

李旭红,肖亚冬,魏秋羽. 响应面法优化芋头片热风联合真空微波干燥工艺[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):230-234.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.058

响应面法优化芋头片热风联合真空微波干燥工艺

李旭红¹, 肖亚冬², 魏秋羽²

(1. 江苏省生产力促进中心, 江苏南京 210042; 2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)

摘要:为探究芋头片热风联合真空微波干燥最佳工艺,在单因素试验的基础上,采用响应面中心组合设计,分析热风温度、转换点含水率和微波脉冲比对产品硬度、亮度值(lightness, 简称 L^* 值)、维生素 C 保留率的影响及其交互作用。结果表明:热风温度对硬度和维生素 C 保留率的影响极显著;转换点含水率对硬度影响极显著,对维生素 C 保留率影响显著;微波脉冲比对硬度和维生素 C 保留率影响极显著,对 L^* 值影响显著。采用响应面寻优法得到芋头片热风联合真空微波干燥最佳工艺:热风温度 61.6 °C,转换点含水率 62.5%,微波脉冲比 3.4,在此条件下,所得芋头脆片硬度为 $(4\ 125 \pm 169)$ g, L^* 值为 82.6 ± 0.5 ,维生素 C 保留率为 $(31.8 \pm 0.7)\%$ 。

关键词:芋头片;热风联合真空微波干燥;响应面法;工艺优化

中图分类号: TS255.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0230-05

芋头[*Colocasia esculenta* (L.) Schott] 别称芋魁、土芝,属天南星科。我国芋种资源丰富,年产量高达 180 万 t,约占世界总产量的 18%。但新鲜芋头的含水量在 60%~85%之间,采收和贮藏期间极易因微生物的孳生、机械损伤、霉变、发芽等而腐烂变质,影响芋头的感官和营养品质,很难实现中长期保存或周年供应^[1],脱水干燥是延长芋头保存期的重要方式之一。果蔬脆片是通过低温真空油炸干燥或非油炸干燥工艺获得的休闲食品,产品保持了果蔬原有形态,且具有较好的色泽、风味和质地,已成为我国食品市场的新热点^[2]。低温真空油炸干燥的产品酥脆美味,但油脂含量高、易氧化酸败,长期食用会带来健康问题,研制、开发非油炸果蔬脆片是将来发展的趋势。热风联合真空微波干燥是将热风干燥与真空微波干燥相结合的一种绿色高效干燥技术,可实现物料在低温低氧条件下的脱水干燥。目前,该技术已在苹果^[3]、卷心菜^[4]、蘑菇^[5]、大蒜^[6]、甜菜^[7]等物料的干燥上得以应用,结果表明,热风联合真空微波干燥可有效提高营养物质保留率、减少物料的氧化、改善产品色泽。Hu 等对菜用大豆、杏鲍菇、蓝莓的热风联合真空微波干燥工艺进行了优化,获得了营养成分含量高、色泽好、膨化率高的干制品^[8-10]。

关于芋头片热风联合真空微波干燥中各参数对脆片品质的影响还未见报道,本研究采用响应面中心组合设计对芋头片联合干燥工艺进行优化,考察不同热风温度、转换点含水率和微波脉冲比对产品硬度、亮度值(L^*)和维生素 C 保留率的影响,并建立数学回归模型,估测芋头脆片干燥的最佳工艺,以期获得硬度适宜、营养成分含量高的芋头脆片,为生产高品质的芋头休闲脆片提供技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

