好,活性成分损失少,具有较强的抗氧化能力。

关键词:淮山;微波真空干燥;功能活性

Abstract: With the polysaccharide content, whiteness and rehydration rate as evaluation indexes, the microwave vacuum drying process of yam was optimized by single factor and quadratic rotation orthogonal experiment, and the functional active components and antioxidant capacity of dried yam were evaluated. The results showed that the regression model established by quadratic rotation orthogonal experiment could reflect the relationship between factors and indexes appropriately. The optimum production conditions were found to be the 3 mm-thick slices were vacuumed

with -0.08 MPa at 55 °C. Under the control of these conditions, the polysaccharide content, whiteness and rehydration rate of dried yam were (4.12±0.08)%, (78.04±0.82) and (223.29±1.31)%, respectively. The IC_{50} of dried yam scavenging DPPH radical, hydroxyl radical and superoxide anion radical were (18.61±0.11), (19.86±0.15) and (21.06±0.14) mg/mL, respectively. The contents of polyphenols, flavones and allantoin were (0.71±0.05), (1.32±0.04) and (6.86±0.08) mg/g, respectively. Microwave vacuum drying yam had strong antioxidant capacity and good product quality. Microwave vacuum drying technology could reduce the loss of active components and had a good application prospect in the drying of agricultural products.

Keywords: yam; microwave vacuum drying; functional activity

淮山又称薯蕷 (*Dioscorea opposita* Thunb), 是薯蕷科 (*Dioscoreaceae*) 薯蕷属 (*Dioscorea*) 植物, 富含皂苷、糖蛋白、甘露聚糖、植酸、尿囊素等多种生物活性物质, 具有丰富的营养价值^[1]。微波真空干燥是一种新型现代化干燥技术, 具有快速、低温、高效等特点, 能较好地保持原料的色香味及营养成分, 并有效地避免了微波干燥容易因温度过高而使食品产生硬化、结壳和焦化甚至烧伤等缺点^[2], 在荔枝果肉^[3]、马铃薯^[4]、板栗^[5]等多种果蔬干制中得到应用。传统的淮山干燥方法为晒干或烘干, 干制过程中淮山易发生褐变, 常用熏硫或焦亚硫酸钠处理等方法进行护色, 易导致含硫量超标。化春光^{[6]44-48}研究了多种干燥方式对怀山药片品质的影响, 发现微波真空干燥速率最快, 产品品质较好。由于微波具有降解作用, 所以微波真空干燥可能会引起原料中活性成分的变化, 从

基金项目:湖南省教育厅项目(编号:17C0764);湖南省重点研发计划项目(编号:2016NK2113)

作者简介:夏磊,男,湖南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:李清明(1973—),男,湖南农业大学副教授。

E-mail:liqmemail@163.com

收稿日期:2018-12-03

而影响其功能活性,但目前针对淮山微波真空干燥的研究^[7]主要集中在干燥特性、动力学及产品的物理、化学性质等方面,关于微波真空干燥对淮山功能活性的影响尚未见报道。

本试验拟以多糖含量、白度和复水率为考察指标,通过单因素和二次旋转正交试验,探究微波功率、真空度、切片厚度等因素对淮山微波真空干燥品质的影响,并进行工艺优化,通过测定其抗氧化能力与功能活性成分含量,以期揭示微波真空干燥对淮山功能活性的影响,为淮山微波真空干燥工业化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜淮山:由双峰县青树坪镇金土地农业合作社提供,挑选个体完整、粗细均匀、表皮无霉、无病虫害、无机械损伤的淮山;

无水乙醇、甲醇、氢氧化钠、邻苯三酚:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

三羟甲基氨基甲烷(Tris-base):分析纯,美国 Sigma-Aldrich 公司;

α -淀粉酶、糖化酶:分析纯,上海瑞永生物科技有限公司;

DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼):分析纯,东京化成工业株式会社。

1.2 仪器与设备

电子天平:TP-1200A 型,湘仪天平仪器设备有限公司;

分析天平:BS224S 型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

微波真空干燥箱:JDH-1GZ 型,广州永泽微波能设备有限公司;

色彩色差计:CR-400 型,日本 KONICA MINOLTA 公司;

可见分光光度计:V-5000 型,上海元析仪器有限公司;

台式超声波清洗器:KM-600DV 型,昆山美美超声仪器有限公司;

台式低速离心机:TDZ5 型,湖南赫西仪器装备有限公司;

高效液相色谱仪:1260-Agilent 型,美国安捷伦科技有限公司;

