

有棱丝瓜热泵干燥特性及干制品多酚的体外抗氧化活性比较

许泽文^{1,2}, 刘军³, 林丽霞¹, 冯春婵¹, 李环通^{1,2}, 郭晓敏^{1,2}, 肖苏尧^{1,2}

(1. 广东省功能食品活性物重点实验室, 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广东广州 510642) (3. 广东省现代农业装备研究所, 广东广州 510642)

摘要: 本研究以新鲜有棱丝瓜为原料, 研究其热泵干燥特性。在单因素试验基础上运用 Box-Behnken Design (BBD) 方法设计优化实验, 研究不同切片厚度、干燥风速和干燥温度对干燥耗时、复水比和多酚含量的影响, 利用 Design-Expert 软件得到回归方程的预测模型并进行响应面法优化, 确定丝瓜热泵干燥的最佳条件。以热泵干燥后的有棱丝瓜为原料用丙酮溶液提取多酚, 通过 DPPH 自由基的清除能力评价有棱丝瓜多酚的抗氧化性能。试验结果表明丝瓜热泵干燥的最佳条件为: 切片厚度 5.22 mm, 干燥风速为 1.62 m/s, 干燥温度 62.6 °C。预测该条件下, 干燥耗时为 2.56 h, 复水比为 16.1, 多酚含量为 1.89 mg/g。考虑实际操作可能性, 将参数调整为: 切片厚度 5 mm, 风速为 1.6 m/s, 干燥温度 63 °C。此条件下, 测得干燥耗时为 2.34 h, 复水比 16.05, 多酚含量为 1.88 mg/g, 与预测值比较吻合。一定范围内抗氧化性能与多酚含量成正相关, 在质量浓度上升到 0.15 mg/mL 时, DPPH 自由基清除率达到 78.13%。采用热泵干燥的有棱丝瓜具有较好的复水性及良好的感官品质, 并且有棱丝瓜多酚表现出一定的清除 DPPH 自由基的能力。

关键词: 有棱丝瓜; 热泵干燥; 多酚; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2020)08-184-193

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.8.0061

Heat Pump Drying Characteristics of *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb. and *in vitro* Antioxidant Activity of Polyphenols of Its Dried Products

XU Ze-wen^{1,2}, LIU Jun³, LIN Li-xia¹, FENG Chun-chan¹, LI Huan-tong^{1,2}, GUO Xiao-min^{1,2}, XIAO Su-yao^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, College of Food Science South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (2. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, China) (3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In this study, the heat pump drying characteristics of the raw material, fresh *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb., was studied. On the basis of the results of single-factor experiments, Box-Behnken Design (BBD) was used to design and optimize the experimental conditions for the studies on the effects of different slice thickness, drying air speed and drying temperature on drying time, rehydration ratio and polyphenol content. Moreover, the predictive model of the regression equation was obtained using the Design-Expert software, and the heat pump drying process variables were optimized by response surface methodology. Polyphenols were extracted with acetone from the heat pump dried *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb., and the antioxidant activity of polyphenols from *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb. was evaluated as DPPH free radical scavenging activity. The results showed that the optimal heat pump drying conditions were: slice thickness 5.22 mm, drying air speed 1.62 m/s, drying temperature 62.6 °C. It was predicted that the drying time, rehydration ratio and polyphenol content were 2.56 h, 16.1, 1.89 mg/g,

引文格式:

许泽文, 刘军, 林丽霞, 等. 有棱丝瓜热泵干燥特性及其干制品多酚的体外抗氧化活性比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 184-193

XU Ze-wen, LIU Jun, LIN Li-xia, et al. Heat pump drying characteristics of *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb. and *in vitro* antioxidant activity of polyphenols of its dried products [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 184-193

收稿日期: 2020-01-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400902-2); 广东省功能食品活性物重点实验室 (2018B030322010)

作者简介: 许泽文(1994-), 男, 硕士, 研究方向: 天然产物活性研究

通讯作者: 肖苏尧(1974-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物活性研究

respectively, under the optimal drying conditions. Considering the actual operational feasibility, the drying process variables were adjusted to: slice thickness 5 mm, drying air speed 1.6 m/s, drying temperature 63 °C. Under such conditions, the drying time, rehydration ratio and polyphenol content were 2.24 h, 16.05, 1.88 mg/g, which were in good agreement with the predicted values. The antioxidant activity was positively correlated with the polyphenol content within a certain range. When the mass concentration increased to 0.15 mg/mL, the DPPH free radical scavenging rate reached 78.13%. The *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb. dried by the heat pump showed good rehydration behavior and good sensory quality with its polyphenols exhibiting a certain ability to scavenge DPPH free radicals.

Key words: *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb.; heat pump drying; polyphenol; antioxidant activity

丝瓜 (*Luffa cylindrica* (Linn.) Roem.) 俗名布瓜、天丝瓜、天罗、绵瓜和天络瓜等, 是一种葫芦科植物鲜嫩果实, 丝瓜的品种有普通丝瓜 (*Luffa cylindrica* (Linn.) Roem.) 和有棱丝瓜 (*Luffa acutangula* (Linn.) Roxb.)。有棱丝瓜的果实棒形, 表皮绿色有皱纹, 种皮厚而有皱纹, 黑色, 多数是在广东、广西、海南等华南地区种植。因为它产量高、品质好、营养又很丰富, 还具有很好的保健功能, 既可食用又可药用, 是我国夏秋季比较主要食用的瓜类蔬菜是一种重要的特色蔬菜之一^[1]。