新鲜龙香芋,2017年10月采购于江苏省兴化市垛田镇,挑选新鲜、均匀一致、无机械损伤的芋头块茎。

1.2 试剂与仪器

1.2.1 试剂 柠檬酸、氯化钠、麦芽糊精均为食品级;偏磷酸为国产分析纯;正磷酸和甲醇为色谱级,购自美国天地公司。

1.2.2 主要仪器 主要仪器有 HPLC1200 高效液相色谱仪(美国 Agilent 科技有限公司)、CT3 质构仪(美国 Brookfield 公司)、WSC-S 型色差仪(上海精密科学仪器有限公司)、TG16-WS 台式高速离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司)、XWJD6SW-2 型微波真空杀菌干燥设备(江苏省南京孝马机电设备厂)、DHG-9073B5-III 型电热恒温鼓风干燥箱(上海新苗医疗器械制造有限公司)。

1.3 工艺流程及amp;试验设计

1.3.1 工艺流程 芋头→清洗→去皮→切片→护色、烫漂→流水冷却→麦芽糊精浸渍→冷冻→解冻→热风干燥→均湿→真空微波干燥。

1.3.2 单因素试验 选取解冻后的芋头片适量,设定热风温度为 60 °C、转换点含水率为 70%、微波脉冲比为 3。固定其他 2 个条件,分别考察热风温度、转换点含水率、微波脉冲比对芋头脆片硬度、 L^* 值和维生素 C 保留率的影响,试验设计见表 1。

1.3.3 热风联合真空微波干燥工艺响应面优化试验 在单因素试验结果的基础上,通过响应曲面试验设计,以热风温度、转换点含水率、微波脉冲比为变量,以硬度、 L^* 值、维生素 C 保留率为响应值,建立响应面模型,优化芋头片热风联合真空微波干燥工艺。响应面优化试验中的 3 个因素以单因素试验中选取的最佳水平定为中心组合设计的中心水平,试验设计编码见表 2。

1.4 指标测定

1.4.1 水分含量测定 按 GB 5009.3—2016《食品安全国家

收稿日期:2018-07-25

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0400901)。

作者简介:李旭红(1976—),女,黑龙江牡丹江人,硕士,副研究员,主要从事农业产业领域项目研究。E-mail:88294233@qq.com。

通信作者:魏秋羽,硕士,主要从事农产品加工及贮藏研究。E-mail:weiqiuyu2013@126.com。

表1 单因素试验设计

水平	热风温度(°C)	转换点含水率(%)	微波脉冲比
1	40	52	1
2	50	60	2
3	60	68	3
4	70	76	4
5	80	84	5

注:微波脉冲比为1表示连续微波干燥;脉冲比为2表示干燥60 s,间歇60 s;脉冲比为3表示干燥60 s,间歇120 s;脉冲比为4表示干燥60 s,间歇180 s;脉冲比为5表示干燥60 s,间歇240 s;微波功率为8 W/g,真空度为-90 kPa。

表2 中心组合设计因素水平

水平	因素		
	A:热风温度(°C)	B:转换点含水率(%)	C:脉冲比
-1.682	43.18	54.55	1.32
-1	50.00	60.00	2.00
0	60.00	68.00	3.00
1	70.00	76.00	4.00
1.682	86.82	81.84	4.68

注:微波脉冲比为1.32表示干燥60 s,间歇20 s;微波脉冲比为4.68表示干燥60 s,间歇220 s。

标准《食品中水分的测定》测定芋头水分含量。

1.4.2 维生素C含量测定 维生素C含量的测定:参照文献[11-12],稍作修改,取2.5 g芋头于研钵中,加入少量4℃预冷的0.2%偏磷酸浸提,冰浴快速研磨,之后用0.2%偏磷酸定容至25 mL。在4℃条件下于10 000 r/min离心10 min,取出上清液。用一次性注射器抽取上清液,通过微孔滤膜(0.45 μm)过滤注入样品瓶。

维生素C保留率 = $\frac{\text{干样维生素C质量分数}}{\text{鲜样维生素C质量分数}} \times 100\%$ 。

1.4.3 硬度测定 采用CT3质构仪测定,选用TA7刀具探头、TA-TPB夹具;目标类型为距离;目标值为10.0 mm;触发点负荷为10 g;测试速度为0.5 mm/s;在此条件下测定芋头脆片的硬度。硬度是在压缩过程中坐标图中出现的最大压力峰值,单位是g。