旋转蒸发器:N-1200AS 型,东京理化仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 微波真空干燥 将新鲜淮山去皮、洗净、切片,根据单因素及旋转正交试验设计调整工艺参数,干燥至淮山干基含水率低于 0.3 g/g,密封保存。

1.3.2 单因素试验

(1) 装载量:固定真空度 -0.07 MPa、转盘转速 8 r/min、切片厚度 3 mm、干燥温度 55 ℃,考察不同装载

量(20,40,60,80,100 g/kW)对多糖含量、白度和复水率的影响。

(2) 真空度:固定装载量 60 g/kW、转盘转速 8 r/min、切片厚度 3 mm、干燥温度 55 ℃,考察不同真空度(-0.05,-0.06,-0.07,-0.08,-0.09 MPa)对多糖含量、白度和复水率的影响。

(3) 转盘转速:固定装载量 60 g/kW、真空度 -0.07 MPa、切片厚度 3 mm、干燥温度 55 ℃,考察不同转盘转速(2,4,6,8,10 r/min)对淮山多糖含量、白度和复水率的影响。

(4) 切片厚度:固定装载量 60 g/kW、真空度 -0.07 MPa、转盘转速 8 r/min、干燥温度 55 ℃,考察不同切片厚度(1,2,3,4,5 mm)对淮山多糖含量、白度和复水率的影响。

(5) 干燥温度:固定装载量 60 g/kW、真空度 -0.07 MPa、转盘转速 8 r/min、切片厚度 3 mm,考察不同干燥温度(45,50,55,60,65 ℃)对多糖含量、白度和复水率的影响。

1.3.3 响应面优化试验 通过单因素试验发现,干燥温度、切片厚度、真空度对淮山微波真空干燥品质影响较大,故以这三个因素为自变量,利用 Design-Expert 8.0.6 软件,以多糖含量、白度、复水率为响应值,进行三因素五水平二次旋转正交设计组合试验,确定最佳的干燥工艺条件。

1.3.4 指标测定方法

(1) 淮山多糖提取与测定:称取 2 g 淮山干片研磨粉碎,置于 100 mL 容量瓶中,加 80 mL 蒸馏水,超声辅助提取 1.5 h,再于沸水浴中加热 1 h,冷却后补加水至刻度线,取 50 mL 提取液置于 100 mL 具塞锥形瓶中,加 10% α -淀粉酶液 1 mL 和磷酸盐缓冲液 0.5 mL,于 55~60 ℃ 酶解 1 h,再加 5% 糖化酶液 0.5 mL,于 60 ℃ 水解 1 h(用碘液检验是否水解完全)后,在电炉上加热至沸(灭酶),冷却定容;取 5 mL 提取液于 50 mL 离心管中,加 20 mL 无水乙醇,摇匀后 4 ℃ 静置过夜,以 5 000 r/min 离心 15 min,沉淀即为粗多糖;粗多糖复溶后经过 Sevag 试剂[氯仿:正丁醇=5:1(体积比)]除蛋白,在脱蛋白后的多糖溶液中加入 3 倍无水乙醇,沉淀用丙酮、乙醚反复洗涤,抽滤,将沉淀用水溶解定容至 100 mL 备用。使用苯酚-硫酸法测定,并以葡萄糖为标准物绘制标准曲线。

(2) 色泽测定:采用 Hunter(Lab)颜色系统表示,其中 L 值表示明亮度, a 、 b 值表示色度。先用陶瓷标准板对色差计进行色差校准,再将色差计测量口对准淮山干片进行测量,记录显示的 L 、 a 、 b 值,代入亨特白度公式 $[W_H = 100 - \sqrt{(100-L)^2 + a^2 + b^2}]$ 计算各组淮山的白度值,并做方差分析。

(3) 复水率测定:用天平测量淮山干片的质量记为 m_0 ,再将干片置于 60 ℃ 温水中恒温浸泡 30 min,取出后

擦干表面水分,测量质量记为 m_1 ,按式(1)计算复水率。

$$R = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R ——复水率, %;

m_0 ——复水前干淮山的质量, g;

m_1 ——复水后淮山片的质量, g。

(4) 抗氧化活性测定: DPPH 自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基清除率分别参考曾维才等^[8]、蒋方程等^[9]和张黎明等^[10]的试验方法。

(5) 多酚、黄酮、尿囊素测定: 分别按照李宁宁等^[11]、赵立庭等^[12]和李鑫等^[13]的方法进行提取、测定, 绘制标准曲线, 并计算含量。

1.3.5 数据处理 每个样品重复 5 次试验, 采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行响应面试验设计及方差分析, 使用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

