

变温压差膨化干燥法制备紫薯生全粉研究

Study on explosion puffing drying technology for purple sweet potato raw granules

刘 阳 廖卢艳 傅亚平 吴卫国

LIU Yang LIAO Lu-yan FU Ya-ping WU Wei-guo

(湖南农业大学食品科技学院, 湖南长沙 410128)

(Food Science and Technology College of Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

摘要:以新鲜紫薯为原料,采用变温压差膨化干燥法制备紫薯生全粉,探讨不同膨化温度、停滞时间、抽空温度对紫薯生全粉彩度指数 b 值、花青素含量、碘蓝值的影响,运用 Box-Behnken 试验设计优化变温压差膨化干燥法制备紫薯生全粉的技术参数。结果表明:3 个因素对紫薯生全粉的色泽、花青素含量、碘蓝值的影响各异,其中膨化温度和抽空温度综合影响最大;最优干燥条件为膨化温度 80 °C、停滞时间 5 min、抽空温度 69 °C,在该条件下制得的紫薯生全粉颜色鲜亮,花青素含量及紫薯香味均保留较好。

关键词:紫薯;全粉;变温压差膨化干燥

Abstract: The purple sweet potato was used as raw material to make purple sweet potato raw granules by explosion puffing drying technology at modified temperature and pressure. The study includes the effects of different puffing temperature, stagnant time, vacuum drying temperature on the product color index b , content of anthocyanins and iodine blue value. By using Box-Behnken design of the response surface methodology (RSM) to determine the technical conditions as follows: puffing temperature was 80 °C, stagnant time was 5 min and vacuum drying temperature was 69 °C. Different factors have different effects on the product, and the biggest factors are puffing temperature and vacuum drying temperature. The prepared purple sweet potato raw granules under the conditions have better color, high anthocyanins and aromas are retained.

Keywords: purple sweet potato; sweet potato granules; explosion puffing drying

紫薯 (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.), 又称黑薯, 为旋花科番薯属^[1], 是一种新型特有的甘薯品种, 因其富含花青素

故薯皮呈紫黑色、肉质呈紫红色至深紫色, 具有较高的食用、药用及保健作用^[2]。据日本农产品检测中心给出的分析报告^[3-5], 紫薯的营养成分含量比普通甘薯都高, 如赖氨酸、铜、锰、钾、锌的含量比普通甘薯高 3~8 倍。然而, 新鲜紫薯由于水分含量高, 易发生霉变腐烂, 不易长期贮藏, 不能周年供应, 影响其开发利用。如将紫薯经过清洗、去皮、切分、干燥、粉碎等工序加工成紫薯全粉, 不仅可以较全地保留紫薯中的营养成分, 使其易于包装存放, 且能延长保质期, 解决紫薯季节性限制的问题^[6], 同时可拓展紫薯的应用范围。

目前, 对于紫薯全粉的加工技术还不成熟, 特别是紫薯生全粉加工中花青素的保留较难。常用的热风干燥法所得紫薯全粉质量欠佳、且耗时长^{[7]30-38}; 真空冷冻干燥成本较大, 干燥效率低^{[8][9]41}。变温压差膨化干燥是一种新型、环保且节能的膨化干燥技术, 结合了传统真空冷冻干燥、热风干燥和微波真空干燥的优点^[10-11], 干燥效率高且应用范围广。此干燥技术下得到的产品, 其物料本身特有的色泽、香气及营养成分都能较好地保留。目前, 变温压差膨化干燥技术已被广泛应用于果蔬膨化加工, 如冬枣^[12]、紫薯脆片^[13]、胡萝卜干^[14]、番木瓜^[15]、甘薯片等^[16-17], 但运用变温压差膨化干燥技术制备紫薯全粉的相关报道甚少。与紫薯熟全粉相比, 紫薯生全粉细胞破碎度小、淀粉含量高, 胶凝特性好, 故其加工特性远优于熟全粉^[18], 本研究拟以紫薯为原料, 应用变温压差膨化干燥技术制备紫薯生全粉, 并采用响应曲面法优化干燥工艺参数, 旨在为获得更优质的紫薯生全粉, 也为变温压差膨化干燥设备的应用推广提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及主要试剂

紫色甘薯: 浙紫 3 号, 湖南省农业科学院作物所提供;
L-半胱氨酸: 食品级, 国药集团化学试剂有限公司;
抗坏血酸: 食品级, 河北维尔康制药有限公司;
盐酸、碘化钾、碘、无水乙醇、醋酸钠、醋酸、氯化钾: 分析