1.4.4 色泽测定 采用色差计测定芋头的色泽,以仪器白板色泽为标准,将样品打碎成粉末后放入固体样品杯,加压将样品压实后即可用色差计进行测量。其中 L^* 值在0~100之间,0表示黑色,100表示白色。

1.5 统计分析

每次试验重复3次,计算平均值和标准偏差,利用Origin 8.5作图。单因素试验指标的差异采用SAS统计软件中ANOVA方差分析,采用Design Expert 8.0统计分析软件进行响应面分析。

2 结果与分析

2.1 单因素对芋头脆片品质的影响

2.1.1 热风温度对芋头脆片品质的影响 由图1可知,随着热风温度的升高,芋头脆片的硬度逐渐降低,这是由于热风预干燥时温度越高,干燥至转换点含水率的时间越短,且在高温

状态下,芋头表面水分迅速失去,达到转换点含水率时,内部结构相对疏松,在真空微波干燥过程中内部易膨化,产品硬度小。由图2可知,热风温度为40~70℃时维生素C损失较少,当热风温度为80℃时维生素C保留率显著降低。而温度的高低对色泽的影响差异不显著。综上分析,选择热风温度的优化水平为50~70℃。

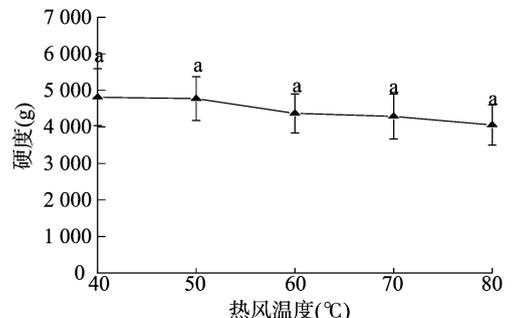


图1 热风温度对芋头脆片硬度的影响

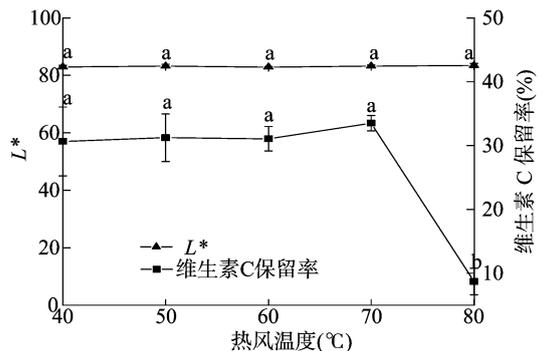


图2 热风温度对芋头脆片色泽和维生素C保留率的影响

2.1.2 转换点含水率对芋头脆片品质的影响 由图3可知,硬度随转换点含水率的升高先降低后升高,当热风干燥后芋头片水分含量较低时,芋头片收缩严重,内部致密不利于微波过程中芋头的膨化,产品硬度较大;当转换点含水率较高时,微波加热初期能量主要是用于内部水分的迁移和汽化,物料表面的温度几乎不会超过沸点,难以取得良好的膨化效果,不利于产品形成多孔性结构^[13],产品硬度较大。从图4可以看出,不同转换点含水率对维生素C保留率的影响较为显著,当转换点含水率为68%时,维生素C含量显著高于其他4个处理。 L^* 值则是随着转换点含水率的增加而逐渐降低。综上分析,确定转换点含水率60%~76%为优化水平。

