

雪莲果热风 - 微波联合干燥工艺优化

石启龙, 赵 亚, 郑亚琴

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255049)

摘 要: 以雪莲果为原料, 研究样品厚度、热风温度、微波质量比功率对雪莲果热风干燥和微波干燥特性的影响。以热风温度、转换点含水率、微波质量比功率为因素, 以色泽变化(ΔE)、干燥时间(t)为指标, 采用二次回归正交旋转组合试验设计确定雪莲果热风-微波联合干燥的最适工艺参数。结果表明: 雪莲果热风干燥最适工艺参数组合为样品厚度 2~4mm, 热风温度 70℃; 雪莲果微波干燥最适工艺参数组合为样品厚度 4mm, 微波质量比功率 2W/g。影响热风-微波联合干燥产品 ΔE 的主次顺序依次为微波质量比功率、热风温度、转换点含水率; 影响干燥时间的主次顺序依次为转换点含水率、热风温度、微波质量比功率。雪莲果热风-微波联合干燥的最适工艺参数组合为热风温度 68.1℃, 转换点含水率 61.0%, 微波质量比功率 2.6W/g。在此组合参数条件下, 色泽变化 $\Delta E=21.53$, 干燥时间 $t=172\text{min}$, 复水比 $R_R=4.12$, 收缩率 $S_R=84.35\%$ 。

关键词: 雪莲果; 热风; 微波; 干燥特性; 联合干燥

Process Optimization for Drying of Yacon by Hot Air Combined with Microwave

SHI Qi-long, ZHAO Ya, ZHENG Ya-qin

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In this work, hot air and microwave were combinedly used to dry yacon and its drying characteristics were explored under varying conditions of sample thickness, air temperature, and microwave power. Quadratic regression orthogonal rotary combination design was used to optimize total color change (ΔE) and drying time with respect to hot air temperature, water content at conversion point and microwave mass specific power. The results showed that the optimal process parameters of hot air drying were sample thickness of 2—4 mm, air temperature of 70 °C and those of microwave drying were sample thickness of 4 mm and microwave mass specific power of 2 W/g. The importance of factors affecting ΔE resulting from hot air combined with microwave treatment dropped in the following sequence: microwave mass specific power, hot air temperature and water content at conversion point, and water content at conversion point was the most important factor affecting drying time, followed by hot air temperature and microwave mass specific power. The optimal parameters for drying yacon by hot air combined with microwave treatment were sample thickness of 4 mm, hot air temperature of 68.1 °C, water content at conversion point of 61.0% and microwave mass specific power of 2.6 W/g. Under the optimal process conditions, the color change ΔE was 21.53, the drying time t 172 min, the rehydration rate R_R 4.12, and the shrinkage rate S_R 84.35%.

Key words: yacon; hot air; microwave; drying characteristics; combinatorial drying

中图分类号: TS255.42

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2011)12-0150-06

雪莲果(*Smallanthus sonchifolius*)属菊科植物, 原产于安第斯山脉。自 2004 年以来先后在云南、海南、山东、河南、新疆等省引种成功, 其种植规模及产量逐年增加。雪莲果含有 20 多种人体必需的氨基酸和大量可溶性纤维, 属低热食品; 且富含钾、钙、锌、铁、镁等微量元素, 具有清肝解毒, 降血压, 养颜美容和

提高人体免疫力等功效。而且雪莲果富含果寡糖, 是人体内双歧杆菌繁殖所需要的最佳营养成分^[1-2]。但是, 雪莲果采收后, 果寡糖很快发生部分水解, 影响了雪莲果保健作用的发挥; 而且极易出现褐变和腐烂等现象, 因此, 在一定程度上限制了它的推广。

干燥是食品保藏的重要途径之一。同时, 干燥本

收稿日期: 2010-08-10

基金项目: 山东省高校科技计划项目(J09LC75)

作者简介: 石启龙(1974—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为果蔬和水产品加工及贮藏。E-mail: qilongshi@sdut.edu.cn