作者简介: 刘阳, 女, 湖南农业大学在读硕士研究生。

通讯作者: 吴卫国 (1968-), 男, 湖南农业大学教授, 博士, 博士生导师。E-mail: 1061051403@qq.com

收稿日期: 2015-11-07

纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

变温压差果蔬膨化干燥设备: QDPH-V5 型, 天津市勤德科技有限公司;

可见分光光度计: WFJ-7200 型, 龙尼柯仪器有限公司;

全自动色差计: CR-10 型, 日本美能达公司;

低速离心机: TDZ4 型, 湖南赫西仪器装备有限公司;

高速多功能粉碎机: Q-100AZ 型, 郑州华德机械厂。

1.3 试验方法

1.3.1 全粉制备流程

新鲜紫薯原料→清洗、去皮→均匀切片→浸泡护色→变温压差膨化干燥→粉碎、筛分→包装→成品

1.3.2 操作要点

(1) 去皮切片: 去掉腐烂、机械损坏部分, 切成 2~3 mm 的紫薯片。

(2) 护色: 选用护色液(L-半胱氨酸 0.06%, 抗坏血酸 0.6%, 食盐 0.6%) 进行浸泡护色 20 min, 然后沥干。

(3) 变温压差膨化干燥: 将沥干的紫薯片平铺于筛网上, 置于膨化罐中升温至设定的膨化温度, 罐内压力达 0.1~0.3 MPa, 使物料在此状态下保持一定时间(即停滞时间)后瞬间泄压至真空度为-0.1 MPa, 同时设定真空温度, 使物料在此真空状态下加热脱水, 得含水量<10%的紫薯片。

(4) 粉碎过筛: 干燥后的紫薯片粉碎后过 80 目筛。

1.3.3 指标测定

(1) 色泽测定: 采用全自动色差计进行紫薯生全粉的颜色测定^[19]。将制备好的紫薯生全粉样品均匀铺于白纸上, 用色差计检测, 记录仪器上的 L 、 a 、 b 值。结合感官分析, 发现紫薯生全粉色泽越好, b 值越小, 而 L 和 a 值在试验中的数值变化不大, 并不能恰当地反映样品色泽的差异, 故本试验选择以彩度指数 b 值为样品色泽评价指标, b 值越小, 产品紫色鲜亮, 色泽越好。因本样品整体为紫红色, 所测数据 b 值均为负值, 为作图显示清晰, 单因素试验数据以 b 值绝对值作图。

(2) 总花青素含量测定: 参考相关文献^[20-22], 修改如下: 准确称取紫薯生全粉样品 1.000 g 于 50 mL 锥形瓶中, 加入 pH 3.0 的浸提液 30 mL, 超声 0.5 h, 避光静置 2 h, 抽滤得提取液备用。准确量取 1.0 mL 提取液两份, 分别用 pH 1.0 和 pH 4.5 的缓冲液定容至 10 mL, 避光静置 2 h 使其达到平衡, 分别测定其在 520, 700 nm 处的吸光度值, 用蒸馏水作参比。总花青素(以干基计, mg/g) 按式(1)计算:

$$W = \frac{[(A_{520} - A_{700})_{\text{pH } 1.0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH } 4.5}]}{\epsilon \times Wt} \times Mw \times DF \quad (1)$$

式中:

W ——样品花青素含量, mg/g;

ϵ ——矢车菊-3-葡萄糖苷的摩尔吸光系数, 26 900;

DF ——稀释因子;

Mw ——矢车菊-3-葡萄糖苷的分子质量, 449.2;

Wt ——取样体积, mL。

(3) 碘蓝值测定: 碘蓝值可以作为紫薯全粉细胞破碎度的判别指标, 全粉的碘蓝值和细胞破碎度成正比, 碘蓝值越低, 说明全粉细胞破碎度越小, 产品越好, 本研究中碘蓝值以干基计。测定方法参照文献^[23]。

(4) 水分含量的测定: 按 GB/T 5009.3—2010 执行。

(5) 持水率、冻融析水率测定: 参照文献^[7]¹⁵。

(6) 吸油值的测定: 参照文献^[9]¹⁵。

1.3.4 单因素试验设计

(1) 膨化温度: 设定不同的膨化温度 50, 60, 70, 80, 90, 100 °C, 停滞时间 10 min, 抽空温度 60 °C, 控制水分含量 <10%, 筛分粒度为 80 目, 以色差计测定的彩度指数 b 值(绝对值)为评价指标, 结合感官分析, 确定适宜的膨化温度。

(2) 停滞时间: 设定不同的停滞时间 0, 5, 10, 15, 20, 25 min, 膨化温度 80 °C, 抽空温度 60 °C, 控制水分含量 <10%, 筛分粒度为 80 目, 以色差计测定的彩度指数 b 值(绝对值)为评价指标, 结合感官分析, 确定适宜的停滞时间。