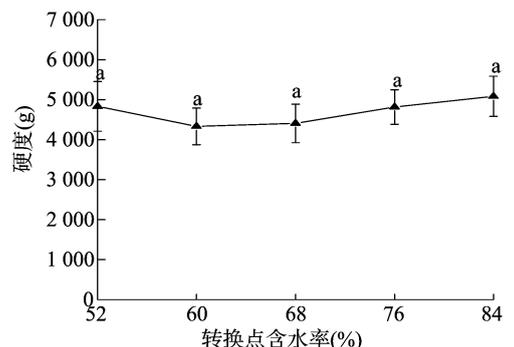


图3 转换点含水率对芋头脆片硬度的影响

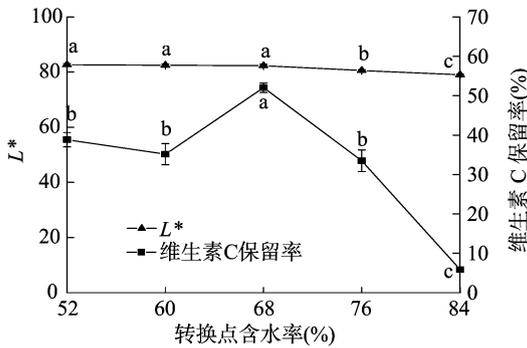


图4 转换点含水率对芋头脆片色泽和维生素C保留率的影响

2.1.3 微波脉冲比对芋头脆片品质的影响 由图5可知,随着微波脉冲比的增加,芋头脆片的硬度逐渐升高,当微波脉冲比为1时,芋头脆片硬度最小,这是由于微波连续加热时物料内部水分迁移较快导致焦糊而使其硬度降低。当微波脉冲比较大时,硬度略有升高但与较低脉冲比相比差异不显著。从图6可以看出,微波脉冲比为1时脆片的L*值显著低于其他处理,当微波脉冲比为1和2时,维生素C保留率显著低于其他处理,脉冲较大时,间歇时间长避免了温度的持续升高,维生素C保留率较高。综上可知,选择微波脉冲比2、3、4作为优化水平。

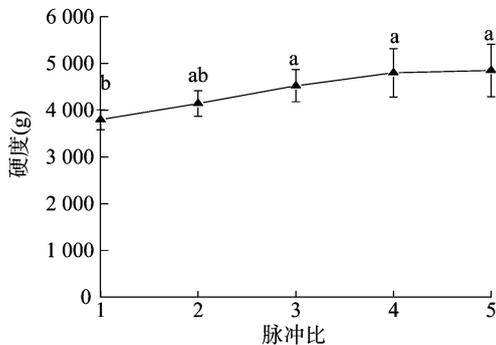


图5 微波脉冲比对芋头脆片硬度的影响

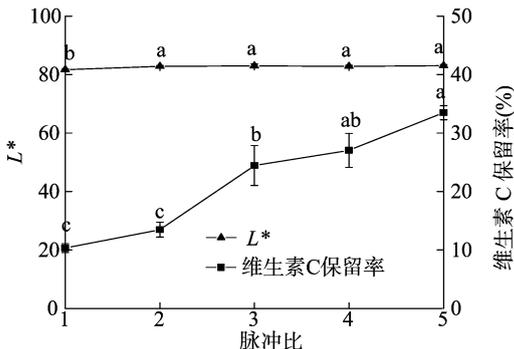


图6 微波脉冲比对芋头脆片色泽和维生素C保留率的影响

2.2 响应面中心组合试验

以“1.3.3”节所述方法进行试验操作,结果见表3。

2.3 回归方程及其参数分析

为检验方程的有效性,对上述回归模型进行方差分析,由表4可知,3个回归模型失拟检验均不显著($P > 0.05$),拟合回归结果均极显著($P < 0.01$),说明试验所得二次回归方程能很好地对响应值进行预测。将试验数据用 Design Expert 8.0 软件进行多元回归拟合,根据表4中的结果,对原数学模

