

基于遗传算法的苦瓜片真空冷冻干燥工艺优化

高若婉¹ 李丽¹ 梅树立¹ 薛珊² 卢丹² 赵武奇²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 西安 710119)

摘要: 为提高苦瓜片干制品品质,应用真空冷冻干燥技术对新鲜苦瓜片进行干燥,以得到最佳工艺参数。采用响应面分析法设计四因素三水平试验,对苦瓜片试验指标(含水率和复水比)和干燥工艺参数(切片厚度、温度、绝对压强和干燥时间)建立二次多项式回归模型,并对模型的有效性及各因素间的交互作用进行分析,利用 Matlab 中的遗传算法对结果进行综合优化。结果表明:建立的回归方程拟合度较好,模型显著,所得工艺参数合理可用。苦瓜片真空冷冻干燥的最佳工艺参数为:切片厚度为 4 mm,隔板温度为 46℃,绝对压强为 73 Pa,干燥时间为 8.7 h。该条件下含水率为 6.23%,复水比为 11.75。

关键词: 苦瓜片;真空冷冻干燥;遗传算法;响应面分析;工艺优化

中图分类号: TS255.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0401-06

Optimization of Vacuum Freeze-drying Process of Bitter Melon Slices Using Genetic Algorithm

GAO Ruowan¹ LI Li¹ MEI Shuli¹ XUE Shan² LU Dan² ZHAO Wuqi²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Bitter melons are rich in active substances, such as saponins, polysaccharides, peptides and flavonoids, which have a high edible and medicinal value. Drying the bitter melons can extend the shelf life. There are some commonly drying techniques, such as sun drying, hot air drying, microwave drying and spray drying. But the active substances are easily to be damaged during the drying process due to high temperatures. Vacuum freeze-drying technology completely freezes the material and then heats it in a vacuum to sublimate the water in the material. So it can be as much as possible to retain the material's color, shape, nutritional composition and the products have a good quality. In order to improve the quality of dried bitter melon, the vacuum freeze-drying technology was used to dry the bitter melon slices to get the best process parameters in this paper. Because the eutectic temperature referred to the temperature which could make the material completely frozen during the freezing process, the eutectic temperature of fresh bitter melon was first measured. The eutectic point temperature of bitter melon was -19°C . It was determined that the pre-freezing temperature of bitter melon was -30°C and the pre-freezing time was set to 2 h. On the basis of single factor test, the quadratic polynomial regression model between inspection indexes (moisture content, rehydration ratio) and drying parameters (slice thickness, temperature, working pressure, drying time) of the bitter melon slices were established by response surface methodology (RSM). Under the condition that the moisture content is less than the safe water content (10%), the optimum process parameters are obtained by optimizing the rehydration ratio using the genetic algorithm in Matlab. The results showed that the regression equation had a good fitting degree ($R^2 = 0.9371$, $R^2 = 0.8548$), the model was significant and the obtained process parameters were reasonable. The thickness, pressure and drying time had significant effect on the moisture content during the drying process. They also had significant effect on the rehydration ratio. The interaction between the partition temperature and the pressure had significant effect on the two indexes. The results were

收稿日期: 2017-07-10 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 北京市自然科学基金项目(4172034)、陕西省农业科技创新与攻关项目(2016NY-188)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAH28F0103)

作者简介: 高若婉(1994—),女,硕士生,主要从事计算机图像处理研究,E-mail: 1213037845@qq.com

通信作者: 赵武奇(1965—),男,副教授,主要从事食品加工技术研究,E-mail: zwq65@163.com

optimized by genetic algorithm. After being verified, the optimum technological parameters were slice thickness of 4 mm, heating plate temperature of 46°C, absolute pressure of 73 Pa and drying time of 8.7 h. In this condition the moisture content was 6.23% and the rehydration ratio was 11.75. The study provides reference for vacuum freeze drying bitter melon slices and other materials.