(3) 抽空温度: 设定不同的抽空温度 40, 50, 60, 70, 80, 90 °C, 膨化温度 80 °C, 停滞时间 10 min, 控制水分含量 <10%, 筛分粒度为 80 目, 以色差计测定的彩度指数 b 值(绝对值)为评价指标, 结合感官分析, 确定适宜的抽空温度。

1.3.5 优化试验设计 根据前期单因素试验结果, 选用 $U_{15}(15)^3$ 均匀设计表, 根据响应面法中 Box-Behnken 试验设计原理设计三因素三水平试验, 研究膨化温度、停滞时间、抽空温度对紫薯生全粉彩度指数 b 值、碘蓝值和花青素含量的影响。

2 结果与分析

2.1 膨化温度对紫薯生全粉色泽的影响

由图 1 可知: 随着膨化温度的增加, 紫薯生全粉的色泽趋好, 当膨化温度为 70 °C 时, 彩度指数 b 值的绝对值最大, 继续升温, 产品的色泽变差。可能是设定的膨化温度低时, 水分散失较慢, 物料中的多酚氧化酶仍在活跃, 物料易发生褐变, 导致产品色泽下降; 而设定膨化温度高时, 花青素具有热不稳定性, 高温下易分解, 导致色度值降低, 特别是当温度为 100 °C 时, 产品色泽明显变差, 原因是温度过高易使物料出现焦糊, 影响产品色泽。综合感官分析及干燥效率, 选择干燥膨化温度为 60~80 °C 较适宜, 紫薯生全粉的色泽保留较好。

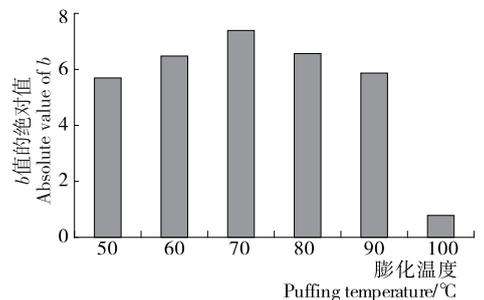


图 1 膨化温度对紫薯生全粉色泽的影响

Figure 1 Effect of explosion puffing temperature on the color of purple sweet potato granules

2.2 停滞时间对紫薯生全粉色泽的影响

由图 2 可知,随着停滞时间的延长,紫薯生全粉的彩度指数 b 值的绝对值呈先增后减的趋势,最佳点为 10 min。其中停滞时间为 0 min 和 5 min 时,产品色泽差异并不大,但停滞时间为 25 min 时,产品的色泽严重下降,可能是花青素的热稳定性差,长时间的高温处理导致色素损失较严重,色度值低。综合感官分析,选择干燥停滞时间为 5~15 min 较适宜,紫薯生全粉的色泽保留较好。

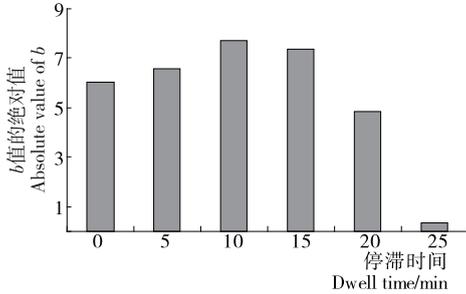


图 2 停滞时间对紫薯生全粉色泽的影响

Figure 2 Effect of dwell time on the color of purple sweet potato granules

2.3 抽空温度对紫薯生全粉色泽的影响

由图 3 可知,随着抽空温度的增加,紫薯生全粉的彩度指数 b 值的绝对值总体呈先增后减的趋势,当抽空温度为 70 °C 时最佳,且不同的抽空温度对产品色泽影响较大。其中抽空温度为 40 °C 时,所测产品色泽优于 50 °C,但其最终的干燥时间大大加长,干燥效率明显降低;抽空温度为 90 °C 时,干燥时间明显缩短,但产品出现明显的焦糊现象,色泽明显下降,且产品的气味中带有焦糊味。综合感官分析,选择干燥抽空温度为 60~80 °C 较适宜,紫薯生全粉的色泽、香气均保留较好。

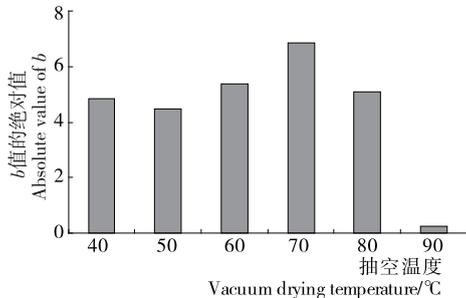


图 3 抽空温度对紫薯生全粉色泽的影响

Figure 3 Effect of vacuum drying temperature on the color of purple sweet potato granules