型进行简化,去除不显著项($P > 0.05$)后的简化方程如下:

$$Y_1 = 4\ 304.54 - 91.08x_1 + 88.5x_2 + 84.39x_3 + 93.13x_1x_2 - 78.14x_2^2 - 45.97x_3^2;$$

$$Y_2 = 83.55 + 0.37x_3 - 0.65x_2x_3 - 0.42x_1^2 - 0.79x_2^2 - 0.69x_3^2;$$

$$Y_3 = 32.61 - 5.21x_1 - 1.14x_2 + 3.97x_3 + 4.01x_1x_2 - 1.68x_1x_3 - 2.69x_2^2 - 3.96x_3^2 - 1.44x_3^2。$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 和 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别代表热风温度、转换点含水率、微波脉冲比和硬度、 L^* 值、维生素C保留率,方程的各项系数大小反映各因素对响应值的影响程度。

表3 中心组合设计试验结果

编号	因素编码值			Y_1 :硬度 (g)	Y_2 : L^*	Y_3 :维生素C保留率 (%)
	x_1	x_2	x_3			
1	-1	-1	-1	4 092	80.53	30.07
2	1	-1	-1	3 782	80.73	15.47
3	-1	1	-1	4 113	82.50	16.41
4	1	1	-1	4 231	82.55	20.61
5	-1	-1	1	4 425	82.20	37.98
6	1	-1	1	3 771	82.91	19.42
7	-1	1	1	4 327	81.08	27.54
8	1	1	1	4 260	82.61	24.28
9	-1.682	0	0	4 710	81.97	37.37
10	1.682	0	0	4 336	82.06	11.45
11	0	-1.682	0	4 118	81.12	22.83
12	0	1.682	0	4 302	80.82	20.80
13	0	0	-1.682	4 115	80.49	21.37
14	0	0	1.682	4 387	82.02	36.55
15	0	0	0	4 293	83.90	31.51
16	0	0	0	4 324	84.04	33.11
17	0	0	0	4 308	83.44	31.97
18	0	0	0	4 217	83.53	34.29
19	0	0	0	4 403	83.04	33.10
20	0	0	0	4 256	83.44	31.51

表4 回归模型的方差结果

方差来源	P 值		
	Y_1	Y_2	Y_3
x_1	0.003 7**	0.203 9	<0.000 1**
x_2	0.004 4**	0.359 7	0.045 8*
x_3	0.005 9**	0.026 2*	<0.000 1**
x_1x_2	0.014 7*	0.662 0	0.000 1**
x_1x_3	0.330 1	0.210 5	0.027 6*
x_2x_3	0.197 8	0.005 7**	0.365 3
x_1^2	0.197 6	0.012 6*	0.000 2**
x_2^2	0.007 8**	0.000 2**	<0.000 1**
x_3^2	0.079 6**	0.000 6**	0.014 3*
失拟项	0.128 3	0.109 1	0.062 3
回归模型	0.001 9**	0.001 0**	<0.000 1**

注:**表示影响极显著($P < 0.01$);*表示影响显著($P < 0.05$)。

2.4 交互作用分析

图7给出了3个试验因素中1个为0水平时,另外2个因素对芋头脆片硬度的响应曲面。结合表4回归系数P值检验可知,热风温度、转换点含水率、微波脉冲比对硬度影响极显著,微波脉冲比和转换点含水率的交互作用对芋头脆片硬