由表 1~5 可以看出, 装载量和转盘转速对指标的影响不显著, 而干燥温度、切片厚度、真空度对淮山干燥产品的多糖含量、白度和复水率有显著影响。

蒋方程等^[9]和付小雨^[14]测定不同产地、不同品种山药中的多糖含量, 发现其值一般在 3%~8%。化春

表 1 不同装载量对淮山品质的影响[†]

Table 1 Effect of different microwave power density on yam quality ($n=5$)

装载量/ (g · kW ⁻¹)	多糖含量/%	白度	复水率/%
20	3.11±0.11 ^c	77.01±0.78 ^b	218.78±1.81 ^b
40	3.14±0.09 ^c	77.06±0.73 ^b	219.12±1.63 ^b
60	3.64±0.14 ^b	77.81±0.81 ^a	223.74±1.39 ^a
80	3.68±0.12 ^b	77.89±0.83 ^a	223.03±1.51 ^a
100	4.03±0.15 ^a	77.85±0.76 ^a	223.58±1.72 ^a

† 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 不同真空度对淮山品质的影响[†]

Table 2 Effect of different vacuum degree on yam quality ($n=5$)

真空度/MPa	多糖含量/%	白度	复水率/%
-0.05	3.07±0.13 ^c	68.52±0.68 ^c	209.28±1.21 ^d
-0.06	3.51±0.09 ^b	68.91±0.49 ^c	213.43±1.67 ^c
-0.07	4.16±0.11 ^a	78.03±0.61 ^a	224.21±1.73 ^a
-0.08	4.14±0.06 ^a	78.10±0.73 ^a	223.94±1.34 ^a
-0.09	3.59±0.12 ^b	75.53±0.81 ^b	217.78±1.55 ^b

† 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 不同转盘转速对淮山品质的影响[†]

Table 3 Effect of different rotating speed on yam quality ($n=5$)

转盘转速/ (r · min ⁻¹)	多糖含量/%	白度	复水率/%
2	4.06±0.13 ^a	77.82±0.61 ^a	224.13±1.49 ^a
4	4.10±0.11 ^a	77.85±0.90 ^a	223.92±2.05 ^a
6	4.03±0.05 ^a	77.78±0.76 ^a	224.05±1.99 ^a
8	4.08±0.10 ^a	77.81±0.49 ^a	224.21±1.56 ^a
10	4.04±0.08 ^a	77.79±0.92 ^a	223.94±1.73 ^a

† 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 不同切片厚度对淮山品质的影响[†]

Table 4 Effect of different slice thickness on yam quality ($n=5$)

切片厚度/mm	多糖含量/%	白度	复水率/%
1	3.21±0.15 ^c	68.51±0.86 ^d	215.56±2.13 ^c
2	3.76±0.13 ^b	68.94±0.73 ^d	219.46±1.56 ^b
3	4.11±0.12 ^a	78.13±0.77 ^a	223.97±1.64 ^a
4	4.14±0.09 ^a	75.43±0.82 ^c	224.13±1.93 ^a
5	3.78±0.10 ^b	72.46±0.59 ^b	211.05±2.01 ^d

† 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 5 不同干燥温度对淮山品质的影响[†]

Table 5 Effect of different drying temperature on yam quality ($n=5$)

干燥温度/°C	多糖含量/%	白度	复水率/%
45	3.85±0.12 ^b	74.95±0.73 ^b	210.51±1.49 ^d
50	3.84±0.08 ^b	74.89±0.92 ^b	214.64±1.69 ^c
55	4.12±0.11 ^a	77.28±0.64 ^a	224.23±1.64 ^a
60	3.53±0.14 ^c	71.19±0.51 ^c	223.91±2.03 ^a
65	3.10±0.09 ^d	66.43±0.89 ^d	219.14±1.57 ^b

† 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

光^{[6]29-32}研究发现, 随着微波干燥温度的升高, 多糖含量逐渐升高, 但于 55~60 °C 后显著下降。可能是支链淀粉在微波的作用下, 发生解链, 造成多糖含量随着干燥温度的升高而增加。田玉庭等^[15]研究发现龙眼肉中的多糖含量随真空度的增加而增加。张雪等^[16]在研究中发现, 干燥温度对山药复水率有显著影响, 且温度在 50~60 °C 时, 复水比最高。陈丰^[17]在研究中发现, 莲子的复水率随真空度增大而增大, 复水能力在 -0.08 MPa 时最强, 而当真空度为 -0.09 MPa 时复水率反而降低。