但是新鲜的蔬果在常规条件下保存时间短, 产品品质下降严重, 易造成经济损失。农产品加工行业中, 通常利用干燥的方法来保证产品品质, 以延长保质期、降低包装成本等^[2]。然而, 干燥能减缓酶的作用, 但并不会使它们失活, 一些干燥方法也会降低产品的营养价值, 例如维生素 C 的损失, 以及出现不期望的颜色和外观^[3]。到目前为止, 热泵干燥技术能够有效节约能耗, 保持产品良好性状^[4]。热泵干燥技术在国外的使用已不止于木材干燥、农产品加工、制药、木材加工等行业, 现在逐渐发展到果蔬干燥等食品加工的范围^[5]。Yahya 等^[6]对木薯分别采用太阳能干燥器 SD (Solar Drying) 和太阳能辅助热泵干燥器 SAHPD (Solar-assisted Heat Pump Drying), 实验的结果表明与采用 SD 比较, 采用 SAHPD 干燥耗时更短, 平均热效率更高。国外学者研究一种新型热泵干燥室用于薄荷叶的干燥, 通过热回收装置可节省 48% 的能源^[7]。国内学者发现在山楂糕的干燥实验中, 采用热泵干燥技术能在更低的温度下完成干燥过程^[8]。研究还报道, 当热泵干燥与空气在循环系统结合时, 猕猴桃切片的干燥速度能够得到提高^[9]。

丝瓜中含蛋白质、多糖、矿物质, 此外皂甙、酚类等含量也比较高^[10-12], 营养价值丰富。其中酚类物质具有较强生物活性。丝瓜具有多种生理活性, 潘永勤等^[13]研究表明给高脂模型小鼠饲喂添加 10% 及 20% 丝瓜冻干粉 (有效成分为丝瓜多酚) 的饲料 14 d

后, 小鼠体重增量仅为模型组的 51.7%, 且血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇含量显著减少。王辉等^[14]发现, 丝瓜络可以通过降低大鼠肾脏髓质 AQP-2 蛋白的表达从而起到一定的利尿作用。刘春杰等^[15]发现丝瓜提取物能提高衰老模型小鼠脾淋巴细胞转化刺激指数, 升高血清中 IL-2 和 IFN- γ 浓度水平, 显著增强细胞免疫功能, 延缓衰老进程。Abdel 等^[16]发现丝瓜全植物的热水提取物可以降低 HCC 患者血液中癌症干细胞的比例, 并可用于最小化肝细胞癌患者的复发和转移。

国内外对于丝瓜的热泵干燥和多酚提取研究不多, 本文以切片厚度、干燥温度及干燥风速为单因素, 通过丝瓜热泵干燥曲线来分析研究其干燥特性, 得出各干燥参数对丝瓜热泵干燥特性的影响规律。采用 Box-Behnken 试验设计的方法, 对丝瓜热泵干燥工艺参数进行优化。之后对经热泵干燥的丝瓜样品以丙酮为溶剂采用浸提法提取丝瓜总酚并以福林-酚比色法测定多酚含量, 采用 DPPH 法测定自由基清除率, 评价丝瓜多酚的抗氧化活性。

1 材料与方法

1.1 仪器与材料

有棱丝瓜, 购于长湓市场; 无水乙醇、酚试剂、DPPH、上海源聚生物科技有限公司; 丙酮、无水碳酸钠, 广州化学试剂厂; 抗坏血酸 (Vc), 阿拉丁生化科技有限公司; 没食子酸标准品, 天津市大茂化学试剂厂。试剂均为分析纯。

RG-15 多功能环保介质热泵干燥机, 广东省现代农业装备研究所; UV-1750 紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; GR150A 粉碎机, 合肥荣事达小家电有限公司; MA150 水分测定仪, 德国赛多利斯集团; AL104 电子天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司; DK-8D 恒温水浴锅, 广州市深华生物技术有限公司; RE-52A 旋转蒸发仪, 上海亚荣生化仪器厂。

1.2 实验方法

1.2.1 热泵干燥单因素实验

1.2.1.1 切片厚度的确定

把去络丝瓜分为重量相同的4份,分别将其横切为4、6、8、10 mm厚度的丝瓜片。在温度为55℃,风速为2.0 m/s,干燥。

1.2.1.2 干燥温度的确定

设置45、50、55、60、65℃的温度阶梯差,在厚度为8 mm,风速为2.0 m/s的条件下进行干燥。

1.2.1.3 干燥风速的确定

设置0.5、1.0、1.5、2.0 m/s的风速梯度差,在丝瓜厚度为8 mm,温度为55℃的条件下进行干燥。

1.2.2 响应面分析实验 Box-Behnken 设计

经过单因素试验,在此基础上,选取切片厚度(X_1)、干燥温度(X_2)、风速(X_3)三个影响丝瓜热泵干燥工艺的3个因素为自变量,以干燥耗时(Y_1)、复水比(Y_2)以及多酚含量(Y_3)为响应指标,采用3因素3水平的Box-Behnken响应面设计,进而通过响应面分析得到丝瓜热泵干燥的最佳工艺参数。表1为试验的因素水平表,工艺参数优化试验安排见表2。

表1 试验因素水平

Table 1 Factor levels of the test

水平	因素		
	切片厚度 X_1 /mm	干燥温度 X_2 /℃	风速 X_3 /(m/s)
-1	4	45	1.0
0	6	55	1.5
1	8	65	2.0

本试验采用福林-酚法测定丝瓜总酚含量,测定方法参照王海坤和宋振国^[17,18]的方法,略加修改,以没食子酸为标准样,在765 nm处测定吸光度。

1.2.3 没食子酸标准曲线

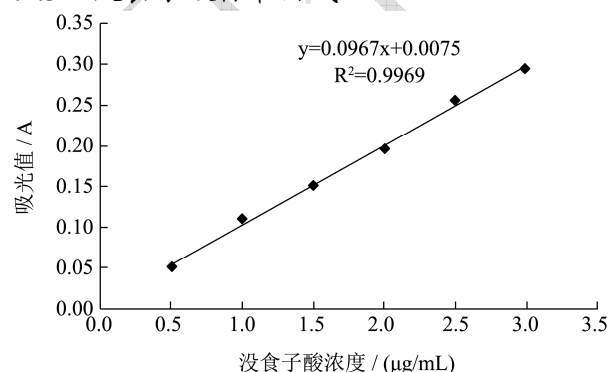


图1 没食子酸标准曲线

Fig.1 Standard curve of gallic acid

以没食子酸对照品溶液的浓度为X轴,对应的吸

光度为Y轴,制作没食子酸的标准曲线,得到的回归方程: $y=0.0967x+0.0075$, $R^2=0.9969$ 。根据图表显示了样品液在0.57~3.70 mg/g的范围内,样品液测得的吸光度与样品液浓度是呈良好的线性回归的,因此可以根据测定出样品液的吸光值在标准曲线上找出相应的多酚浓度再换算出多酚含量^[19],计算公式如下。

$$\text{多酚含量}/(\text{mg/g}) = \frac{V \times C}{b \times 10^3 \times M} \quad (1)$$