2.4 响应面试验方案及结果

根据响应面设计方法,以彩度指数 b 值、碘蓝值、花青素含量为响应值,膨化温度、停滞时间、抽空温度为自变量进行三因素三水平试验,因素水平设计见表 1,响应面设计及结果见表 2。

表 1 响应面因素水平编码表

Table 1 Coding of factors and levels in response surface analysis

水平	X_1 膨化温度/°C	X_2 停滞时间/min	X_3 抽空温度/°C
-1	60	5	60
0	70	10	70
1	80	15	80

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Experimental design and results of Box-Behnken

试验编号	X_1	X_2	X_3	Y_1 b 值	Y_2 花青素含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	Y_3 碘蓝值
1	1	0	-1	-7.517	1.578	5.804
2	-1	0	1	-4.970	1.324	5.745
3	1	0	1	-2.500	1.062	5.532
4	-1	0	-1	-5.713	1.198	5.814
5	0	-1	-1	-6.700	1.417	5.862
6	0	1	1	-2.943	1.061	5.497
7	-1	1	0	-6.400	1.275	5.708
8	0	-1	1	-3.810	1.104	5.606
9	0	0	0	-6.787	1.126	5.554
10	1	-1	0	-7.957	1.586	5.637
11	-1	-1	0	-6.597	1.532	5.695
12	1	1	0	-5.560	1.206	5.566
13	0	0	0	-6.423	1.138	5.504
14	0	0	0	-6.820	1.170	5.530
15	0	1	-1	-5.273	1.152	5.768

2.5 模型的建立及方差分析

对表 2 中的试验数据采用 Design Expert 8.0.6 软件进行二次多元回归拟合,得到膨化温度、停滞时间、抽空温度与产品彩度指数 b 值、花青素含量、碘蓝值之间的多元二次回归方程(2)~(4):

$$Y_1 = 115.12758 - 0.54439X_1 - 0.66847X_2 - 2.99677X_3 + 0.011X_1X_2 + 0.010685X_1X_3 - 2.8 \times 10^{-3}X_2X_3 - 2.22667 \times 10^{-3}X_1^2 + 0.010833X_2^2 + 0.017243X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 1.90954 - 0.13367X_1 - 0.11751X_2 + 0.14062X_3 - 6.15 \times 10^{-4}X_1X_2 - 1.605 \times 10^{-3}X_1X_3 + 1.11 \times 10^{-3}X_2X_3 + 1.81042 \times 10^{-3}X_1^2 + 2.96167 \times 10^{-3}X_2^2 - 3.52083 \times 10^{-4}X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 13.58071 - 0.079429X_1 - 4.54167 \times 10^{-3}X_2 - 0.13289X_3 - 4.2 \times 10^{-4}X_1X_2 - 5.075 \times 10^{-4}X_1X_3 - 7.5 \times 10^{-5}X_2X_3 + 8.13333 \times 10^{-4}X_1^2 + 1.63333 \times 10^{-3}X_2^2 + 1.13083 \times 10^{-3}X_3^2 \quad (4)$$

对式(1)~(3)进行回归模型变量分析及系数显著性检验,结果见表 3。

表3 回归系数显著性分析[†]

Table 3 Regression coefficient and significance analysis

模型变量	P 值		
	Y ₁	Y ₂	Y ₃
X ₁	0.846 5	0.557 4	0.0143*
X ₂	0.001 0**	0.002 2**	0.072 5
X ₃	<0.000 1***	0.004 7**	0.000 6***
X ₁ X ₂	0.007 4**	0.337 2	0.349 1
X ₁ X ₃	0.000 4***	0.002 6**	0.054 8
X ₂ X ₃	0.319 2	0.113 7	0.860 9
X ₁ ²	0.151 9	0.001 8**	0.012 1*
X ₂ ²	0.095 0	0.057 6	0.111 6
X ₃ ²	<0.000 1***	0.295 8	0.003 1**

† *** P<0.001; ** P<0.01; * P<0.05.