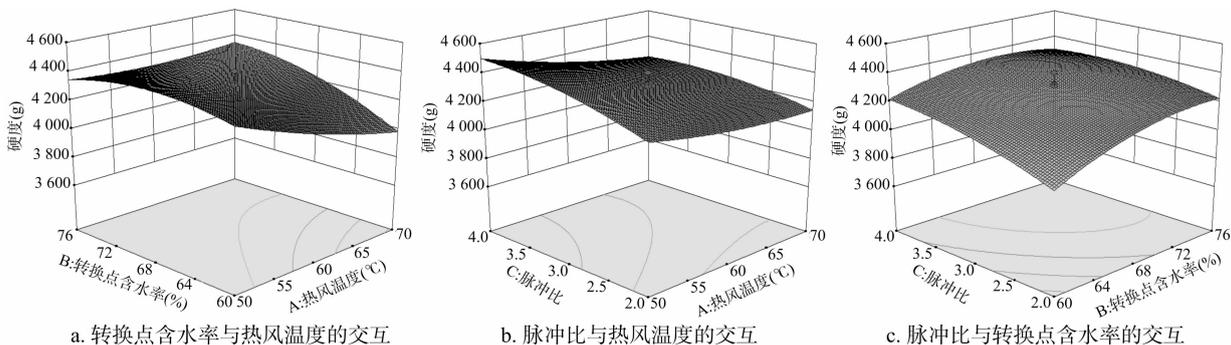


图7 各因素的交互作用对硬度的影响

度值的影响显著,产品硬度值随着微波脉冲比和转换点含水率的升高而逐渐递增,随着热风温度的升高呈递减趋势。

由表4和图8可知,热风温度、转换点含水率对芋头脆片 L^* 值影响不显著,微波脉冲比对 L^* 值影响显著,转换点含水

率和微波脉冲比的交互作用对芋头脆片 L^* 值的影响极显著。产品的 L^* 值随着热风温度、转换点含水率和微波脉冲比的增大先升高后降低。在热风温度为63℃、转换点含水率为68%、脉冲比为3.4时 L^* 值最大,为83.6。