式中, V 为丝瓜粗提取液最后定容至的体积 mL; C 为多酚浓度 $\mu\text{g/mL}$; b 为稀释的倍数; M 为样品的重量 g。

1.2.4 丝瓜多酚粗提液的抗氧化活性检测

采用 DPPH·法^[20]测定丝瓜多酚粗提液的抗氧化活性,方法略加修改。

DPPH 自由基清除率测定:用无水乙醇将粗提取液配成0.03、0.06、0.09、0.12、0.15 mg/mL不同浓度的样品溶液,在10 mL的比色管中分别加入2.0 mL无水乙醇和DPPH,震荡摇匀,室温避光反应0.5 h,以溶剂无水乙醇做空白,然后测其在517 nm波长处吸光值,记作 A_0 (对照组);将2.0 mL不同浓度的样品溶液和2.0 mL的DPPH溶液移入10 mL比色管中,震荡混匀,采用同样方法在517 nm处测定吸光度,记作 A_s (样品组);移取2 mL样品溶液和2.0 mL无水乙醇摇匀混合之后,采取同样的方法于517 nm测定吸光度,记作 A_c (空白组),以 V_c 为阳性对照。实验平行3次,最后求得DPPH自由基清除率的平均值。

$$\text{DPPH自由基清除率} = \frac{A_0 - (A_s - A_c)}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

1.3 品质评定

1.3.1 含水率

含水率计算公式如下:

$$M_i = 100 - \frac{G_0(100 - M_0)}{G_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中, M_i : 即时含水率; M_0 : 物料起始含水率; G_0 : 物料起始重量; G_i : 物料即时重量。

1.3.2 复水比

称取干制后的丝瓜制品5 g,置于200 mL温度为55℃水中浸泡,每隔30 min捞出,晾干至表面无水分,进行称重,直至相邻两次称量值相差不足1 g,达到复水终点。复水比的计算公式^[21]如下:

$$R_f = \frac{M_f}{M_g} \quad (4)$$

式中, M_f : 干制品复水后沥干重; M_g : 丝瓜干样质量。

1.4 数据处理

采用 origin 8.6 作图, SPSS Statistics 21、Design-Expert 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 干燥参数对丝瓜热泵干燥特性的影响

2.1.1 干燥温度对丝瓜热泵干燥特性的影响

丝瓜在热泵干燥过程中的含水率随时间的变化曲线如图2所示,干燥温度为45℃时,干燥耗时为9.5 h,而在65℃的条件下,干燥耗时仅为4.0 h,较45℃时缩短了57.9%。由此可得,干燥温度对丝瓜热泵干燥的干燥耗时有显著的影响,在其他条件相同的情况下,干燥耗时随着干燥温度的升高而缩短。温度越高,越早进入恒速干燥阶段,干燥速率越快,干燥耗时越短。

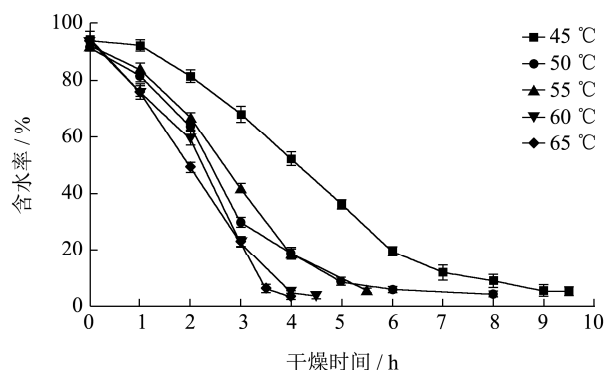


图2 不同温度下的丝瓜热泵干燥曲线

Fig.2 Heat pump drying curve of *Luffa acutangula* (Linn.)

Roxb. at different temperatures

2.1.2 丝瓜切片厚度对丝瓜热泵干燥特性的影响

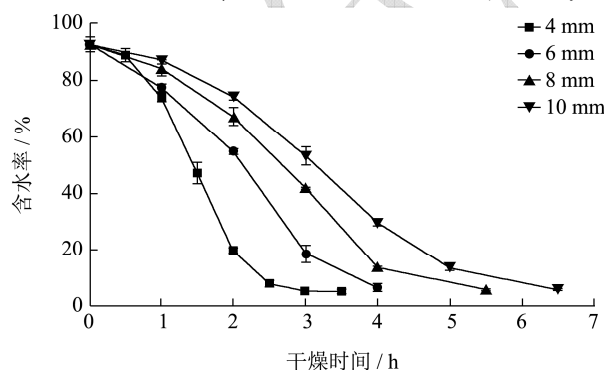


图3 不同切片厚度丝瓜的热泵干燥曲线

Fig.3 Heat pump drying curve of *Luffa acutangula* (Linn.)