Key words: bitter melon slices; vacuum freeze drying; genetic algorithm; response surface methodology; process optimization

引言

苦瓜 (*Momordica charantia* L.) 为葫芦科苦瓜属植物, 含有苦瓜多糖、蛋白、皂苷、多肽和黄酮等成分, 具有增加免疫力、抗肿瘤、抑菌、降血糖等多种功效, 近年来已成为研究热点^[1-8]。但新鲜苦瓜货架期较短, 不耐贮藏。将苦瓜制成干制品可平衡淡旺季需求, 同时也利于进一步深加工^[9]。苦瓜干制方法中最传统的是日晒法, 但是产品的品质较差。朱香燕等^[10]分别用热风与远红外干燥方式对苦瓜进行了干燥, 指出热风干燥比远红外干燥的苦瓜品质好。唐小俊等^[11]将热风与微波干燥相结合, 利用响应面方法得出了最佳工艺参数。张敏等^[12]通过喷雾干燥的方式将苦瓜汁与牛奶的混合液进行了干燥。徐斌等^[13]研究了苦瓜汁的真空冷冻干燥过程, 并对新鲜苦瓜与冻干粉中的营养成分(总皂苷、矿物质元素、维生素 C、游离氨基酸)进行了比较, 指出真空冷冻干燥能使苦瓜粉的营养物质得到较好的保留。在上述方法中, 除真空冷冻干燥外, 其余干燥方式温度均较高, 苦瓜中活性成分损失较大。真空冷冻干燥技术是先将物料冷冻至共晶点温度以下, 使物料完全冻结, 然后在真空状态下加热, 使物料中水分升华而达到干燥目的。真空冷冻干燥能最大程度地保持原料的颜色、形状和营养物质, 且干燥产品质量轻, 复水快, 便于贮藏及运输^[14-15]。目前在果蔬、海鲜、茶叶、医药等方面均有研究应用^[15-19]。但将真空冷冻干燥方法应用于苦瓜片的相关研究较少, 且工艺参数尚待明确。本文以苦瓜为原料, 研究苦瓜切片厚度、隔板温度、绝对压强和干燥时间 4 个因素对真空冷冻干燥苦瓜片的含水率和复水比的影响, 并对其建立响应面方程, 结合遗传算法对其结果进行综合优化^[20], 从而确定苦瓜片真空冷冻干燥工艺的最佳参数, 旨在为苦瓜片的干燥提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用苦瓜品种为赛碧绿 F1, 购买于寿光市农圣庄园有机农业发展有限公司。选用直径为 4 ~ 5 cm, 新鲜且成熟度适中的苦瓜, 苦瓜购买后储藏在 4 ~ 7°C 冰箱中。

1.2 试验仪器

仪器设备: LGJ-10F 型真空冷冻干燥机, 北京松源华兴科技发展有限公司; BS224S 型电子天平, 北京赛多利斯仪器系统有限公司; HH-1 型恒温水浴锅, 杭州汇尔仪器设备有限公司; FULK F12E+ 型数字万用表, 福禄克电子仪器仪表公司; 海尔冰箱, 青岛海尔股份有限公司; Innova 系列超低温冰箱, 美国艾本德有限公司; DHG-9070A 型立式鼓风干燥箱, 上海捷呈实验仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 真空冷冻干燥苦瓜片工艺流程

工艺流程为: 原料→预处理→预冻→升华→解析→包装。

其中预处理过程为: 挑选新鲜、无虫害、果型均一且成熟度适中的苦瓜, 用清水冲洗表面并擦干。切去苦瓜两端部分并纵向剖开, 去除瓜籽瓜瓤。按试验设计方案进行切片, 在不同试验参数组合下进行真空冷冻干燥试验。

1.3.2 共晶点温度测定

共晶点是指物料冷冻过程中, 能将物料中的水分完全冻结时的温度。若设定的冻结温度过高, 则不能保证物料完全冻结, 干燥时物料中未冻结的水会以液体状态气化, 而不能直接以冰的形式升华, 物料会出现皱缩现象, 影响干燥品质。而冻结温度过低, 冻干时间延长且浪费能源。故苦瓜预冻前需测定其共晶点温度。测定苦瓜共晶点温度采用简易的电阻法^[21], 其测定原理为: 苦瓜中带电离子的定向移动使其具有导电性, 当苦瓜进行缓慢冻结时, 其定向移动的带电离子数目减少, 苦瓜电阻不断增大。当苦瓜中的水分子完全冻结时, 其电阻突然增大, 此时的温度为苦瓜的共晶点温度。测定原理示意图见文献^[22]。将苦瓜片缓慢冻结, 绘制苦瓜电阻随温度降低的变化曲线, 选取电阻变化率为 5 MΩ/°C 时对应的温度为共晶点温度^[21]。