各方程 Y₁、Y₂、Y₃ 的 P 值分别为 0.000 1、0.004 1、0.004 9, 说明模型方程都极显著; 失拟项 P 值分别为 0.417 8, 0.090 9、0.218 1, 都大于 0.05, 说明差异不显著, 残差由随机误差引起; 模型决定系数 R² 分别为 0.991 0、0.964 5、0.961 5, 调整后系数分别为 0.974 9、0.900 5、0.892 3, 说明回归方程对试验的拟合度较好, 试验误差小, 在一定程度上可以代替真实试验进行预测和分析。

通过对模型回归系数的显著性检验结果可知, 抽空温度对产品彩度指数 b 值、花青素含量及产品碘蓝值都有极显著影响; 停滞时间对产品碘蓝值影响不显著, 对其他两个指标影响极显著; 膨化温度除对碘蓝值影响显著, 对其他两个指标影响都不显著。结合 F 值发现影响产品彩度指数 b 值的因素主次顺序为: 抽空温度>停滞时间>膨化温度; 影响产品中花青素含量的因素主次顺序为: 停滞时间>抽空温度>膨化温度; 影响产品中碘蓝值的因素主次顺序为: 抽空温度>膨化温度>停滞时间。

2.6 响应面交互作用分析

由表 3 可知, 对于产品彩度指数 b 值, 膨化温度和停滞时间的交互作用以及膨化温度和抽空温度的交互作用对其都有极显著影响, 原因可能是彩度指数 b 值主要反映产品色泽, 高温及低温长时的干燥易引起天然色素的降解、糖类物

质焦糖化, 导致产品色泽变差; 对于产品中花青素含量, 膨化温度和抽空温度的交互作用对其影响极显著; 对于产品碘蓝值, 数据显示各因素的交互作用对其影响不显著, 原因可能是碘蓝值主要反映全粉细胞破碎程度, 而经过晾干后的紫薯片水分含量并不高, 此干燥条件下不会产生足够的膨化动力使细胞被显著破坏。因此, 本试验对于其他情况的交互作用暂不讨论, 只分析对产品指标有极显著影响的交互作用。

依次固定 X₃ 为 0 水平、X₂ 为 0 水平, 分别观察 X₁ 和 X₂ 的交互作用、X₁ 和 X₃ 的交互作用对紫薯生全粉 Y₁ 的影响, 得到交互效应方程见式(5)、(6); 固定 X₂ 为 0 水平, 观察 X₁ 和 X₃ 的交互作用对紫薯生全粉 Y₂ 的影响, 得到交互效应方程见式(7)。

$$Y_{1(1,2)} = 115.127 58 - 0.544 39X_1 - 0.668 47X_2 + 0.011X_1X_2 - 2.226 67 \times 10^{-3} X_1^2 + 0.010 833X_2^2 \quad (5)$$

$$Y_{1(1,3)} = -115.127 58 + 0.544 39X_1 + 2.996 77X_3 - 0.010 685X_1X_3 + 2.226 67 \times 10^{-3} X_1^2 - 0.017 243X_3^2 \quad (6)$$

$$Y_{2(1,3)} = 1.909 54 - 0.133 67X_1 + 0.140 62X_3 - 1.605 \times 10^{-3} X_1X_3 + 1.810 42 \times 10^{-3} X_1^2 - 3.520 83 \times 10^{-4} X_3^2 \quad (7)$$

根据以上交互作用方程得到的响应面图见图 4~6。

由图 4 可知, 当抽空温度一定时, 膨化温度 < 70 °C, 随着停滞时间的延长, 产品 Y₁ 值呈先减后增的趋势; 而当膨化温度 > 70 °C 时, 随着停滞时间的延长, 产品 Y₁ 值依次递增, 产品色泽变差; 停滞时间为 10 min 以下, 随着膨化温度的升高, 产品 Y₁ 值缓慢减少; 停滞时间为 10 min 以上, 随着膨化温度的升高, 产品 Y₁ 值明显增加, 产品色泽变差, 原因可能是设定的膨化温度较高时, 花青素具有热不稳定性, 高温下易分解。由图 5 可知, 膨化温度和抽空温度交互作用显著, 当停滞时间一定时, 膨化温度 > 70 °C 时, 产品的 Y₁ 值随抽空温度的升高先缓慢下降后急剧上升, 原因可能是产品干燥时处于抽空温度下时间较长, 高温易导致紫薯花青素降解, 色泽降低; 抽空温度 < 70 °C 时, 随膨化温度的上升 Y₁ 值减少, 在一定水平时有交互最小值; 抽空温度 > 70 °C 时, 随膨化温度的升高 Y₁ 值也增加。由图 6 可知, 在一定的停滞时间下, 膨化温度 < 70 °C 时, 产品 Y₂ 值随抽空温度的升高呈先增后减趋势; 膨化温度 > 70 °C, 产品 Y₂ 值随抽空温度的升高直线下降。