Roxb. at different slice thickness

由图3可知,切片厚度越大,所需干燥耗时越长。4 mm厚的丝瓜干燥耗时为3.5 h,对比10 mm的丝瓜干燥耗时6.5 h,仅需其53.8%的时间,时间缩短接近

一半。切片厚度每减小2 mm,丝瓜热泵干燥需要的时间就缩短1 h左右,由此可得,切片厚度对丝瓜热泵干燥影响显著。切片厚度越薄,越早进入恒速干燥阶段,干燥速率越快,干燥耗时越短。

2.1.3 干燥风速对丝瓜热泵干燥特性的影响

由图4所示,当风速为1.0、1.5、2.0 m/s,干燥温度、切片厚度相同时,丝瓜热泵干燥至终点所需要的时间相差不大,为6 h左右;而当风速为0.5 m/s时,干燥耗时延长至7 h。概而论之,风速对丝瓜热泵干燥速度影响较小,但仍可得到规律:风速越高,丝瓜热泵干燥耗时越短。风速在1.0 m/s以上,对丝瓜热泵干燥特性影响不大,当风速较低时,较晚进入恒速干燥阶段,干燥速率较低,恒速干燥阶段时间较长。

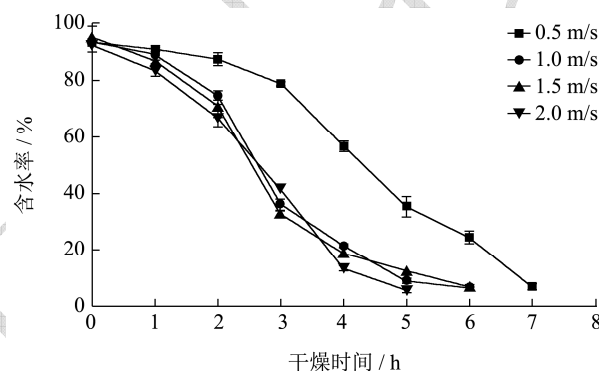


图4 不同风速条件下的干燥曲线

Fig.4 Heat pump drying curve of *Luffa acutangula* (Linn.)

Roxb. at different air speed

2.2 丝瓜热泵干燥工艺参数优化

2.2.1 回归试验结果

根据试验设计方案表进行实验,所得实验结果如表2所示。

应用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析,得到热泵干燥丝瓜的干燥耗时(Y_1)、复水比(Y_2)以及多酚含量(Y_3)三个响应指标的回归方程如下:

干燥耗时回归方程:

$$Y_1 = 15.00 + 1.02X_1 - 0.55X_2 + 1.33X_3 - 6.25E-003X_1X_2 + 0.13X_1X_3 - 0.05X_2X_3 - 0.03X_1^2 + 5.25E-003X_2^2 + 0.10X_3^2$$

复水比回归方程:

$$Y_2 = -32.56 - 0.98X_1 + 0.43X_2 + 51.79X_3 - 2.00E-003X_1X_2 + 0.04X_1X_3 - 0.24X_2X_3 - 0.06X_1^2 + 8.15E-004X_2^2 - 13.48X_3^2$$

多酚含量回归方程:

$$Y_3 = 1.67 - 0.25X_1 - 0.08X_2 + 2.10X_3 + 0.01X_1X_2 - 0.26X_1X_3 + 0.01X_2X_3 - 0.05X_1^2 - 7.25E-0045X_2^2 - 0.45X_3^2$$

3个指标的回归分析结果分别见表3、表4、表5。

表2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken experimental design and corresponding results

试验号	切片厚度 X_1/mm	温度 $X_2/^\circ\text{C}$	风速 $X_3/(\text{m/s})$	干燥耗时 Y_1/h	复水比 Y_2	多酚含量 $Y_3/(\text{mg/g})$
1	-1	-1	0	3	15.37	1.59±0.10
2	1	-1	0	6	9.22	1.24±0.06
3	-1	1	0	1.5	18.78	1.34±0.06
4	1	1	0	4	12.79	1.70±0.10
5	-1	0	-1	2.5	14.48	1.27±0.07
6	1	0	-1	4	8.16	1.60±0.09
7	-1	0	1	2	12.94	1.67±0.09
8	1	0	1	4	6.77	1.28±0.06
9	0	-1	-1	4.5	8.8	1.36±0.08
10	0	1	-1	3.5	14.67	1.53±0.08
11	0	-1	1	4.5	9.54	1.47±0.07
12	0	1	1	2.5	10.64	1.60±0.06
13	0	0	0	3.0	14.03	1.48±0.04
14	0	0	0	3.0	14.21	1.45±0.07
15	0	0	0	3.5	14.35	1.49±0.05
16	0	0	0	3.5	14.27	1.53±0.06

表3 干燥耗时的回归分析结果

Table 3 Results of regression analysis of drying time

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	17.26	9	1.89	15.56	0.0008	significant
A-切片厚度	10.13	1	10.13	82.17	<0.0001	
B-干燥温度	5.28	1	5.28	42.86	0.0003	
C-干燥风速	0.28	1	0.28	2.28	0.1746	
AB	0.063	1	0.063	0.51	0.4994	
AC	0.063	1	0.063	0.51	0.4994	
BC	0.25	1	0.25	2.03	0.1973	
A ²	0.042	1	0.042	0.34	0.5772	
B ²	1.16	1	1.16	9.42	0.0181	
C ²	2.63E-03	1	2.63E-03	0.021	0.8879	
Residual	0.86	7	0.12			
Lack of Fit	0.56	3	0.19	2.5	0.1985	not significant
Pure Error	0.3	4	0.075			
Cor Total	18.12	16				

表4 复水比的回归分析结果

Table 4 Results of regression analysis of rehydration ratio

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	159.35	9	17.71	1370.9	<0.0001	significant
A-切片厚度	75.83	1	75.83	5871.44	<0.0001	
B-干燥温度	24.33	1	24.33	1883.49	<0.0001	
C-干燥风速	4.84	1	4.84	374.45	<0.0001	
AB	6.40E-03	1	6.40E-03	0.5	0.5042	

转下页

接上页					
AC	5.63E-03	1	5.63E-03	0.44	0.5304
BC	5.69	1	5.69	440.44	<0.0001
A ²	0.25	1	0.25	19.33	0.0032
B ²	0.028	1	0.028	2.17	0.1846
C ²	47.85	1	47.85	3704.75	<0.0001
Residual	0.09	7	0.013		
Lack of Fit	0.032	3	0.011	0.71	0.5929
Pure Error	0.059	4	0.015		
Cor Total	159.44	16			