1.3.3 试验指标的测定

(1) 含水率

选用直接干燥法^[23]进行苦瓜片中含水率的测定。

(2) 复水比

在 250 mL 烧杯中加入 150 mL 蒸馏水, 置于

60℃恒温水浴锅。待水温达到设定温度后,取 1 g 干燥苦瓜片放入烧杯中,每 15 min 取出样品,在筛网中沥水 5 min 后进行称量。随后按照上述方法继续反复进行 4 次试验。每组试验重复进行 3 次^[24]。复水比计算公式为

$$R_f = G_f / G_g \quad (1)$$

式中 R_f ——复水比 G_g ——干制品质量, g
 G_f ——样品复水后沥干的质量, g

1.3.4 响应面试验设计

在前期预试验基础上,选定对真空冷冻干燥苦瓜片品质影响较大的试验因素为苦瓜片厚度、隔板温度、绝对压强和干燥时间;考察它们对干燥后苦瓜片的含水率(y_1)和复水比(y_2)的影响效果。通过应用 Design-Expert 软件,用 Box - Behnken 进行四因素三水平的试验设计。对各响应值与影响因素建立回归方程,因素与水平设计如表 1 所示。

表 1 响应面因素水平编码

Tab. 1 Response surface factor level code

编码	因素			
	切片厚度/ mm	隔板温度/ ℃	绝对压强/ Pa	干燥时间/ h
	-1	4	35	30
0	6	45	60	10
1	8	55	90	12

1.3.5 最佳工艺参数确定

利用 1.3.4 节建立的含水率和复水比方程,在含水率小于安全含水率(10%)下,应用 Matlab 7.0 中的遗传算法对复水比进行优化得出最佳工艺参数。遗传算法的适应度函数为

$$\min f = \left(1 - \frac{y_2}{y_{best}} \right)^2 \quad (2)$$

式中 y_2 ——回归方程计算出的复水比
 y_{best} ——该指标的最优值

2 结果与分析

2.1 共晶点测定结果

将试验所用的新鲜苦瓜缓慢进行冻结,降温时苦瓜电阻随温度的变化如图 1 所示。试验测得电阻突变点的温度为 -19℃,即新鲜苦瓜的共晶点温度为 -19℃。预冻温度一般低于共晶点温度 10 ~ 15℃,故确定苦瓜的预冻温度为 -30℃,预冻时间设定为 2 h。