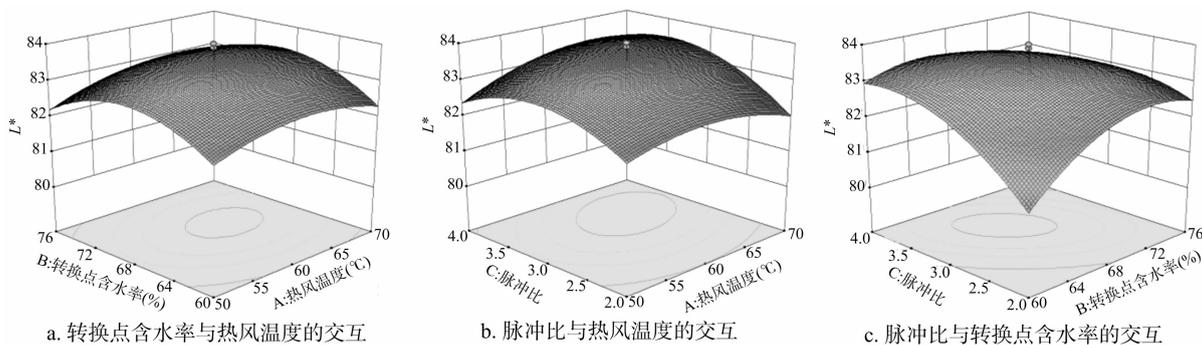


图8 各因素的交互作用对色泽的影响

表4的回归系数 P 值检验结果显示,热风温度和微波脉冲比对芋头脆片维生素C保留率的影响极显著,转换点含水率对维生素C保留率的影响显著,热风温度和转换点含水率

的交互作用对维生素C保留率的影响极显著。由图9可以看出,产品的维生素C保留率随着转换点含水率和热风温度的增大而逐渐降低,随着微波脉冲比的增大而升高。

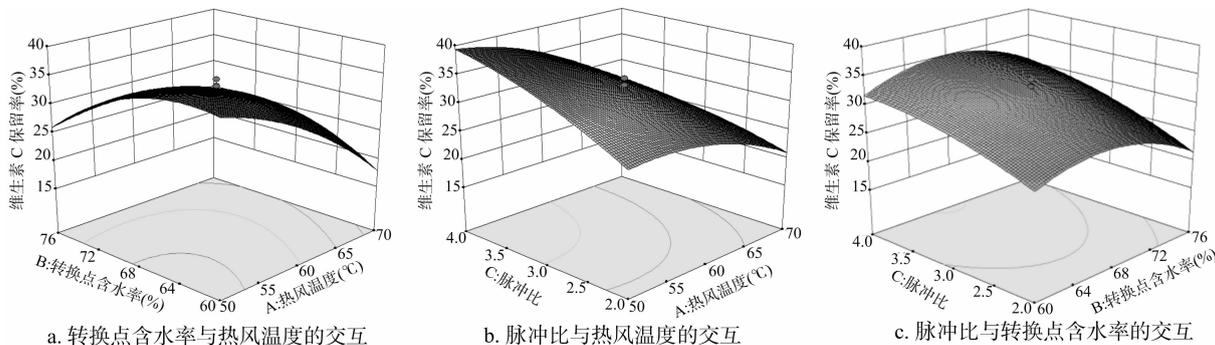


图9 各因素的交互作用对维生素C保留率的影响

2.5 芋头片热风联合真空微波干燥工艺优化

为了进一步优化芋头片热风联合真空微波干燥工艺,本试验对硬度、 L^* 值和维生素C保留率3个指标进行重要度分配。根据感官评定结果可知,产品的硬度在4000g左右时口感较好,故本试验设定硬度值越接近4000g越好。对 L^* 值和维生素C保留率而言,其值越高,产品品质越好。从膨化食品商品性的角度来说,首先应考虑它的质构,即特殊的酥脆感,它能决定产品的口感;其次是色泽,这能直接影响消费者的购买欲,最后才考虑其他性质^[14]。综合考虑芋头脆片的商品性,设定硬度、 L^* 值、维生素C保留率的重要度分别为4、4、3,利用Design-Expert在试验参数范围内进行优化,得到一

系列符合要求的参数组合,在此参数组合范围内取综合评分值最大的组合。综合优化结果显示,芋头片热风联合真空微波干燥最佳参数组合如下:热风温度61.6℃,转换点含水率62.5%,微波脉冲比3.4,在此条件下根据模型方程预测芋头脆片硬度为4217g, L^* 值为83.3,维生素C保留率为31.2%。采用优化后的参数进行验证试验,如表5所示,所得芋头脆片硬度为(4125±169)g, L^* 值为82.6±0.5,维生素C保留率为(31.8±0.7)%。硬度、 L^* 值和维生素C保留率试验值与预测值的相对误差分别为2.18%、0.84%和1.92%,均小于5%,表明回归模型对芋头片热风联合真空微波干燥品质的分析和预测是可行的。

表5 优化方案的验证结果

结果	响应指标		
	硬度(g)	L^*	维生素C保留率(%)
实际值	4 125 ± 169	82.6 ± 0.5	31.8 ± 0.7
预测值	4 217	83.3	31.2
相对误差	2.18%	0.84%	1.92%

3 讨论与结论

果蔬高温热风干燥时热敏性成分降解速率快,低温下营养物质保留率高,但干燥时间较长,同时也会使物料表面形成1层较厚的硬壳,边角发生卷曲,产品微观结构和多孔性差,硬度较大^[15],因此预干燥时热风温度的高低会影响最终产品的热敏性成分含量及脆片的质地。

转换点含水率对芋头脆片硬度的影响极显著,对于膨化食品而言,含水率具有1个临界值,在临界值范围内,含水率的增加一方面通过阻止物料破裂而增加其强度,另一方面通过塑化作用减弱强度,二者对产品的硬化起协同作用。若水分高于这个临界值,物料表面的自由态吸附水较多,在干燥时很难在较短时间内完全汽化,阻碍物料内部形成足够的蒸汽压,产品膨化率低,硬度大^[16];而当含水率低于临界值时,内部的水蒸气不足,不能产生足够的膨化动力,产品结构致密,硬度较大^[17-18]。