身也是一个耗能较大的过程,其能耗约占工业总能耗的10%~15%^[3]。联合干燥是指根据物料的特性,将2种或2种以上的干燥方式优势互补,分阶段进行的一种复合干燥技术,如热风-(真空)微波联合干燥、热风-冻干联合干燥、热泵-热风联合干燥等^[4-5]。近年来,联合干燥由于在提高干燥速率、降低过程能耗、提高产品质量方面具有独特的优势,因而受到国内外学者、企业界、工业界的广泛关注^[6-12]。本实验拟研究雪莲果的热风、微波干燥特性,并通过回归试验确定雪莲果的热风-微波联合干燥工艺参数,为雪莲果的干制保藏提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 材料

雪莲果 山东淄博果品批发市场。

1.2 仪器与设备

AUY220型电子天平 日本岛津公司;JJ200型精密电子天平 江苏常熟测试仪器厂;101-2B型电热鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司;WG 900B型光波/微波炉 广东顺德格兰仕电器有限公司;DHG-9623A型电热鼓风干燥箱 上海精宏试验设备厂;SC-80C型测色色差计 北京康光仪器有限公司;HH-6型数显恒温水浴锅 山东龙口市先科仪器公司。

1.3 方法

1.3.1 热风干燥特性

雪莲果经挑选、清洗、去皮等预处理后(下同),用不锈钢刀将其切分成厚度分别为2、4、6mm,之后将其立即放入0.5%亚硫酸钠溶液中护色5~10min,取出沥干后进行热风干燥。热风温度分别为55、70、85℃,每次处理取样品120g,每隔30min测定一次物料质量,直至含水率为(10±0.5)%为止。每次试验平行3次,结果取平均值。

1.3.2 微波干燥特性

雪莲果经预处理后,用不锈钢刀将其切分成厚度分别为2、4、6mm,之后将其立即放入0.5%的亚硫酸钠溶液中护色5~10min,取出沥干后进行微波干燥。微波质量比功率分别为1、2、3W/g,每隔2min测定一次物料质量,直至含水率为(10±0.5)%为止。每次试验平行3次,结果取平均值。

1.3.3 热风-微波联合干燥

采用先热风干燥后微波干燥的方式。以热风温度、转换点的物料含水率、微波质量比功率为因素,以色差(ΔE)、干燥总时间(t)作为指标,进行二次回归正交旋转组合试验设计,因素水平见表1。

表1 二次回归正交旋转组合试验因素水平编码

Table 1 Factors and their coded levels in quadratic regression orthogonal rotation composite design

水平	因素		
	X_1 热风温度/℃	X_2 转换点含水率/%	X_3 微波质量比功率/(W/g)
1.682	80.0	70.0	3.0
1	76.0	66.0	2.6
0	70.0	60.0	2.0
-1	64.1	54.1	1.4
-1.682	60.0	50.0	1.0

1.4 指标测定

1.4.1 含水率

常压干燥法^[13]。

1.4.2 干燥速率(D_R)^[14]

$$D_R = \frac{X_1 - X_2}{t_1 - t_2} \quad (1)$$

式中: D_R 为干燥速率/(kg/(kg·h)); X_1 为 t_1 时刻的干基含水率/(kg/kg); X_2 为 t_2 时刻的干基含水率/(kg/kg)。

1.4.3 复水比(R_R)

干制后的雪莲果片置于45℃恒温水浴中复水1h,之后取出用滤纸擦干表面水分,称量复水前后质量。

$$R_R = \frac{m_f}{m_g} \quad (2)$$

式中: R_R 为复水比; m_g 为干制后雪莲果片的质量/g; m_f 为复水后雪莲果片的质量/g。

1.4.4 收缩率(S_R)^[11]

$$S_R/\% = \frac{(V_2 - V_1) - (V_4 - V_3)}{V_2 - V_1} \times 100 \quad (3)$$

式中: S_R 为收缩率/%; V_1 为干燥前石英砂的体积/mL; V_2 为干燥前石英砂和样品的体积/mL; V_3 为干燥后石英砂的体积/mL; V_4 为干燥后石英砂和样品的体积/mL。