表 5 多酚含量的回归分析结果

Table 5 Results of regression analysis of polyphenol content

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob> F	
Model	0.84	9	0.093	30.14	< 0.0001	significant
A-切片厚度	1.25E-03	1	1.25E-03	0.4	0.5454	
B-干燥温度	0.054	1	0.054	17.58	0.0041	
C-干燥风速	4.05E-03	1	4.05E-03	1.31	0.2904	
AB	0.28	1	0.28	88.99	< 0.0001	
AC	0.27	1	0.27	85.64	< 0.0001	
BC	0.018	1	0.018	5.88	0.0457	
A ²	0.16	1	0.16	50.25	0.0002	
B ²	2.21E-04	1	2.21E-04	0.071	0.7969	
C ²	0.053	1	0.053	17.13	0.0044	
Residual	0.022	7	3.10E-03			
Lack of Fit	3.80E-03	3	1.27E-03	0.28	0.8358	not significant
Pure Error	0.018	4	4.47E-03			
Cor Total	0.86	16				

表 3 分析结果可知：模型的 p 值为 0.0008 ($p<0.05$)，表明实验数据的拟合是合理可靠的，模型显著性好。试验的三个因素对干燥耗时的影响显著，其中切片厚度 (A) 项 $p<0.01$ ，表明切片厚度对干燥耗时的影响达极显著水平。AB、AC、BC 项 p 均 >0.05 ，表明切片厚度、干燥温度、干燥风速对干燥耗时的影响无显著的交互作用。李丽^[22]等的研究山药的热泵干燥工艺时，发现干燥温度对山药的干燥速率有较大影响，但切片厚度对山药干燥速率影响较小。同样，石启龙^[23]等在研究雪莲果的热泵干燥工艺时也发现相同规律，但为避免雪莲果在高温时产生褐变影响感官品质而采用了相对较低的 25~35℃ 的干燥温度。

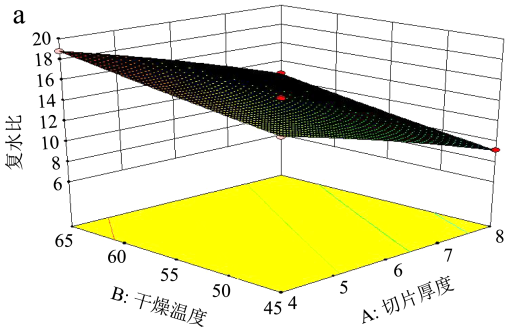
表 4 数据显示：模型 $p<0.01$ ，达到极显著水平，并且结果显示失拟项不显著，说明该方程对试验拟合较好。对模型各项进行显著性分析，A (切片厚度)、B (干燥温度)、C (风速) 的 $p<0.01$ ，表明三个因素对干燥后的丝瓜的复水比的影响都极显著。BC 项

($p<0.01$)，表示干燥温度和干燥风速对复水比的影响有显著的交互作用。

表 5 结果显示：多酚含量回归方程模型 $p<0.01$ ，模型极显著，失拟项不显著，模型拟合好。干燥温度对多酚含量影响显著，切片厚度和干燥温度、切片厚度和风速之间交互作用极显著，干燥温度和干燥风速有显著交互作用。

2.2.2 响应面分析结果

2.2.2.1 自变量对响应值影响效果



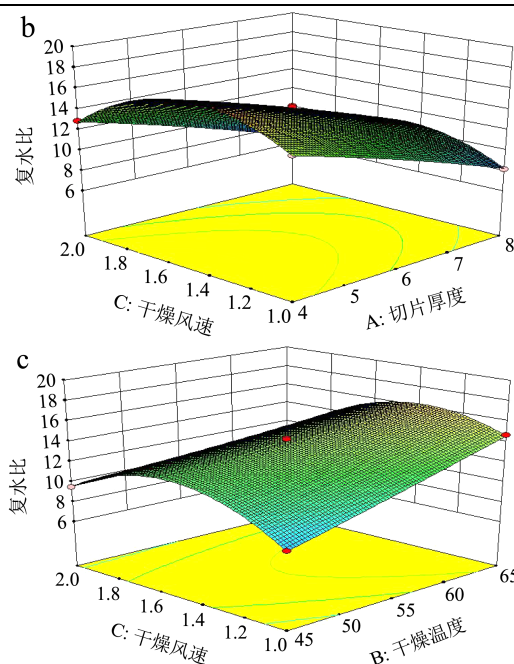


图5 切片厚度、干燥风速和干燥温度对复水比的影响

Fig.5 The interactive effects of slice thickness, air speed and drying temperature on rehydration ratio

X_1 、 X_2 、 X_3 对复水比、感官评分、多酚含量、干燥耗时影响效果的三维响应曲面图分别如图5、图6、图7所示。

由图5可以看出,当干燥室内的温度恒定不变时,切片厚度越厚,有棱丝瓜的复水性越差;在一定的切片厚度和干燥温度时,过快或过慢的干燥风速都不利于形成良好的复水比;这可能是当水分获得合适的蒸发速率时能够避免有棱丝瓜的组织结构被破坏,从而不会对复水性产生较大影响^[24]。

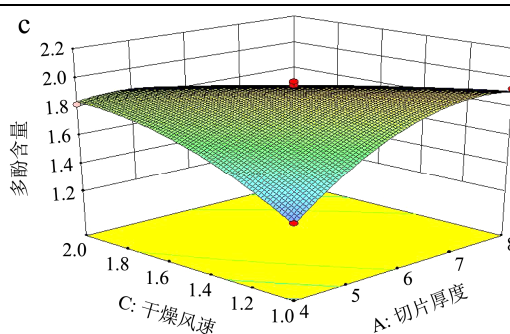
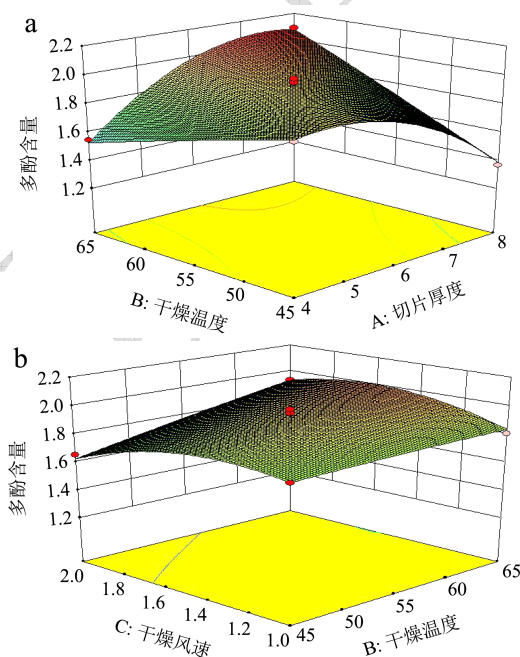