2.2 响应面试验结果

响应面试验的设计及结果如表 2 所示,表中 A、B、C、D 表示切片厚度、隔板温度、绝对压强、干燥时间的编码值。

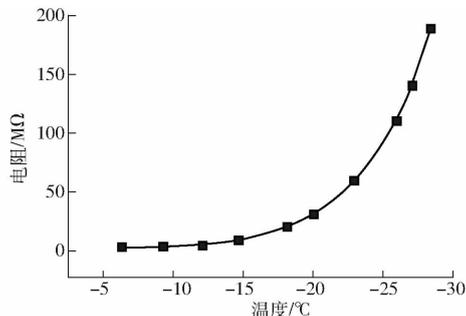


图 1 苦瓜电阻随温度降低的变化曲线

Fig. 1 Change of resistance of bitter melon with temperature decrease

表 2 响应面试验结果

Tab. 2 Result of RSM

试验序号	A	B	C	D	y_1 /%	y_2
1	-1	-1	0	0	7.26	10.04
2	1	-1	0	0	7.81	8.90
3	-1	1	0	0	4.70	9.94
4	1	1	0	0	4.75	9.08
5	0	0	-1	-1	7.75	9.35
6	0	0	1	-1	7.10	11.08
7	0	0	-1	1	5.74	8.53
8	0	0	1	1	4.33	8.91
9	-1	0	0	-1	7.57	12.35
10	1	0	0	-1	7.85	11.40
11	-1	0	0	1	4.36	10.83
12	1	0	0	1	4.75	9.56
13	0	-1	-1	0	8.23	10.16
14	0	1	-1	0	7.16	8.99
15	0	-1	1	0	7.77	9.32
16	0	1	1	0	2.36	10.75
17	-1	0	-1	0	6.11	10.02
18	1	0	-1	0	5.25	9.39
19	-1	0	1	0	4.89	11.28
20	1	0	1	0	4.96	10.89
21	0	-1	0	-1	9.02	10.33
22	0	1	0	-1	7.40	10.35
23	0	-1	0	1	6.62	8.43
24	0	1	0	1	3.78	9.01
25	0	0	0	0	6.04	11.36
26	0	0	0	0	6.38	11.25
27	0	0	0	0	5.99	12.01
28	0	0	0	0	5.89	11.46
29	0	0	0	0	6.79	10.95

2.3 模型构建与显著性分析

对表 2 数据结果用 Design-Expert 7.0 软件进行处理,得到苦瓜片指标与各因素间的回归拟合方程

$$y_1 = 6.22 + 0.040A - 1.38B - 0.74C - 1.43D - 0.13AB + 0.23AC + 0.028AD - 1.08BC - 0.31BD - 0.19CD - 0.47A^2 + 0.35B^2 - 0.30C^2 + 0.28D^2 \quad (3)$$

$$y_2 = 11.41 - 0.44A + 0.078B + 0.48C - 0.80D + 0.070AB + 0.060AC - 0.080AD + 0.65BC + 0.14BD - 0.34CD - 0.20A^2 - 1.24B^2 - 0.82C^2 - 0.64D^2 \quad (4)$$

对各指标结果进行方差分析,分析结果如表3所示。由表3可以看出,各指标的回归模型均具有极显著性($P_1 < 0.0001$ 且 $P_2 = 0.0010$),失拟项均不显著,表明试验结果受其他因素影响较小,方程拟合性好。影响含水率的主次因素为 $B = D > C > A$,影响复水比的主次因素为 $D > C > A > B$ 。对苦瓜片含水率 y_1 的影响因素中,因素 B 、 C 、 D 、 BC 影响极显著($P < 0.01$),因素 A^2 影响显著,其余因素不显著。对复水比 y_2 的影响因素中, D 、 B^2 、 C^2 影响极显著($P < 0.01$),因素 A 、 C 、 BC 、 D^2 影响显著,其余因素不显著。

决定系数(R^2)和校正决定系数(R_{Adj}^2)可用于解释方程与实际测量值的拟合程度。含水率 y_1 的决定系数为0.9371,说明含水率的实际测量值与预测值拟合度较好。校正决定系数为0.8743,说明选定的4个因素 A 、 B 、 C 、 D 可决定约87%的含水率变化值。在复水比 y_2 指标中,决定系数为0.8548,校正决定系数为0.7095。也具有较好的拟合度,说明所建数学模型实际可用。