2.2 二次旋转正交试验

在单因素试验基础上, 以多糖含量、白度、复水率为响应值, 进行三因素五水平二次旋转正交设计组合试验, 设计方案见表 6, 试验结果见表 7。

2.3 回归模型的建立与检验

根据二次旋转正交试验结果,使用 Design-Expert 8.0.6 软件进行数据处理,分别得到多糖含量、白度、复水率与干燥温度、切片厚度、真空度的回归模型:

$$Y_1 = 4.1305 - 0.1750X_1 - 0.0388X_2 + 0.0438X_3 + 0.2825X_1X_2 + 0.0075X_1X_3 - 0.0350X_2X_3 - 0.2448X_1^2 - 0.1648X_2^2 - 0.2073X_3^2, \quad (2)$$

$$Y_2 = 78.2421 + 0.1379X_1 + 1.3982X_2 + 1.2667X_3 + 0.6787X_1X_2 - 0.7962X_1X_3 - 0.4887X_2X_3 - 1.4246X_1^2 - 2.4729X_2^2 - 1.5131X_3^2, \quad (3)$$

表 6 因素水平编码表

Table 6 Coding of factors and levels

水平	X ₁ 温度/°C	X ₂ 厚度/mm	X ₃ 真空度/MPa
2	65	5	-0.09
1	60	4	-0.08
0	55	3	-0.07
-1	50	2	-0.06
-2	45	1	-0.05

表 7 二次旋转正交组合设计试验结果

Table 7 Experimental results of three factor two general revolving combination design (n=5)

标准序	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁ 多糖含量/%	Y ₂ 白度	Y ₃ 复水率/%
1	-1	-1	-1	4.21±0.08	72.16±2.67	206.81±2.11
2	1	-1	-1	3.24±0.14	71.43±1.82	215.63±3.57
3	-1	1	-1	3.39±0.11	73.23±0.98	207.51±0.82
4	1	1	-1	3.26±0.10	78.44±1.42	213.26±1.64
5	-1	-1	1	4.26±0.09	72.54±1.67	215.49±3.49
6	1	-1	1	3.11±0.13	71.85±2.11	225.60±2.79
7	-1	1	1	3.09±0.16	74.88±2.36	211.64±1.58
8	1	1	1	3.28±0.11	73.68±0.98	221.23±2.62
9	-2	0	0	3.34±0.06	73.44±1.27	206.61±0.86
10	2	0	0	3.01±0.09	66.02±2.81	221.43±2.54
11	0	-2	0	3.18±0.12	68.23±2.03	215.26±1.34
12	0	2	0	3.81±0.15	72.31±0.99	211.84±2.10
13	0	0	-2	3.08±0.11	67.15±1.69	209.23±0.94
14	0	0	2	3.57±0.08	78.81±1.93	219.87±1.02
15	0	0	0	4.14±0.09	79.06±1.56	223.44±1.68
16	0	0	0	4.12±0.11	77.79±1.82	221.85±0.54
17	0	0	0	4.16±0.12	78.77±1.58	224.21±1.68
18	0	0	0	4.15±0.14	78.53±2.36	225.34±1.29
19	0	0	0	4.11±0.07	76.98±2.11	222.94±2.24
20	0	0	0	4.15±0.08	78.66±1.86	223.21±2.84

$$Y_3 = 223.1786 + 3.9943X_1 - 1.0451X_2 + 3.2517X_3 - 0.4487X_1X_2 + 0.6412X_1X_3 - 0.8185X_2X_3 - 2.5294X_1^2 - 2.6469X_2^2 - 2.3969X_3^2. \quad (4)$$

对回归方程进行方差分析,并进行拟合度和显著性检验,结果见表 8~10。

由表 8 可知,方程回归性检验 $F_1 = 5.32, P = 0.0077 < 0.01$,说明该模型极显著;方程失拟性检验 $F_2 = 25.69, P = 0.5154 > 0.05$,说明失拟项不显著;同时模型的相关系数 $R^2 = 0.9149$,说明回归方程和试验结果拟合度较高。可以认为回归模型成立,并能较好地描述 3 个因素与淮山干片中多糖含量的关系。

由表 9 可知,方程回归性检验 $F_1 = 4.63, P = 0.0126 < 0.05$,说明该模型显著;方程失拟性检验 $F_2 = 5.18, P =$