1.4.5 色泽测定^[14]

采用SC-80C型测色色差计测定(L^* 、 a^* 、 b^* 值)。

$$\Delta L = L_1^* - L_0^*; \Delta a = a_1^* - a_0^*; \Delta b = b_1^* - b_0^*$$

下标0和1分别指干燥前后的参数值。干燥前后分别随机抽取3片雪莲果片,测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值,结果取平均值。干燥前后色泽差异(ΔE)用以下公式表示:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (4)$$

1.5 统计分析

采用SPSS 13.0和MS EXCEL软件进行数据统计分析^[15]。

2 结果与分析

2.1 雪莲果热风干燥特性

2.1.1 热风干燥曲线

不同厚度样品在不同热风温度下的干燥曲线如图1所示。可以看出,样品含水率随干燥时间的延长而降低。样品厚度相同时,随着温度的升高,干燥时间显著缩短。如样品厚度为4mm,干燥时间为2h时,热风温度为55、70、85℃时,其含水率分别为4.41、1.74、1.08kg/kg。温度相同时,随着样品厚度越加,干燥时间延长。如热风温度70℃、干燥时间2h时,样品厚度为2、4、6mm,其含水率分别为0.40、1.74、2.93kg/kg。

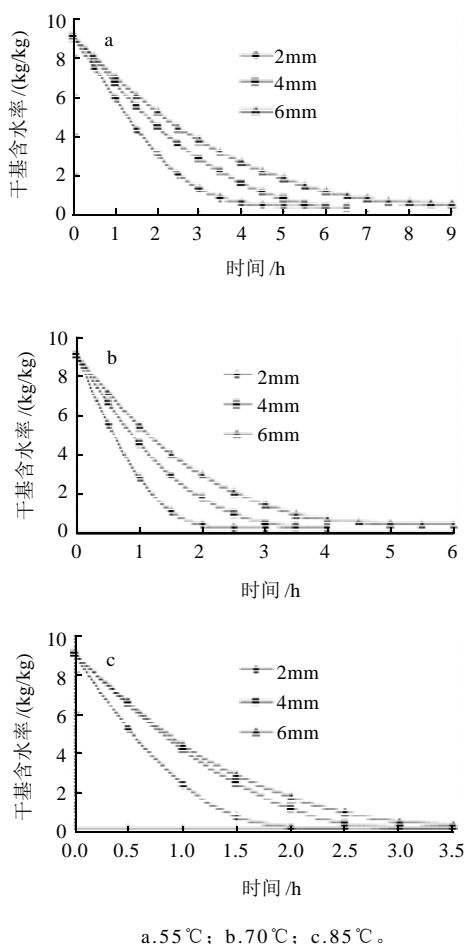


图1 不同温度下雪莲果热风干燥曲线

Fig.1 Effect of temperature on hot air drying curve of yacon

热风温度为55、75℃时,不同样品厚度所对应的曲线相差较大,说明此温度时样品厚度显著影响雪莲果的热风干燥速率;而热风温度为85℃时,样品厚度为2mm时的曲线与厚度为4mm和6mm时所对应的曲线相差较大,而后两者比较接近,说明此温度下与厚度为4、