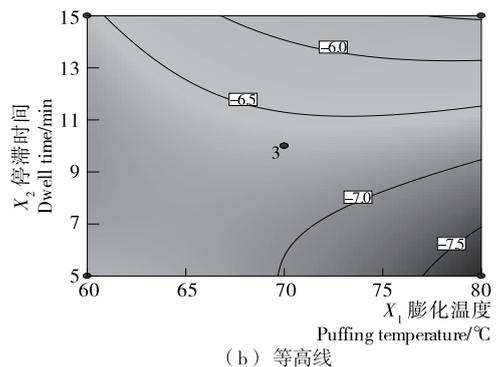
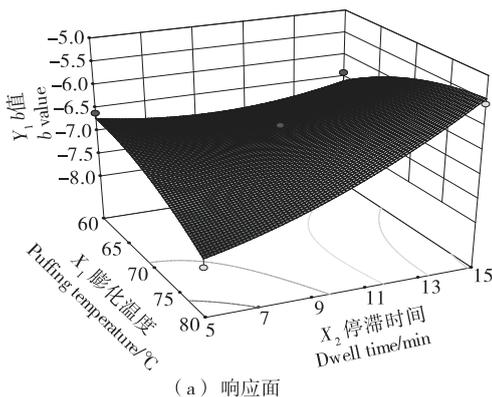
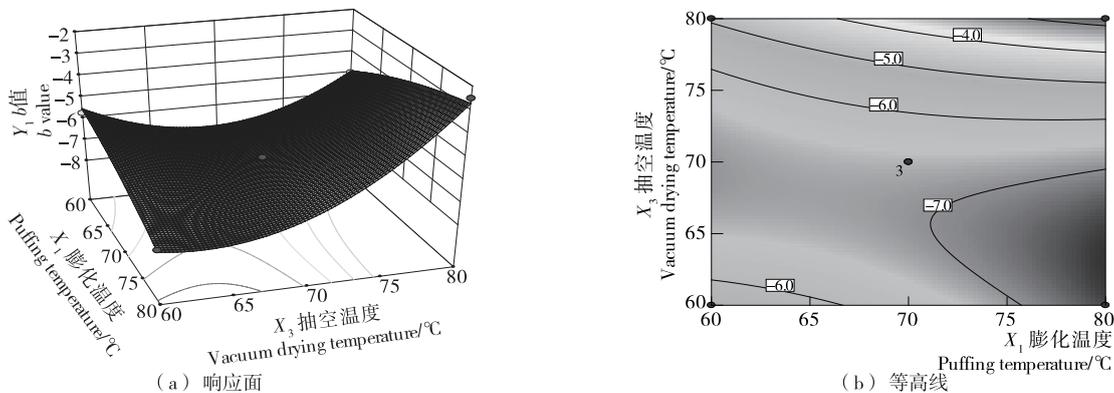
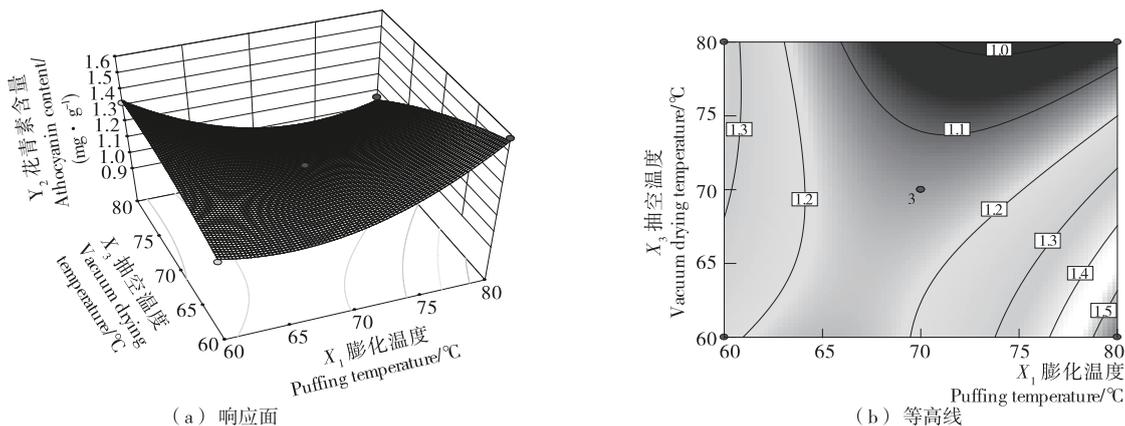


图 4 膨化温度和停滞时间对产品 Y₁ 的影响

Figure 4 Effect of explosion puffing temperature and dwell time on the purple sweet potato granules of Y₁

图 5 膨化温度和抽空温度对产品 Y_1 的影响Figure 5 Effect of explosion puffing temperature and vacuum drying temperature on the purple sweet potato granules of Y_1 图 6 膨化温度和抽空温度对产品 Y_2 的影响Figure 6 Effect of explosion puffing temperature and vacuum drying temperature on the purple sweet potato granules of Y_2