$0.0649 > 0.05$,说明失拟项不显著;同时模型的相关系数 $R^2 = 0.9259$,说明回归方程和试验结果拟合度较高。可以认为回归模型成立,并能较好地描述这 3 个因素与淮山干片白度之间的关系。

由表 10 可知,方程回归性检验 $F_1 = 30.42, P < 0.0001$,说明该模型极显著;方程失拟性检验 $F_2 = 3.11, P = 0.1191 > 0.05$,说明失拟项不显著;同时模型的相关系数 $R^2 = 0.9330$,说明回归方程和试验结果拟合度较高。可以认为回归模型成立,并能较好地描述这 3 个因素与淮山干片复水率之间的关系。

2.4 各因素协同作用分析

2.4.1 各因素对多糖含量的交互作用响应面分析 由

表 8 多糖含量回归方程方差分析

Table 8 Variance analysis of polysaccharide content regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
X ₁	0.490	1	0.490	5.420	0.042 2
X ₂	0.024	1	0.024	0.270	0.617 5
X ₃	0.031	1	0.031	0.340	0.573 5
X ₁ X ₂	0.640	1	0.640	7.060	0.024 0
X ₁ X ₃	0.005	1	0.005	0.005	0.945 2
X ₂ X ₃	0.010	1	0.010	0.110	0.748 8
X ₁ ²	1.510	1	1.510	16.650	0.002 2
X ₂ ²	0.680	1	0.680	7.550	0.020 6
X ₃ ²	1.080	1	1.080	11.940	0.006 2
失拟	0.900	5	0.180	25.690	0.515 4
误差	0.002	5	0.001		
回归	3.530	9	0.390	4.330	0.007 7
剩余	0.900	10	0.090		
总和	4.430	19			

表 9 白度回归方程方差分析

Table 9 Variance analysis of whiteness regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
X ₁	0.19	1	0.19	0.04	0.848 4
X ₂	26.04	1	26.04	5.23	0.045 2
X ₃	27.59	1	27.59	5.55	0.040 3
X ₁ X ₂	3.69	1	3.69	0.74	0.409 6
X ₁ X ₃	5.07	1	5.07	1.02	0.336 5
X ₂ X ₃	1.91	1	1.91	0.38	0.549 3
X ₁ ²	43.43	1	43.43	8.73	0.014 4
X ₂ ²	106.10	1	106.10	21.32	0.001 0
X ₃ ²	47.65	1	47.65	9.58	0.011 4
失拟	48.21	5	9.64	5.18	0.064 9
误差	1.55	5	0.31		
回归	207.36	9	23.04	4.63	0.012 6
剩余	49.75	10	4.98		
总和	257.11	19			

图 1 可知,干燥温度、切片厚度和真空度的交互作用对多糖含量的影响显著。当干燥温度上升时,多糖含量先升后降,并于 0 水平左右达到最高值;切片厚度增加时,多糖含量也呈先增后减的趋势,但影响没有干燥温度那么显著;真空度上升时,多糖含量先缓慢增加,并于 0 水平后迅速减小。徐晚秀等^[18]研究发现干燥温度和物料厚度对铁棍山药多糖含量有显著影响。

2.4.2 各因素对白度的交互作用响应面分析 由图 2 可知,干燥温度、切片厚度和真空度的交互作用对白度的影响显著。当干燥温度上升时,白度先缓慢增加,后迅速减

表 10 复水率回归方程方差分析

Table 10 Variance analysis of regression equation of rehydration rate model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
X ₁	255.28	1	255.28	88.50	<0.000 1
X ₂	17.49	1	17.49	6.06	0.033 5
X ₃	169.20	1	169.20	58.66	<0.000 1
X ₁ X ₂	1.61	1	1.61	0.56	0.472 1
X ₁ X ₃	3.29	1	3.29	1.14	0.310 7
X ₂ X ₃	5.36	1	5.36	1.86	0.202 6
X ₁ ²	160.86	1	160.86	55.77	<0.000 1
X ₂ ²	176.16	1	176.16	61.07	<0.000 1
X ₃ ²	144.45	1	144.45	50.08	<0.000 1
失拟	21.83	5	4.37	3.11	0.119 1
误差	7.01	5	1.40		
回归	789.72	9	87.75	30.42	<0.000 1
剩余	28.84	10	2.88		
总和	818.56	19			

小,+2 水平(65 ℃)时,白度值达到最低,说明温度对淮山干片白度影响十分明显;切片厚度增加时,白度先迅速增加,在 0 水平左右达到最大值后缓慢减小。真空度增加时,白度先增后减。