6mm相比,厚度为2mm会显著影响雪莲果的热风干燥速率。

2.1.2 热风干燥速率曲线

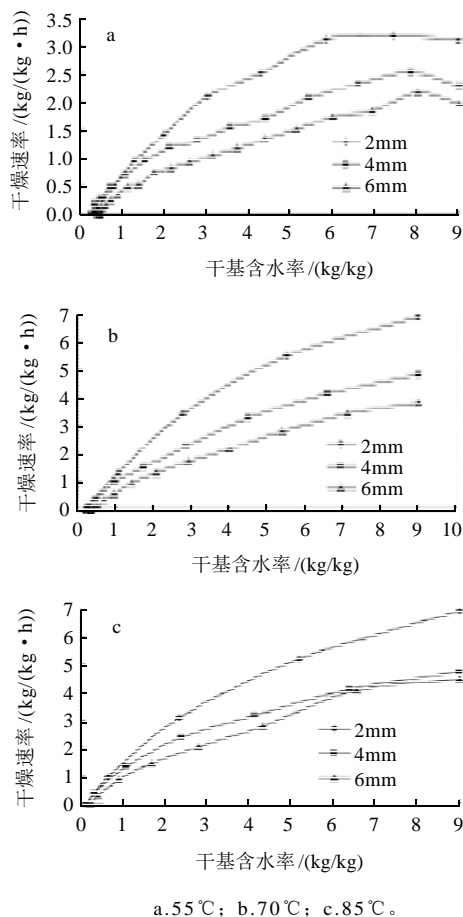


图2 不同温度下雪莲果热风干燥速率曲线

Fig.2 Effect of temperature on hot air drying rate curves of yacon

如图2所示,热风温度为55℃时,样品的干燥前期有一个加速阶段过程,这是由于干燥起始时温度较低,物料预热较慢,物料吸收的热量除用于蒸发水分外还有部分用于加热物料。预热后物料的干燥速率随含水率的降低而减小;热风温度为70、85℃时,物料的干燥速率随含水率的降低而减小。

样品厚度相同时,随着温度的升高,干燥速率加快。如样品厚度为4mm,热风温度为55、70、85℃,物料含水率为6.60kg/kg时,其干燥速率分别为2.32、4.17、4.26kg/(kg·h)。温度相同时,随着样品厚度越加,干燥速率降低。

热风温度为55、75℃时,不同样品厚度所对应的曲线相差较大,说明此温度时样品厚度显著影响雪莲果的热风干燥速率;而热风温度为85℃时,样品厚度为2mm时的曲线与厚度为4、6mm时所对应的曲线相差较大,而后两者比较接近,说明此温度下与厚度为4、

6mm 相比, 厚度为2mm 会显著影响雪莲果的热风干燥速率。

2.1.3 热风温度对 ΔE 、 R_R 和 S_R 影响

表2 热风温度对 ΔE 、 R_R 和 S_R 的影响

Table 2 Effect of hot air temperature on ΔE , R_R , and S_R

温度/℃	厚度/mm	ΔE	R_R	$S_R/\%$
55	2	21.56	4.53	88.75
	4	22.01	4.85	88.35
	6	29.07	3.80	86.60
70	2	20.02	5.47	89.50
	4	23.53	5.50	89.35
	6	31.10	4.72	89.60
85	2	26.23	6.68	89.85
	4	29.40	6.31	90.25
	6	30.24	5.19	90.00

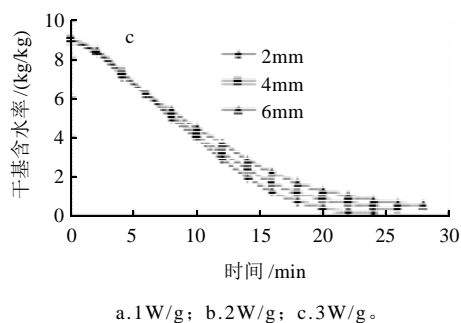
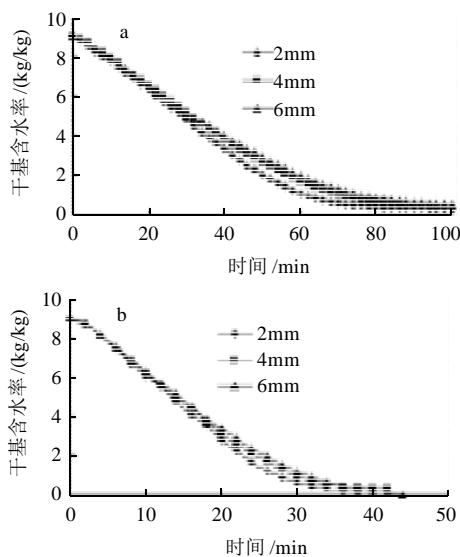
如表2所示, 相同温度下, 随着样品厚度的增加, ΔE 逐渐增加, 而样品厚度一定时, ΔE 随着热风温度升高而增加。随着温度的升高, R_R 呈增大趋势, 厚度为2、4mm 样品的 R_R 相差不大, 两者明显高于厚度6mm 样品的 R_R 。而 S_R 随温度和厚度变化不大。