图6 切片厚度、干燥风速和干燥温度对多酚含量的影响

Fig.6 The interactive effects of slice thickness, air speed and drying temperature on polyphenol content

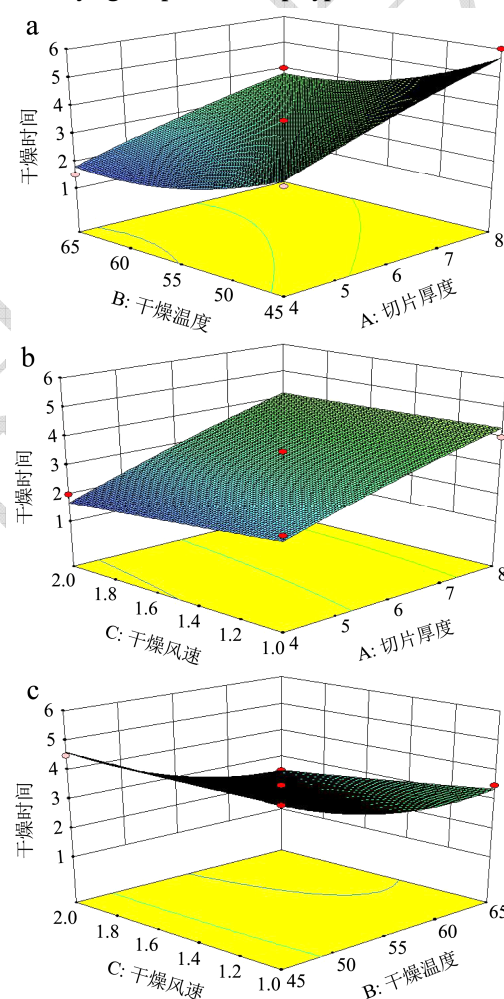


图7 切片厚度、干燥风速和干燥温度对干燥耗时的影响

Fig.7 The interactive effects of slice thickness, air speed and drying temperature on dryingtime

由图6可以看出,干燥室内温度较高时,干燥速率快、干燥耗时相对缩短,此时多酚含量增高;在较低温时,干燥耗时延长,这导致酚类物质部分损失。当有棱丝瓜切片厚度较薄时,随着干燥温度的增加,多酚含量呈现下降趋势,可能是因为瓜片比表面积较大,酚类物质易与空气接触发生酶促褐变,当厚度增

加时, 较厚的植物组织降低了内部酚类物质与空气接触的机率, 所以多酚含量较高^[25]。但损失程度相对较小, 有研究表明经过热泵干燥后的苦瓜中总酚、Vc、类胡萝卜素等含量与热风干燥和真空冷冻干燥等方式相比有更多保留, 并且总抗氧化能力也优于其他干燥方式, 说明采用热泵干燥后的果蔬中营养成分仍有一定程度保留^[26]。

由图 7 可以看出, 干燥风速保持恒定时, 干燥耗时随着切片厚度的增加而延长; 当干燥室温度一定时, 干燥耗时同样受到切片厚度的影响; 当切片厚度不变时, 干燥温度越高, 此时的干燥耗时最短, 而受干燥风速的影响相对较小。总的来说, 更薄的切片厚度能

够获得更大的蒸发表面积, 从而使干燥耗时缩短。

2.2.2.2 响应面最优方案预测

以干燥耗时最短、复水比最大、多酚含量最高为期望目标, 采用 Design-Expert 软件得到最优预测方案如表 6, 确定丝瓜热泵干燥的最佳工艺: 切片厚度 5.22 mm, 干燥温度 62.61 °C, 风速为 1.62 m/s。预测该条件下, 干燥耗时为 2.37 h, 复水比为 16.14, 多酚含量为 1.89 mg/g。考虑实际操作可能性, 将参数做出调整: 切片厚度为 5 mm, 干燥温度 63 °C, 风速为 1.6 m/s。在此条件下, 测得干燥耗时为 2.34 h, 复水比 16.05, 多酚含量为 1.88 mg/g, 与预测值接近。

表 6 丝瓜热泵干燥工艺参数最优预测

Table 6 The optimum prediction heat pump drying process parameters of *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb.

Number	切片厚度/mm	干燥温度/°C	干燥风速/(m/s)	干燥耗时/h	复水比	多酚含量/mg	Desirability	
1	5.22	62.6	1.62	2.37	16.1	1.89	0.82	Selected

2.3 丝瓜多酚粗提液的抗氧化活性试验

多酚提取工艺参考何志勇等^[27]的方法略有修改。利用 DPPH 方法测定丝瓜多酚粗提物的抗氧化性, 如图 8 所示, 分别测定不同浓度的多酚提取液对 DPPH 自由基的清除能力随着丝瓜多酚浓度的增大而显著增强, 浓度越高抑制自由基能力越强。浓度在 0.03 mg/mL~0.09 mg/mL 范围内自由基清除率增加趋势较大, 浓度上升到 0.15 mg/mL 时自由基清除率为 78.13%, 表明此时溶液中大部分的 DPPH 自由基大部分被清除。与阳性对照相比, 当浓度为 0.015 mg/mL 时 Vc 对 DPPH 清除率已达到 77.65%, 虽然效果不如 Vc, 但与其他报道相比文中丝瓜多酚粗提物仍表现出可观的抗氧化能力^[28]。