2.7 最佳工艺参数的确定及验证

目标产品要求彩度指数 b 值小、花青素含量高、碘蓝值低。采用 Design Expert 8.0.6 软件对工艺参数进行优化分析,得到变温压差膨化干燥制备紫薯生全粉的最佳工艺条件为膨化温度 80 °C、停滞时间 5.23 min、抽空温度 69.12 °C,该条件下产品彩度指数 b 值、花青素含量、碘蓝值的预测值分别为 -7.957、1.576 mg/g、5.661。考虑到试验实际操作的可性,将各参数值调整为膨化温度 80 °C、停滞时间 5 min、抽空温度 69 °C,在此条件下进行 3 次平行实验,所测结果取平均值,得到的产品彩度指数 b 值为 -7.827、花青素含量为 1.583 mg/g、碘蓝值为 5.594,各数值与预测值比较,其相对误差都在 5% 以下,说明模型的优化参数可靠,具有参考价值。测得终产品的持水率为 3.082 0 g/g,吸油值为 0.992 0 g/g,冻融析水率为 7.40%,说明该紫薯生全粉具有较好的加工特性。

3 结论

(1) 本研究采用响应面分析预测及验证试验结果,得到紫薯生全粉变温压差膨化干燥的最优工艺参数为:膨化温度 80 °C、停滞时间 5 min、抽空温度 69 °C,该条件下制得的紫薯生全粉彩度指数 b 值可达 -7.827,呈鲜艳的紫罗兰色,紫薯香味浓郁,远优于鼓风干燥产品;其碘蓝值为 5.594,说明

紫薯生全粉细胞完整性保持较好,利于后期加工。

(2) 在变温压差膨化干燥制备紫薯生全粉过程中,抽空温度、停滞时间、膨化温度对紫薯生全粉的色泽、花青素含量、碘蓝值的影响各不相同。抽空温度对三者的影响较大,而紫薯生全粉色泽对各因素的变化较敏感,故后期应用本设备干燥时应注重抽空温度的变化。

(3) 本研究运用变温压差膨化干燥制备紫薯生全粉,不仅大大提高了产品的品质,花青素损失大大减少,产品色泽保留较好,还提高了干燥效率,降低了干燥成本,为紫薯全粉的加工提出了新方法。

参考文献

- [1] 明兴加, 李坤培. 紫色甘薯的生理活性及开发应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(7): 144-147.
- [2] Oki T, Masuda M, Furuta S, et al. Involvement of anthocyanins and other phenolic compounds in radical-scavenging activity of purple-fleshed sweet potato cultivars[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(5): 1 752-1 756.
- [3] 王冬梅, 王建玲, 孙妮娜, 等. 紫甘薯的营养成分及开发利用研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(20): 6 762-6 763.
- [4] 蔡湛, 兰余, 赵淑娟, 等. 紫薯的抗氧化及活性成分研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(1): 43-48.

(下转第 214 页)

- tional Workshop on. Wuhan: IEEE, 2011: 34-36.
- [16] 王玲, 黄森, 张继澍, 等. 嘎拉苹果果实品质的电学特性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 402-407.
- [17] 安慧珍, 马惠玲, 任小林. 苹果果实贮藏期间电学参数与品质指标的关系[J]. 食品科学, 2013, 34(2): 298-302.
- [18] 刘亚平, 刘兴华, 李红波. 葡萄冷藏中电学参数与质地特性变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 343-348.
- [19] 刘亚平, 刘兴华. 采后失水处理对葡萄电学特性的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 143-149.
- [20] 郭文川, 朱新华, 郭康权, 等. 桃的电特性及新鲜度识别[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 112-115.
- [21] 王瑞庆, 张继澍, 马书尚. 基于电学参数的货架期红巴梨无损检测[J]. 农业工程学报, 2009(4): 243-247.
- [22] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 损伤对猕猴桃果实电特性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 6-11.
- [23] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 猕猴桃电特性与生理特性关系研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 97-102.
- [24] 廖宇兰. 基于介电特性的芒果无损检测技术研究[D]. 海南: 海南大学, 2008: 26-50.
- [25] 邵晓蕾, 黄森, 于春阳, 等. 尖柿果实采后电学特性与品质指标的关系[J]. 西北农业学报, 2010, 19(9): 80-87.
- [26] 马海军, 宋长冰, 张继澍, 等. 电激励信号频率对红点病苹果采后电学特性影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 97-101, 96.
- [27] 马海军, 冯美, 张继澍. 100 Hz~3.98 MHz 下苹果虎皮病果实电特性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 105-109.
- [28] Zywicka R, Pierzynowska-Korniak G, Wojcik J. Application of food products electrical model parameters for evaluation of apple puree dilution[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(4): 413-418.
- [29] Pierzynowska-Korniak G, Zywicka R, Wójcik J. Electric properties of apple purée and pulpy apple juices[J]. European Food Research and Technology, 2003, 216(5): 385-389.
- [30] Lawton B A, Pethig R. Determining the fat content of milk and cream using AC conductivity measurements[J]. Measurement Science and Technology, 1993, 4(1): 38-41.
- [31] Lizhi H, Toyoda K, Ihara I. Discrimination of olive oil adulterated with vegetable oils using dielectric spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(2): 167-171.
- [32] Castro-Giráldez M, Botella P, Toldrá F, et al. Low-frequency dielectric spectrum to determine pork meat quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(2): 376-386.
- [33] 王松磊, 贺晓光, 赵大鹏. 基于介电特性的羊肉品质无损检测[J]. 宁夏工程技术, 2013, 12(1): 30-34.
- [34] 金亚美, 王宁, 孟彤, 等. 全脂乳粉和脱脂乳粉在 1 kHz~10 MHz 下的介电特征研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 152-155.
- [35] 杨哪, 金亚美, 薛丽萍, 等. 利用电学阻抗技术检测巴氏杀菌乳的物理特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 275-283.
- [36] 张蕾. 鸡蛋介电特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [37] 秦文, 羽仓义雄, 铃木宽一, 等. 胡萝卜贮藏过程中电容与新鲜度的关系研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 160-162.
- [38] 马倩, 杨哪, 金亚美, 等. 盐渍期间黄瓜理化品质与电学参数的相关性[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(1): 41-47.
- [39] 金亚美, 杨哪, 张晋芳, 等. 真空醋渍黄瓜品质的介电检测[J]. 现代食品科技, 2013, 29(11): 2762-2766.