通过对雪莲果热风干燥特性及品质变化研究, 得到雪莲果热风干燥最适工艺参数: 样品厚度为2~4mm, 热风温度70℃。因此在后续优化试验设计中选热风温度70℃为零水平。

2.2 雪莲果微波干燥特性

2.2.1 微波干燥曲线

如图3所示, 样品含水率随干燥时间的延长而降低。样品厚度相同时, 干燥时间随着微波质量比功率的增加显著缩短。微波质量比功率相同时, 干燥时间随着样品厚度越加变化不显著。

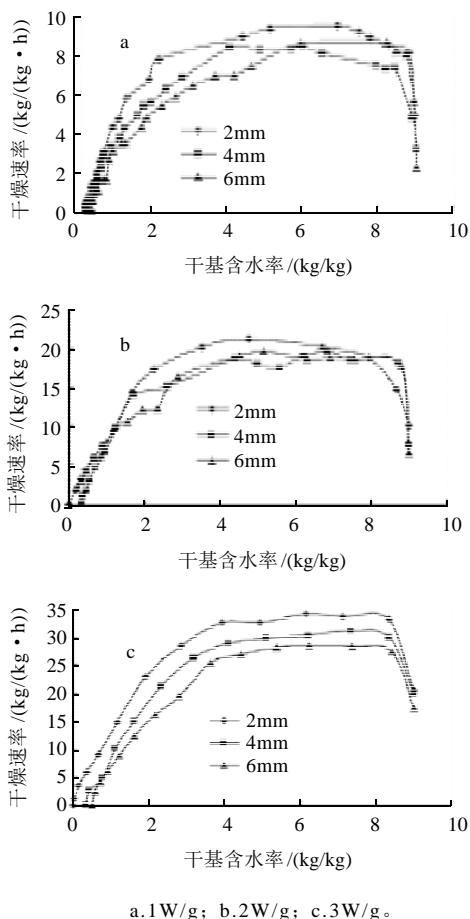


a. 1 W/g; b. 2 W/g; c. 3 W/g。

图3 不同微波质量比功率下雪莲果干燥曲线

Fig.3 Effect of microwave mass specific power on drying curves of yacon

2.2.2 微波干燥速率曲线



a. 1 W/g; b. 2 W/g; c. 3 W/g。

图4 不同微波质量比功率下雪莲果干燥速率曲线

Fig.4 Effect of microwave mass specific power on drying rate curves of yacon

如图4所示, 样品的干燥过程可近似分为加速、恒速和降速干燥3个阶段。干燥初期雪莲果片中的水分由升温到转化为水蒸汽排出需要一个过程, 干燥速率较低; 但微波干燥属于内部加热, 物料升温速度较快, 因此干燥速率迅速升高。干燥中期微波加热完全用于雪

莲果片水分的汽化,物料中的绝大部分水分在此期排出,干燥速率比较稳定;干燥后期,随着物料含水率不断降低,物料吸收微波能量降低,干燥速率也随之降低。

样品厚度相同时,随着微波质量比功率的增加,干燥速率加快。如样品厚度为4mm,微波质量比功率为1、2W/g和3W/g,物料含水率为6.20kg/kg时,其干燥速率分别为8.20、18.87、30.25kg/(kg·h)。微波质量比功率相同时,随着样品厚度越加,干燥速率略有下降。

2.2.3 微波功率对 ΔE 、 R_R 和 S_R 的影响

不同微波质量比功率和切片厚度对雪莲果 ΔE 、 R_R 和 S_R 的影响见表3。可以看出,微波质量比功率为1W/g和2W/g,厚度为4、6mm时,产品的 ΔE 相差不大,且小于厚度为2mm的样品。样品厚度一定时,微波质量比功率为3W/g时,产品的 ΔE 略大于1W/g与2W/g时产品的 ΔE ,而微波质量比功率为1W/g和2W/g时,产品 ΔE 差异不大。