2.4 响应面分析

响应面分析见图2、3。各响应面图是由响应值

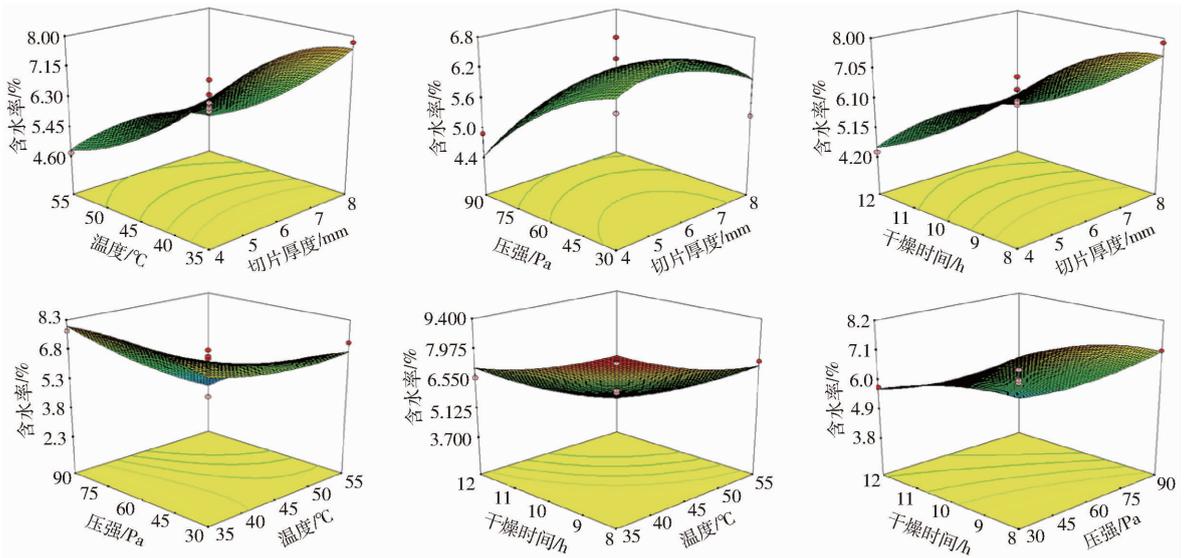


图2 任意两变量对含水率影响的响应曲面图

Fig.2 Response surface plots for the effects of any two variables on moisture

图2表示切片厚度、温度、绝对压强和干燥时间对含水率的交互作用。从图中可以看出:

含水率随着切片厚度的增加而升高。这可能是因为厚度增加,物料的比表面积减少,且传质传热阻力增大,干燥速率减小,故含水率升高。

含水率随着温度的升高而降低。这可能是因为

表3 各项指标方差分析结果
Tab.3 Variance analysis of each index

变异来源	y_1		y_2	
	P_1	显著性	P_2	显著性
模型	< 0.000 1	***	0.001 0	***
A	0.189 2	*	0.022 0	**
B	< 0.000 1	***	0.651 2	*
C	0.000 6	***	0.013 0	**
D	< 0.000 1	***	0.000 3	***
AB	0.658 9	*	0.815 1	*
AC	0.282 2	*	0.841 1	*
AD	0.922 4	*	0.789 3	*
BC	0.001 6	***	0.044 0	**
BD	0.289 7	*	0.640 9	*
CD	0.504 2	*	0.269 7	*
A^2	0.034 2	**	0.401 0	*
B^2	0.110 7	*	< 0.000 1	***
C^2	0.144 0	*	0.003 0	***
D^2	0.194 2	*	0.014 5	**
失拟项	0.170 1		0.161 8	
R^2	0.937 1		0.854 8	
R_{Adj}^2	0.874 3		0.709 5	

注: * 不显著($P > 0.05$), ** 显著($P < 0.05$), *** 极显著($P < 0.01$)。

与试验因素构成的曲面图,显示了当切片厚度、隔板温度、绝对压强与干燥时间中任意2个因素固定为零水平时,另外2个因素对响应值的影响。

温度越高,物料中水分子热运动加剧,使干燥速率加快,物料含水率降低。

含水率随着压强的增大而降低。这可能是因为压强较低时,冻干仓温度也较低,物料吸收热量速率缓慢,苦瓜片的含水率较大。随着压强增大,冰的升华速率加快,苦瓜片含水率降低。

含水率随着干燥时间的增长而降低。这可能是由于干燥时间增长, 苦瓜片吸收的热量增多, 水分子热运动增加, 使含水率降低。

图3表示切片厚度、温度、绝对压强和干燥时间对复水比的交互作用。从图中可以看出:

复水比随切片厚度的增加而减小。这可能是由于厚度增加, 苦瓜片的比表面积减小, 复水时外界水分子进入物料难度增大, 复水比降低。

复水比随温度的升高先增大后减小。这可能是由于真空冷冻干燥物料时会发生复杂的变化过程, 传质与传热同时进行。当温度较低时, 主要热量用于干燥的升华阶段, 物料中的冰是以升华的