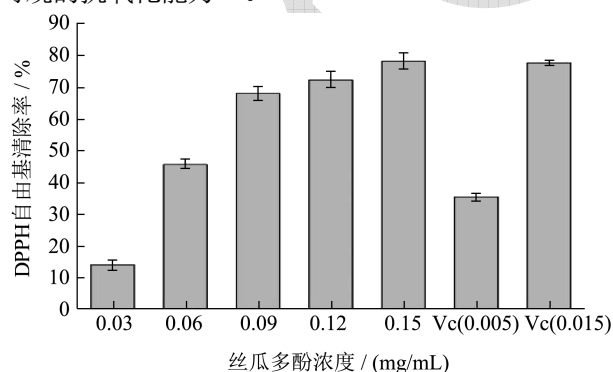


图 8 丝瓜多酚粗提物对 DPPH 自由基的清除能力

Fig.8 DPPH· radical scavenging activity of polyphenol extracts from *Luffa acutangula* (Linn.) Roxb.

3 结论

3.1 切片厚度对丝瓜热泵干燥的特性有显著影响, 在实验选取的厚度梯度范围内, 切片厚度越薄, 干燥过程越早进入恒速阶段, 干燥速率越快, 干燥耗时越短。干燥温度对丝瓜热泵干燥特性有显著影响, 在试验选择的温度下, 物料的干燥耗时随着干燥温度的升高而缩短, 越快到达干燥终点。风速对丝瓜热泵干燥特性有影响, 在实验选取的风速 1.0~2.0 m/s 范围内影响不显著, 干燥特性曲线无明显差异; 当风速较小时, 干燥速率明显减慢, 干燥到终点所需的时间延长。总体上, 干燥耗时随着风速的增大而缩短。

3.2 在单因素试验研究的基础上, 采用 Box-Behnken 设计。以切片厚度、干燥温度、风速为参数, 以干燥耗时、复水比以及多酚含量为评价指标, 进行响应面实验分析。通过 Design-Expert 软件预测得到最优干燥工艺条件为: 切片厚度 5.22 mm, 干燥温度 62.61 °C, 风速为 1.62 m/s; 根据实际操作可能性进行调整得工艺条件: 切片厚度为 5 mm, 干燥温度 63 °C, 风速为 1.6 m/s。在此条件下, 测得干燥耗时为 2.34 h, 复水比 16.05, 多酚含量为 1.88 mg/g, 与预测值接近。

3.3 在丝瓜多酚提取方面, 丝瓜多酚提取的条件为丙酮浓度分数为 60%、浸提温度 55 °C、浸提时间 3 h, 测定丝瓜干粉多酚的含量是 2.93 mg/g, 新鲜丝瓜的得率为 4.00%左右, 新鲜丝瓜多酚的含量为 0.12 mg/g。通过 DPPH 自由基清除能力研究, 证明丝瓜的抗氧化活性与多酚的含量成正相关, 当多酚浓度为 0.15 mg/mL 时, 自由基清除率可达 78.13%, 说明丝瓜具有一定的抗氧化能力, 同时也为丝瓜多酚的研究提供进一步的依据。

参考文献

- [1] 戴澈,刘根新,许园园,等.丝瓜种质资源与遗传育种研究进展[J].黑龙江农业科学,2016,10:167-170
DAI Che, LIU Gen-xin, XU Yuan-yuan, et al. Research progress in *Luffa* germplasm resources and genetic breeding [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016, 10: 167-170
- [2] Patel K K, Kar A. Heat pump assisted drying of agricultural produce-an overview [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(2): 142-160
- [3] Arabhosseini A, Padhye S, Huisman W, et al. Effect of drying on the color of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.) leaves [J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(7): 1281-1287
- [4] Fadhel M I, Sopian K, Daud W R W, et al. Review on advanced of solar assisted chemical heat pump dryer for agriculture produce [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 1152-1168
- [5] 张艳来,尹凯丹,龙成树,等.热泵技术在我国农产品干燥中的应用及展望[J].农机化研究,2014,36(5):1-7
ZHANG Yan-lai, YIN Kai-dan, LONG Cheng-shu, et al. Application and prospects of the agricultural product drying using the heat pump in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(5): 1-7
- [6] Yahya M, Fudholi A, Hafizh H, et al. Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava [J]. Solar Energy, 2016, 136(15): 606-613
- [7] Aktaş M, Khanlari A, Aktekel B, et al. Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(28): 18034-18044
- [8] Wang D C, Zhang G, Han Y P, et al. Feasibility analysis of heat pump dryer to dry hawthorn cake [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(8-9): 2919-2924
- [9] Mohammadi I, Tabatabaekoloor R, Motevali A. Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices [J]. Energy, 2019, 170: 149-158
- [10] 黎炎,李文嘉,王益奎,等.丝瓜络在医药、日用洗涤及保健品等方面的应用研究进展[J].广西农业科学,2010,41(1):85-87
LI Yan, LI Wen-jia, WANG Yi-kui, et al. Progress on application of loofah sponges in medicine, daily household cleaning and health products fields [J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2010, 41(1): 85-87
- [11] Hlel, T B, Belhadj F, Gül F, et al. Variations in the bioactive compounds composition and biological activities of loofah (*Luffa cylindrica*) fruits in relation to maturation stages [J]. Chemistry & Biodiversity, 2017, 14(10)
- [12] Swetha, M P, Muthukumar, S P. Characterization of nutrients, amino acids, polyphenols and antioxidant activity of ridge gourd (*Luffa acutangula*) peel [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(7): 3122-3128
- [13] 潘永勤,李菁,朱伟杰,等.丝瓜降血脂及抗氧化作用的实验研究[J].中国病理生理杂志,2008,24(5):873-877
PAN Yong-qin, LI Jing, ZHU Wei-jie, et al. Antioxidant and serum lipid lowering effects of *Luffa cylindrical* on experimental hyperlipidemia mice [J]. Chinese Journal of Pathophysiology, 2008, 24(5): 873-877
- [14] 王辉,康白,许莉莉,等.丝瓜络对慢性心力衰竭大鼠肾脏水通道蛋白-2 免疫荧光表达的影响[J].潍坊医学院学报, 2011,33(4):276-278
WANG Hui, KANG Bai, XU Li-li, et al. Effects of retinerus luffae fructus on the renal medullary aquaporin-2 expression in rats with chronic heart failure [J]. Acta Acad Med Weifang, 2011, 33(4): 276-278
- [15] 刘春杰,董立珉,康红钰.丝瓜提取物对衰老小鼠学习记忆能力、脑组织形态学及免疫功能的影响[J].中药药理与临床,2016,32(1):106-110
LIU Chun-jie, DONG Li-min, KANG Hong-yu. Effect of towel gourd extract on learning-memory ability, morphology of brain tissue and immune function in aging mice [J]. Pharmacology and Clinics of Chinese Materia Medica, 2016, 32(1): 106-110
- [16] Abdel-Salam, I M, Awadein N E, Ashour M. Cytotoxicity of *Luffa cylindrica* (L.) M. Roem. extract against circulating cancer stem cells in hepatocellular carcinoma [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2019, 229: 89-96
- [17] 王海坤,张存芳,陈程.Folin-Ciocalteu 比色法测定牡丹籽饼、牡丹叶、牡丹籽种壳中总多酚的含量[J].应用化工, 2018,47(8):1794-1796,1802
WANG Hai-kun, ZHANG Cun-lao, CHEN Cheng. Determination of total polyphenols in peony seed cake, peony leaf and peony shell by folin-ciocalteu colorimetric method [J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(8): 1794-1796, 1802
- [18] 宋振国,吴小瑜,严琳,等.Folin-Ciocalteu 比色法测定石榴皮多酚含量条件的优化研究[J].中国当代医药,2019,26(6):4-7,11
SONG Zhen-guo, WU Xiao-yu, YAN Lin, et al. Optimization