微波质量比功率一定时, R_R 随样品厚度的增加而减小,厚度为2、4mm时,样品的 R_R 相差不大,且大于厚度为6mm的样品。样品厚度一定时,微波质量比功率为2W/g时所得 R_R 最大。

样品厚度为2、4mm时,不同微波质量比功率干燥所得产品的 S_R 相差不大,样品厚度为6mm时,随微波质量比功率的增大, S_R 呈减小趋势。

表3 微波质量比功率对 ΔE 、 R_R 和 S_R 的影响

Table 3 Effect of microwave mass specific power on ΔE , R_R , and S_R

微波质量比功率/(W/g)	厚度/mm	ΔE	R_R	$S_R/\%$
1	2	26.67	4.37	86.67
	4	24.09	4.27	83.33
	6	24.63	3.70	85.17
2	2	27.06	4.87	88.00
	4	23.61	4.57	80.83
	6	24.75	3.91	82.50
3	2	27.80	3.78	86.67
	4	25.04	3.75	81.67
	6	28.33	2.99	73.33

Zhang等^[5]报道微波干燥最大缺陷之一是加热过程中温度的不均匀性,从而导致产品品质不佳,而且微波功率超过500W时会产生放电现象。本实验结果和文献报道的结论基本一致,雪莲果片微波干燥时,由于干燥初期含水率高,吸收微波能多,产品极易出现破损现象,尤其是微波功率较高时,故微波干燥较适合用于联合干燥的中、后期干燥。通过对雪莲果微波干燥特性及品质变化研究,得到雪莲果微波干燥最适工艺参

数为样品厚度4mm、微波质量比功率2W/g。因此在后续优化试验设计中选微波质量比功率2W/g为零水平。

2.3 热风微波联合干燥

热风-微波联合干燥的试验结果见表4,回归方程系数见表5。

表4 试验方案及结果

Table 4 Quadratic regression orthogonal rotation composite design and corresponding experimental results

试验号	X_1	X_2	X_3	ΔE	t
1	-1	-1	-1	27.93	160
2	-1	-1	1	24.69	175
3	-1	1	-1	26.73	197
4	-1	1	1	23.97	212
5	1	-1	-1	32.20	188
6	1	-1	1	28.30	195
7	1	1	-1	29.83	218
8	1	1	1	25.59	225
9	-1.682	0	0	24.42	220
10	1.682	0	0	28.83	160
11	0	-1.682	0	26.89	138
12	0	1.682	0	25.52	175
13	0	0	-1.682	27.91	165
14	0	0	1.682	20.24	195
15	0	0	0	24.88	174
16	0	0	0	23.02	175
17	0	0	0	22.97	173
18	0	0	0	21.86	174
19	0	0	0	20.94	173
20	0	0	0	22.14	175
21	0	0	0	21.26	173
22	0	0	0	22.94	172
23	0	0	0	22.25	175

表5 回归方程系数

Table 5 Coefficients of the fitted quadratic regression models for total color change and drying time

回归系数		$Y_1(\Delta E)$	$Y_2(t)$
常数项	b_0	25.0135**	182.048**
	b_1	1.4657**	-13.393**
一次项	b_2	-0.6813	-14.367**
	b_3	-1.9799**	-6.916**
	b_{11}	1.7767**	10.031**
二次项	b_{22}	1.6281**	-0.073
	b_{33}	0.8699*	6.495**
	b_{12}	-0.3950	-0.050
交互项	b_{13}	-0.2675	0.057
	b_{23}	0.0175	0.066
R^2		0.867	0.818

注: b 为多项式系数;1=热风温度,2=转换点含水率,3=微波质量比功率。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

Y_1 、 Y_2 均通过 F 检验, $F > F_{0.01}$,回归方程显著,两方程在本试验中有意义,能够反映实际情况。失拟

检验均不显著,说明没有不可忽视因素存在对响应值产生影响,此回归方程足以反映试验中产品指标的变化。通过对 Y_1 、 Y_2 回归系数的检验可知,影响 ΔE 的主次顺序是 b_3b_1 (均极显著) b_2 ,影响 t 的主次顺序依次是 $b_2 > b_1 > b_3$ (均极显著)。