形式除去, 内部结构呈疏松多孔结构。温度升高, 升华速率加快, 故复水比增大。但温度过高, 热量将主要用于解析阶段, 物料内部温度过高, 冰融化成液态水, 内部构造被破坏, 导致复水时持水能力降低。

复水比随着压强的增大先增大后减小。这可能是由于压强增大, 升华速率加快, 但压强过大, 冻干仓温度升高过快, 导致冰晶融化, 破坏物料内部结构, 复水比减小。

复水比随着干燥时间的增长而减小。这可能是由于干燥时间增长, 物料的解析时间变长, 物料内部组织受到破坏, 复水比减小。

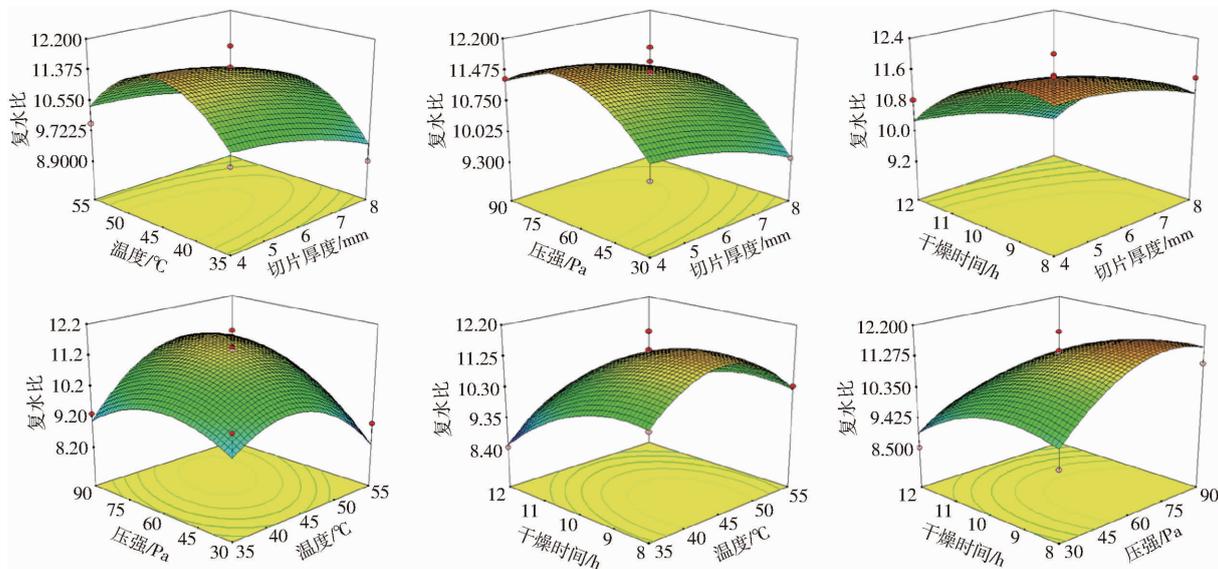


图3 任意两变量对复水比的响应曲面图

Fig. 3 Response surface plots for the effects of any two variables on rehydration ratio

2.5 综合优化与验证

遗传算法优化的适应度函数为

$$z = \left(1 - \frac{12.35}{z_2} \right)^2 \quad (5)$$

式中 z_2 ——复水比指标最优值

将函数进行求解, 得到了函数适应度变化曲线, 如图4所示。由计算结果得到最优工艺参数为: 切片厚度 4.24 mm, 隔板温度 45.827℃, 绝对压强 73.008 Pa, 干燥时间 8.659 h。在该条件下含水率预测值为 6.419 0%, 复水比为 11.979 3。对工艺参数进行验证, 为便于实际操作, 将工艺参数调整为切片厚度 4 mm, 隔板温度 46℃, 绝对压强 73 Pa, 干燥时间 8.7 h。重复进行 5 次试验, 实际测得的含水率为 6.23%, 复水比为 11.75, 说明优化模型可靠度高。