2.4.3 各因素对复水率的交互作用响应面分析 由图 3 可知,干燥温度、切片厚度和真空度的交互作用对复水率的影响显著。当干燥温度上升时,复水率先迅速增加,后缓慢减小,-2 水平(45 ℃)时,复水率值达到最低,说明较低的干燥温度对淮山干片复水率影响十分显著;切片厚度增加时,复水率先增后减,在 0 水平左右达到最大值。真空度增加时,复水率先迅速增大,而后缓慢减小。周琦等^[19]研究发现真空度及物料厚度对微波真空干燥柠檬片的复水率和色差值有显著影响。

2.5 淮山微波真空干燥工艺优化

经三因素五水平二次旋转试验及响应面优化,并根据 3 个品质指标的重要程度,分配多糖含量、白度、复水率的权重分别为 0.4,0.3,0.3,采用 Design-Expert 8.0.6 软件分析得到干燥温度、切片厚度、真空度对应的参数分别为 55 ℃、3 mm、-0.08 MPa,此时得到的预测指标值分别为多糖含量 4.13%、白度 78.81、复水率 223.88%。根据以上最佳工艺参数对预测值进行验证,得到淮山干片的多糖含量为(4.12±0.08)%、白度为(78.04±0.82)、复水率为(223.29±1.31)%。与预测值偏差<5%,说明该试验结果与模型拟合度高。因此,该响应面分析所得的优化工艺参数有参考价值,对实际生产加工有一定的指导作用。