利用matlab7.0软件对 Y_1 、 Y_2 进行求解,得到: $X_1 = -0.319$, $X_2 = 0.166$, $X_3 = 1.088$ 时, $Y_{1\min} = 23.65$; $X_1 = 0.668$, $X_2 = 1.682$, $X_3 = 0.532$ 时, $Y_{2\min} = 151.57$ 。

干燥过程中产品色泽为首要考虑因素,其次是干燥时间。综合考虑,得到雪莲果热风-微波联合干燥工艺参数: $X_1 = -0.319$, $X_2 = 0.166$, $X_3 = 1.088$ 时,对应实际值:热风温度 68.1°C ,转换点含水率 61.0% ,微波质量比功率 2.6W/g 。对求得工艺参数进行试验验证,得到 $\Delta E = 21.53$,实测值和理论值无显著差异($P < 0.05$),产品干燥时间 $t = 172\text{min}$,复水比 $R_r = 4.12$,收缩率 $S_r = 84.35\%$ 。

3 结 论

3.1 雪莲果热风干燥最适工艺参数:样品厚度 $2 \sim 4\text{mm}$,热风温度 70°C 。雪莲果微波干燥最适工艺参数:样品厚度为 4mm ,微波质量比功率为 2W/g 。

3.2 影响 ΔE 的主次顺序依次为微波质量比功率、热风温度、转换点含水率;影响干燥时间的主次顺序依次为转换点含水率、热风温度、微波质量比功率。

3.3 雪莲果热风-微波联合干燥的最适工艺参数组合为热风温度 68.1°C ,转换点含水率 61.0% ,微波质量比功率 2.6W/g 。

参考文献:

- [1] 钱林,丁长河,李里特,等.雪莲果的化学组分及其功能特性[J].食品研究与开发,2006,27(6):179-180.
- [2] 李卓亚.雪莲果化学成分及其药理研究的进展[J].食品与药品,2007,9(6):41-43.
- [3] CHUA K J, MUJUMDAR A S, CHOU S K, et al. Convective drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change[J]. Drying Technology, 2000, 18 (4/5): 907-936.
- [4] 张慙,徐艳阳,孙金才.国内外果蔬联合干燥的研究进展[J].无锡轻工大学学报,2003,22(6):103-106.
- [5] ZHANG Min, TANG Juming, MUJUMDAR A S, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science and Technology, 2006, 17(10): 524-534.
- [6] 徐艳阳,张慙,陈亦辉,等.热风 and 微波真空联合干燥甘蓝试验[J].无锡轻工大学学报,2003,22(6):64-66;95.
- [7] 罗树灿,李远志,彭伟春,等.热风 and 微波结合干燥荔枝加工工艺研究[J].现代食品科技,2006,22(3):10-14.
- [8] VARITH J, DIJANARUKKUL P, ACHARIYAVIRIYA A, et al. Combined microwave-hot air drying of peeled longan[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 459-468.
- [9] 马先英,林艾光,牟晨晓.用热风与微波组合干燥胡萝卜的工艺[J].大连水产学院学报,2007,22(2):129-132.
- [10] 关熔,廖兰,曾庆孝,等.热风微波干燥龙眼肉工艺的优化[J].食品与发酵工业,2008,34(8):86-90.
- [11] 段振华,蒋李娜,郑元平,等.罗非鱼片的热风微波复合干燥特性[J].食品科学,2008,29(9):203-206.
- [12] 张慙.生鲜食品保质干燥新技术理论与实践[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [13] 宁正祥.食品成分分析手册[M].北京:中国轻工业出版社,1998.
- [14] 石启龙,薛长湖,赵亚,等.热泵变温干燥对竹荚鱼干燥特性及色泽影响[J].农业机械学报,2008,39(4):83-86.
- [15] 王颖.试验设计与SPSS应用[M].北京:化学工业出版社,2007.