(上接第 153 页)

- [5] 吕昱, 严敏. 紫薯花色苷的生理功能及分离纯化研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 250-257.
- [6] 沈升法, 吴列洪, 李兵. 紫甘薯颗粒全粉加工专用品种品质指标和策略的初步探讨[J]. 核农学报, 2015, 29(5): 908-915.
- [7] 汤富蓉. 紫色甘薯全粉加工关键技术的研究[D]. 成都: 西华大学, 2011.
- [8] 丁媛媛. 甘薯变温压差膨化干燥技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011: 9.
- [9] 邓资靖. 紫薯全粉加工工艺研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [10] 黄寿恩, 李忠海, 何新益. 果蔬变温压差膨化干燥技术研究现状及发展趋势[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 242-245.
- [11] 宋阳. 变温压差膨化干燥甘薯脆片技术的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012: 8-9.
- [12] 何新益, 冯瑞伟, 黄宗海, 等. 冬枣变温压差膨化干燥工艺的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(4): 126-128.
- [13] 马寅斐, 朱凤涛, 周元妍, 等. 非油炸膨化紫薯脆片加工工艺研究[J]. 中国果蔬, 2012(1): 56-58.
- [14] 毕金峰, 丁媛媛, 王沛, 等. 胡萝卜变温压差膨化干燥影响因素研究[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 14-17.
- [15] 高鹤, 易建勇, 刘璇, 等. 响应面法优化番木瓜变温压差膨化干燥工艺[J]. 食品科学, 2014, 35(24): 51-56.
- [16] 郭婷, 邓放明, 何益新. 预处理方式对甘薯变温压差膨化干燥产品品质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 202-204, 250.
- [17] 罗红霞, 宋阳, 汪长刚, 等. 变温压差膨化干燥对甘薯片营养成分及微观结构影响的研究[J]. 食品工业, 2013, 34(11): 12-15.
- [18] 揭小玲. 紫薯全粉品质特性及紫薯饼干加工技术研究[D]. 福建: 福建农林大学, 2013: 14-25.
- [19] 蒲传奋, 唐文婷, 张岩, 等. 紫薯全粉间护色及干燥工艺的研究[J]. 食品科技, 2014, 39(3): 125-127.
- [20] 崔璐璐, 林长彬, 徐怀德, 等. 紫马铃薯全粉加工技术研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(5): 221-224.
- [21] Giusti M M, Wrolstad R E. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. Current protocols in food analytical chemistry[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001: F1.2.1.1-1.2.13.
- [22] Saigusa N, Terahara N, Ohba R. Evaluation of DPPH-radicalscavenging activity and antimutagenicity and analysis of anthocyanins in an alcoholic fermented beverage produced from cooked or raw purplefleshed sweet potato(Ipomoea batatas cv. Aya-murasaki) roots[J]. Food Science and Technology Research, 2005, 11(4): 390-394.
- [23] 张森, 李燮昕, 张振宇, 等. 紫薯颗粒全粉加工工艺优化[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 175-178.