2.6 抗氧化活性研究与评价

由图 4 可知,随着淮山溶液质量浓度的增加,其对自由基的清除率均呈上升趋势。当淮山溶液达到最大试验

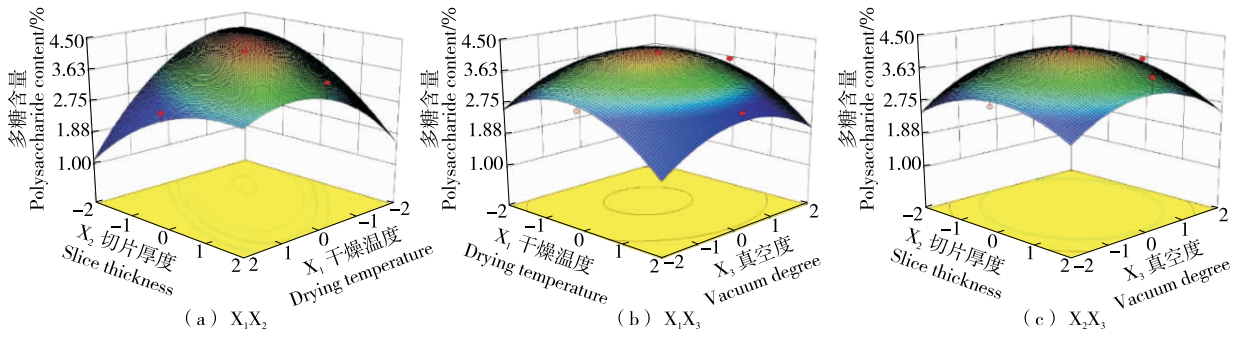


图 1 各因素协同作用对多糖含量的影响

Figure 1 Effects of synergy of factors on polysaccharide content of dried yam

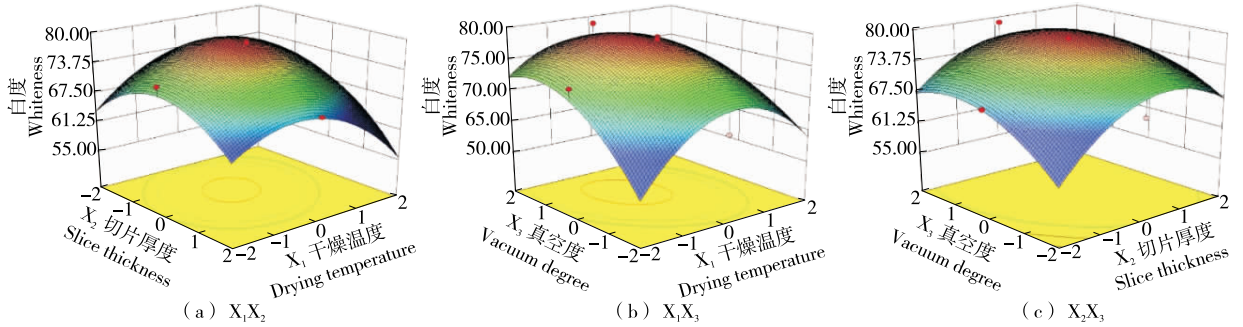


图 2 各因素协同作用对白度的影响

Figure 2 Effect of synergy of factors on whiteness of dried yam

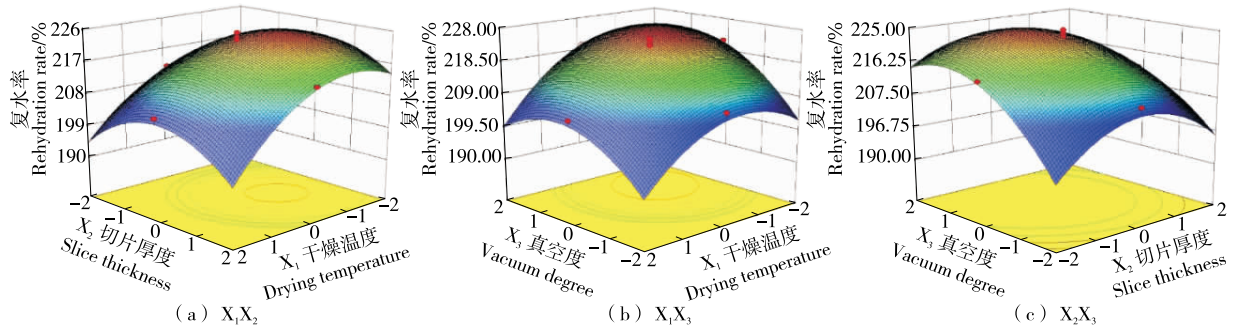


图 3 各因素协同作用对复水率的影响

Figure 3 Effect of synergy of factors on rehydration rate of dried yam

浓度(50 mg/mL)时,其对 DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子的清除率分别达到(88.43±0.66)%, (86.52±0.51)%, (83.81±0.75)%, 半抑制率浓度(IC₅₀)分别为(18.61±0.11), (19.86±0.15), (21.06±0.14) mg/mL。蒋方程等^[16]测定铁棍山药、蕲春山药、淮山药水提取物清除 DPPH 自由基的 IC₅₀ 值分别为 35.05, 37.68, 40.26 mg/mL。苏小军等^[20]测定喷雾冷冻干燥的紫淮山全粉(25 mg/mL)对 DPPH 自由基和羟基自由基的清除率分别为 67.15% 和 54.45%。Hsu 等^[21]研究了台农 2 号和紫淮山等 3 个品种在冷冻干燥、热风干燥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,在 200 mg/mL 浓度水平时,冷冻的紫淮山全粉自由基清除能力接近 100%。

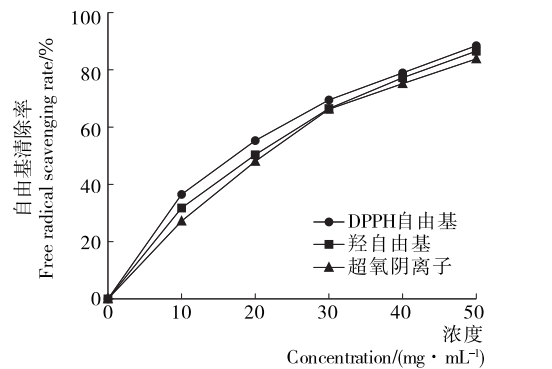


图 4 微波真空干燥淮山对 3 种自由基的清除效果
Figure 4 Scavenging capacity of microwave vacuum drying yam for three kinds of free radicals

2.7 功能活性成分

由表 11 可知,与新鲜淮山相比较,微波真空干燥过程中淮山的活性成分损失率约为 4%~10%。Jiang 等^[22] 研究表明,相较于传统干燥方式,微波真空干燥的原料功能活性成分损失更少。衡银雪等^[23] 测定微波真空干燥、微波干燥、真空干燥、热风干燥黄精的多酚含量分别为(1.38±0.07),(0.87±0.1),(0.90±0.08),(0.44±0.09) mg/g。功能活性成分的损失与干燥环境的氧含量和干燥温度等因素密切相关,微波真空干燥过程具有较高的真空度,既能加速水分的蒸发,缩短干燥时间,又可以在一定程度上避免活性成分的氧化。

表 11 新鲜和微波真空干燥淮山功能活性成分含量

Table 11 Content of functional active components in fresh yam Microwave vacuum drying yam (n=5)

mg/g			
样品	多酚	黄酮	尿囊素
新鲜淮山	0.83±0.03	1.43±0.05	7.18±0.07
干燥淮山	0.71±0.05	1.32±0.04	6.86±0.08