- study on conditions for the measurement of polyphenol content in pomegranate peel by Folin-Ciocalteu colorimetry [J]. China Modern Medicine, 2019, 26(6): 4-7, 11
- [19] 朱超峰,黄诗林,朱柳青,等.香蕉皮多酚物质提取工艺优化及其抗氧化性研究[J].广东化工,2019,46(11):34-36
- ZHU Chao-feng, HUANG Shi-lin, SUN Liu-qing, et al. Optimization of extraction technology of polyphenols from banana peel and the research of its oxidation resistance [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(11): 34-36
- [20] 周笑犁,杜斌,周艳,等.蓝莓皮渣花色苷粗提物的抗氧化性[J].食品与发酵工业,2017,43(6):181-186
- ZHOU Xiao-li, DU Bin, ZHOU Yan, et al. Study on antioxidant activity of anthocyanins from crude extract of blueberry pomace [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(6): 181-186
- [21] 程慧,姬长英,张波,等.香菇热泵-真空联合干燥工艺优化[J].华南农业大学学报(自然科学版),2019,40(1):125-132
- CHENG Hui, JI Chang-ying, ZHANG Bo, et al. Optimization of drying process for *Lentinus edodes* by combining heat pump with vacuum [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1): 125-132
- [22] 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, SHEN 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
- [23] 石启龙,郑亚琴,赵亚.雪莲果热泵干燥特性及品质研究[J].食品科学,2014,35(3):16-22
- SHI Qi-long, ZHENG Ya-qin, ZHAO Ya. Drying characteristics and quality of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) during heat pump drying [J]. Food Science, 2014, 35(3): 16-22
- [24] 余洋洋,唐道邦,温靖,等.热泵温度对白萝卜干燥速率及品质的影响[J].食品与机械,2020,36(2):211-214
- YU Yang-yang, TANG Dao-bang, WEN Jing, et al. Effect of different heat pump temperatures on drying rate and quality of white radish [J]. Food and Machinery, 2020, 36(2): 211-214
- [25] 罗磊,支梓鉴,刘云宏,等.正交试验优化苹果片低氧热泵干燥工艺[J].食品科学,2014,35(4):1-5
- LUO Lei, ZHI Zi-jian, LIU Yun-hong, et al. Optimization by orthogonal array design of heat pump drying process for apple slices under oxygen condition [J]. Food Science, 2014, 35(4): 1-5
- [26] 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 Yuan-yuan, TANG Qin, ZHANG Rui-fen, et al. Effects of different drying methods on the nutrition and physical properties of *Momordica charantia* [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(2): 362-371
- [27] 何志勇,夏文水.橄榄多酚的提取研究[J].林产化学与工业,2007,27(1):77-80
- HE Zhi-yong, XIA Wen-bing. Study on extraction of polyphenols from *Canarium album* (Lour.) rauesch [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2007, 27(1): 77-80
- [28] 潘永勤,李菁,朱伟杰,等.丝瓜提取物抗氧化活性的研究[J].中国病理生理杂志,2011,27(11):2086-2089
- PAN Yong-qin, LI Jing, ZHU Wei-jie, et al. Antioxidative activity of extracts from *Luffa cylindrica* L [J]. Chinese Journal of Pathophysiology, 2011, 27(11): 2086-2089

(上接第 306 页)

- [44] 刘婧玮,蒋英丽,沈毅,等.酱香型白酒中风味物质的成因研究现状[J].酿酒科技,2013,5:85-89
- LIU Jing-wei, JIANG Ying-li, SHEN Yi, et al. Research status of the causes of flavors in Maotai-flavored liquor [J]. Liquor Science and Technology, 2013, 5: 85-89
- [45] Xiu L, Kunliang G, Hongxun Z. Determination of microbial diversity in Daqu, a fermentation starter culture of Maotai liquor, using nested PCR-denaturing gradient gel electrophoresis [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 28(6): 2375-2381
- [46] 周靖,吴天祥.酱香大曲中红曲霉的筛选及其酶活性能研究[J].酿酒科技,2013,10:24-26
- ZHOU Jing, WU Tian-xiang. Screening of *Monascus* in daojiao and study on its enzyme activity [J]. Brew Science and Technology, 2013, 10: 24-26