3 结论

(1) 响应面法建立的各项指标与干燥工艺参数的

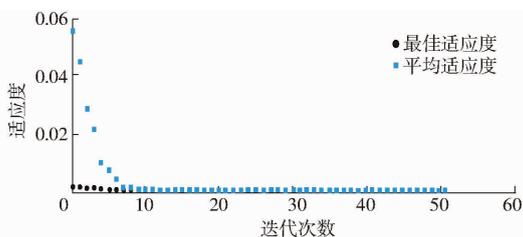


图4 函数适应度变化曲线

Fig. 4 Function fitness change curve

回归拟合方程拟合度较好, 模型显著, 可用于干燥过程中指标的预测。

(2) 干燥过程中隔板温度、绝对压强和干燥时间对含水率影响显著, 切片厚度、绝对压强和干燥时间对复水比影响显著, 隔板温度与绝对压强对两个指标交互作用显著。

(3) 利用遗传算法对目标优化, 得到的最佳工艺参数为: 切片厚度为 4 mm, 隔板温度为 46℃, 绝对压强为 73 Pa, 干燥时间为 8.7 h。该条件下实际测得含水率为 6.23%, 复水比为 11.75。

参 考 文 献

- 1 邓媛元,张名位,刘接卿,等.不同品种苦瓜多糖含量及其抗氧化和 α -葡萄糖苷酶抑制活性比较[J].现代食品科技,2014,30(9):102-108.
DENG Yuanyuan, ZHANG Mingwei, LIU Jieqing, et al. Comparison of the content, antioxidant activity, and α -glucosidase inhibitory effect of polysaccharides from *Momordica charantia* L. species[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(9): 102-108. (in Chinese)
- 2 蔡寅,刘敏,吴勋贵,等.苦瓜多糖抗肿瘤及免疫增强活性的研究[J].药学与临床研究,2010,18(2):131-134.
CAI Yin, LIU Min, WU Xungui, et al. Study on the antitumor and immune-stimulating activity of polysaccharide from *Momordica charantia* [J]. Pharmaceutical and Clinical Research, 2010, 18(2): 131-134. (in Chinese)
- 3 张平平,刘金福,王昌禄,等.苦瓜提取物的抑菌活性研究[J].天然产物研究与开发,2008,20:721-724.
ZHANG Pingping, LIU Jinfu, WANG Changlu, et al. Study on the antimicrobial activities of the extracts from *Momordica charantia* L. [J]. Natural Product Research and Development, 2008, 20: 721-724. (in Chinese)
- 4 文良娟,刘苇芬.苦瓜黄酮的提取条件及其抗氧化活性研究[J].食品科学,2007,28(9):183-186.
WEN Liangjuan, LIU Weifen. Study on extracting and antioxidant activity of flavonoids from *Momordica charantia* L. [J]. Food Science, 2007, 28(9): 183-186. (in Chinese)
- 5 SANDHYA L S, SHEWADE Y, BHONDE R. Role of bittergourd fruit juice in stz-induced diabetic state in vivo and in vitro[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2000, 73: 71-79.
- 6 尤玲玲,陈永慧,刘金福,等.苦瓜皂苷对胰岛素抵抗 HepG2 细胞葡萄糖消耗量的影响[J].食品工业科技,2014,35(5):338-340,345.
YOU Lingling, CHEN Yonghui, LIU Jinfu, et al. Influence of bitter melon saponin on the glucose consumption of insulin resistance HepG2 cell in vitro[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(5): 338-340, 345. (in Chinese)
- 7 GROVER J K, YADAV S P. Pharmacological actions and potential uses of *Momordica charantia*: a review [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2004, 93(1): 123-132.
- 8 INAYATU R, ROOHU L K, KHALIL U R, et al. Lower hypoglycemic but higher antiatherogenic effects of bitter melon than glibenclamide in type 2 diabetic patients[J]. Nutrition Journal, 2015, 14 (1): 1-7.
- 9 邓媛元,汤琴,张瑞芬,等.不同干燥方式对苦瓜营养与品质特性的影响[J].中国农业科学,2017,50(2):362-371.
DENG Yuanyuan, TANG Qin, ZHANG Ruifen, et al. Effects of different drying methods on the nutrition and physical properties of *Momordica charantia* L. [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(2): 362-371. (in Chinese)
- 10 朱香燕,张珺,何义雁,等.热风与远红外干燥温度对苦瓜全粉品质的影响[J].现代食品科技,2015,31(7):265-269,325.