3 结论

淮山的最佳微波真空干燥工艺条件为干燥温度 55℃、切片厚度 3 mm、真空度 -0.08 MPa、装载量 100 g/kW、转盘转速 8 r/min。此条件下得到的淮山产品多糖含量为(4.12±0.08)%、白度为(78.04±0.82)、复水率为(223.29±1.31)%。多酚、黄酮、尿囊素的含量分别为(0.71±0.05),(1.32±0.04),(6.86±0.08) mg/g。当淮山浓度达到 50 mg/mL 时,对 DPPH 自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基的清除率分别为(88.43±0.66)%,(86.52±0.51)%,(83.81±0.75)%。半抑制率浓度(IC₅₀)分别为(18.61±0.11),(19.86±0.15),(21.06±0.14) mg/mL。本试验说明了微波真空干燥淮山的产品质量好,抗氧化能力强,也证明了微波对淮山中活性成分的损耗小,为淮山的微波真空工业化干燥加工提供了理论支持,今后可结合傅里叶变换红外光谱、X 衍射等技术,进一步研究干燥过程中淮山功能与结构的变化。

参考文献

[1] 马丽苹, 焦昆鹏, 罗磊, 等. 怀山药抗性淀粉理化性质及体外消化性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 41-46.
 [2] 张黎骅, 武莉峰, 党鑫凯, 等. 鲜切高山野山药片微波间歇干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 39-44, 92.
 [3] 李辉, 林河通, 袁芳, 等. 荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 107-112.
 [4] 丁睿. 马铃薯微波真空干燥动力学及设备能耗的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2017: 25-34.

[5] 张乐, 赵守涣, 王赵改, 等. 板栗微波真空干燥特性及干燥工艺研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 206-210.
 [6] 化春光. 微波真空干燥对怀山药片品质的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2011.
 [7] 张丽晶, 林向阳, ROGER Ruan, 等. 绿茶微波真空干燥工艺的优化[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 143-147.
 [8] 曾维才, 石碧. 天然产物抗氧化活性的常见评价方法[J]. 化工进展, 2013, 32(6): 1 205-1 213, 1 247.
 [9] 蒋方程, 李傲然, 何静仁, 等. 不同品种山药的营养成分分析及其水提物的体外抗氧化能力研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 6-11.
 [10] 张黎明, 李瑞超, 郝利民, 等. 响应面优化玛咖叶总黄酮提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 233-239.
 [11] 李宁宁, 马占玲, 陈思, 等. 山药中多酚的提取及其对亚硝酸盐的清除作用[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(2): 475-480.
 [12] 赵立庭, 赵华, 刘阳, 等. 铁棍山药皮中黄酮化合物提取工艺条件优化[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(4): 59-63.
 [13] 李鑫, 李坚, 苏小军, 等. 高效液相色谱法同时测定淮山中 6 种活性成分[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 296-299.
 [14] 付小雨. 不同产地山药营养品质和药理活性成分的比较[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012: 23-28.
 [15] 田玉婷, 陈洁, 庄培荣, 等. 响应面法优化龙眼肉微波真空干燥工艺[J]. 热带作物报, 2011, 32(12): 2 352-2 357.
 [16] 张雪, 马永生, 陈复生, 等. 真空微波干燥对小米、山药营养与品质特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(4): 34-38.
 [17] 陈丰. 莲子微波真空干燥工艺的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 18-20.
 [18] 徐晚秀, 李臻锋, 李静, 等. 微波干燥温度和物料厚度对铁棍山药片品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 191-193, 236.
 [19] 周琦, 彭林, 陈厚荣. 响应面法优化柠檬片微波真空干燥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 186-193.
 [20] 苏小军, 罗振海, 李雁含, 等. 紫淮山全粉喷雾冷冻干燥工艺及其特性研究[J]. 激光生物学报, 2018(4): 373-380, 372.
 [21] HSU Chin-lin, CHEN Wenlung, WENG Yih-ming, 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.
 [22] JIANG Ning, LIU Chun-quan, LI Da-jing, et al. Effect of thermosonic pretreatment on drying kinetics and energy consumption of microwave vacuum dried Agaricus bisporus, slices[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 177: 21-30.
 [23] 衡银雪, 郑旭照, 殷钟意, 等. 不同干燥方法对黄精干燥特性和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 158-161, 167.