随着微波脉冲比的增大,芋头脆片硬度逐渐递增,而维生素C保留率则逐渐降低。微波作用时,芋头片整体处于加热状态,内部水分开始蒸发,在微波间歇期间,还可使物料内部的水分有足够的时间迁移到表面,减小物料横断面上的含水率梯度,防止表层和内部的不均匀收缩,避免了局部温度过高、出现焦糊的现象,因此热敏性物质的降解程度明显低于连续微波干燥^[19]。但间歇时间越长,微波加热时物料温度上升得越慢,水分汽化不能产生足够的蒸汽压,产品内部难以形成多孔状结构,从而导致硬度较大。

通过对中心组合设计试验回归系数的检验可知,热风温度对硬度和维生素C保留率的影响极显著;转换点含水率对硬度的影响极显著,对维生素C保留率的影响显著;微波脉冲比对硬度和维生素C保留率的影响极显著,对 L^* 值的影响显著。由回归模型的方差分析可知3个模型均显著,回归模型失拟检验均不显著。对热风温度、转换点含水率和微波脉冲比3个参数进行响应面优化,确定芋头片热风联合真空微波干燥的最佳参数为热风温度61.6℃,转换点含水率62.5%,微波脉冲比3.4,在此条件下进行验证试验,测得芋头脆片的实际指标值与预测值的相对误差均小于5%,所得回归模型具有良好的预测性,优化结果可靠。

参考文献:

[1]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.

- [2]康三江,张永茂,王来,等.浅议我国果蔬脆片生产现状与发展趋势[J].农业工程技术(农产品加工业),2009(9):24-27.
- [3]Ferenzi S,Czukur B,Cserhalmi Z. Evaluation of microwave vacuum drying combined with hot-air drying and compared with freeze- and hot-air drying by the quality of the dried apple product[J]. Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 2014, 58(2): 111-116.
- [4]Xu Y, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Studies on hot air and microwave vacuum drying of wild cabbage[J]. Drying Technology, 2004, 22(9): 2201-2209.
- [5]Argyropoulos D, Heindl A, Muller J. Assessment of convection, hot-air combined with microwave-vacuum and freeze-drying methods for mushrooms with regard to product quality[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(2): 333-342.
- [6]Cui Z W, Xu S Y, Sun D W. Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying[J]. Drying Technology, 2003, 21(7): 1173-1184.
- [7]Figiel A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(4): 461-470.
- [8]Hu Q G, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 977-982.
- [9]陈健凯,林河通,李辉,等.杏鲍菇热风-微波真空联合干燥工艺参数优化[J].中国食品学报,2014,14(9):131-140.
- [10]邵春霖,毕金峰,陈芹芹,等.蓝莓热风-微波真空联合干燥工艺研究[J].中国食品学报,2014,14(10):92-100.
- [11]刘胜辉,臧小平.高效液相色谱法测定水果中的抗坏血酸[J].生命科学仪器,2005,3(4):38-40.
- [12]刘霞,江宁,刘春泉,等.不同干燥方式对黑毛豆仁品质的影响[J].食品科学,2011,32(18):59-62.
- [13]刘自强.食品膨化机理的理论探析[J].食品工业科技,1997,18(6):52-53.
- [14]毕金峰,方蕾,丁媛媛,等.菠萝变温压差膨化干燥工艺优化[J].农业工程学报,2009,25(10):334-339.
- [15]Giri S K, Prasad S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 512-521.
- [16]Said L B H, Bellagha S, Allaf K. Optimization of instant controlled pressure drop (DIC)-assisted dehydrofreezing using mechanical texture measurements versus initial water content of apple[J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8(5): 1102-1112.
- [17]毕金峰,于静静,丁媛媛,等.响应面法优化冬枣变温压差膨化干燥工艺研究[J].农产品加工,2013,11(17):119-128.
- [18]江宁,刘春泉,李大婧,等.甘薯片真空微波干燥工艺的优化[J].中国食品学报,2011,11(7):81-88.
- [19]张黎骅,刘波,刘涛涛,等.银杏果微波间歇干燥工艺的优化[J].食品科学,2014,35(2):108-114.