ZHU Xiangyan, ZHANG Jun, HE Yiyang, et al. Effects of hot air and far-infrared drying temperatures on quality of bitter melon (*Momordica charantia* L.) powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(7): 265-269, 325. (in Chinese)
- 11 唐小俊,池建伟,张名位,等.热风结合微波干燥苦瓜片的工艺研究[J].食品科技,2009,34(3):76-81.
TANG Xiaojun, CHI Jianwei, ZHANG Mingwei, et al. Drying processing techniques of heated-air combining with microwave in *Momordica charantia* L. slices [J]. Food Science and Technology, 2009, 34(3): 76-81. (in Chinese)
- 12 张敏,何俊萍,赵永会.喷雾干燥生产苦瓜复合粉工艺研究[J].饮料工业,2011,14(6):34-37.
ZHANG Min, HE Junping, ZHAO Yonghui. Study on technology for making compound bitter melon powder by spray drying [J]. The Beverage Industry, 2011, 14(6): 34-37. (in Chinese)
- 13 徐斌,董英,查青,等.苦瓜汁的真空冻干研究[J].食品与发酵工业,2004,30(2):15-18.
XU Bin, DONG Ying, ZHA Qing, et al. Vacuum freeze-drying to *Momordica charantia* juice [J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(2): 15-18. (in Chinese)
- 14 陈仪男.龙眼真空冷冻干燥工艺优化[J].农业工程学报,2008,24(9):244-248.
CHEN Yi'nan. Optimization of vacuum freeze-drying technologies of longan fruits [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 244-248. (in Chinese)
- 15 RATTI. Hot air and freeze-drying and high-value foods: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 311-319.
- 16 付博,马齐,王卫卫,等.真空冷冻干燥与喷雾干燥长双歧杆菌的工艺比较研究[J].食品科学,2012,33(7):188-192.
FU Bo, MA Qi, WANG Weiwei, et al. Comparison of vacuum freeze-drying and spray-drying processes for active *Bifidobacterium longum* powder production [J]. Food Science, 2012, 33(7): 188-192. (in Chinese)
- 17 LIU X, QIU Z, WANG L, et al. Quality evaluation of *Panax notoginseng* extract dried by different drying methods [J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89: 10-14.
- 18 李红,倪辉,姜泽东,等.真空冷冻干燥对速溶乌龙茶粉香味特征的影响[J].现代食品科技,2016,32(8):309-316.
LI Hong, NI Hui, JIANG Zedong, et al. Effect of vacuum freeze-drying on the aroma characteristics of instant tea powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(8): 309-316. (in Chinese)
- 19 SHAN Jiang, STEVEN L N. Effect of process conditions on recovery of protein activity after freezing and freeze-drying [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 1998, 45(3): 249-257.
- 20 陈国良,王煦法,庄镇泉,等.遗传算法及其应用[M].北京:人民邮电出版社,1996:10-14.
- 21 程远霞,郭素芝,谢秀英.食品共晶点和共熔点试验研究[J].食品工业,2004(1):49-50.
- 22 王丽艳,郭树国,李成华.响应面法优化荔枝真空冷冻干燥工艺参数[J].农机化研究,2012,34(11):163-166,170.
WANG Liyan, GUO Shuguo, LI Chenghua. Optimization of vacuum freeze-drying technologies of litchi by response surface methodology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(11): 163-166, 170. (in Chinese)
- 23 中华人民共和国卫生部. GB 5009.3—2010 食品安全国家标准食品中水分的测定[S].北京:中国标准出版社,2010.
- 24 马先英,赵世明,林艾光.不同干燥方法对胡萝卜复水性及品质的影响[J].大连水产学院学报,2006,21(2):158-161.
MA Xianying, ZHAO Shiming, LIN Aiguang. Effects of different drying methods on rehydration and quality of carrots [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2006, 21(2): 158-161. (in Chinese)