

# 高湿预处理对怀山药热风干燥特性及复水性的影响

## Effect of high humidity preconditioning on hot air drying and its rehydration of Chinese yam

陆学中<sup>1</sup> 刘亚男<sup>2</sup> 张德榜<sup>1</sup>

LU Xue-zhong<sup>1</sup> LIU Ya-nan<sup>2</sup> ZHANG De-bang<sup>1</sup>

郭桂霞<sup>1</sup> 李衡<sup>1</sup> 任广跃<sup>2,3</sup>

GUO Gui-xia<sup>1</sup> LI Heng<sup>1</sup> REN Guang-yue<sup>2,3</sup>

(1. 郑州万谷机械有限公司, 河南 郑州 450041; 2. 河南科技大学 食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;  
3. 食品加工与安全国家实验教学示范中心, 河南 洛阳 471023)

(1. Zhengzhou Wanggu Machinery Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450041, China; 2. College of Food and Biological Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center of Food Processing and Food Safety, Luoyang 471023, China)

**摘要:** 怀山药片经高湿预处理后进行热风干燥, 研究相对湿度、处理时间等因素对怀山药片热风干燥特性和复水特性的影响规律, 进而获取最佳的怀山药切片热风干燥工艺参数。结果表明: 与直接热风干燥处理相比, 控制较高的相对湿度可显著缩短干燥时间, 而且干燥产品的复水性也优于直接热风干燥处理; 切片厚度为 3 mm 的物料在恒湿(相对湿度 40%)条件下处理 30 min 后, 进行热风干燥处理(风温 60 °C、风速 3.5 m/s)时, 干燥能耗最低(19 056 kJ/kg · H<sub>2</sub>O); 该条件下得到的怀山药片的  $\Delta E$  值和多糖含量分别为 8.17%、5.14%, 而直接热风干燥怀山药片的分别为 12.35%、4.96%。

**关键词:** 相对湿度; 怀山药; 热风干燥; 干燥特性; 复水性; 能耗

**Abstract:** The effect of the drying properties on hot air drying by relative humidity control of Chinese yam was studied. The test material was treated with high humidity after the hot air drying, and factors on the drying characteristics and rehydration characteristics were investigated, including the treatment time of humidity, slice thickness, drying temperature, and drying air velocity. The L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) orthogonal test was used to get the best drying process parameters on energy consumption, the content of polysaccharide and the color of two kind of yam (prepared by the best drying process parameters on

energy consumption and hot air drying without relative humidity) were determined. The results showed that, compared with direct hot air drying, high relative humidity control could not only greatly shorten the drying time, but also improve the rehydration characteristics. Moreover, the energy consumption was the minimum of 19 056 kJ/kg · H<sub>2</sub>O when material under the conditions of constant temperature and humidity (Slice thickness of 3 mm, temperature of 60 °C, relative humidity 40%, treat time 30 min), hot air drying treatment (air temperature of 60 °C, air velocity of 3.5 m/s). Under this condition the  $\Delta E$  value of yam chip and polysaccharide content were 8.17% and 5.14%, respectively, while those of directly hot-drying were 12.35% and 4.96%.

**Keywords:** relative humidity; Chinese yam; hot air drying; drying characteristics; rehydration; energy consumption

近年来, 热风干燥广泛用于食品干燥<sup>[1]</sup>, 其技术研究正朝着短时、低耗、减排、优质的趋势发展。干燥物料营养物质的衰退程度取决于其脱水速度的快慢, 即达到安全含水率<sup>[2]</sup>时所需要的时间。大量研究表明, 热风干燥温度、物料切片厚度和热风风速对干燥速率有显著影响<sup>[3-5]</sup>, 而湿度对干燥影响的研究并不多见, 有研究<sup>[6-8]</sup>表明, 干燥速率随干燥介质湿度的降低而增大, 干燥时间随相对湿度的降低而缩短。此外, 控制物料的相对湿度(Relative Humidity, RH), 能使物料升温速度加快, 促进其内部水分子的迁移<sup>[9]</sup>。先对物料进行较高湿度的预处理, 再降低干燥介质湿度, 使物料中心到表面的温湿度梯度一致<sup>[10]</sup>, 能增大干燥速率, 并减少物料表面结壳现象, 从而缩短干燥时间<sup>[11-12]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(编号:31671907); 河南省高校科技创新团队支持计划资助(编号:16IRTSTHN009)

**作者简介:** 陆学中, 男, 郑州万谷机械股份有限公司工程师, 本科。

**通信作者:** 任广跃(1971—), 男, 河南科技大学教授, 博士。

E-mail: guangyueyao@163.com

**收稿日期:** 2017-05-09

目前,相对湿度对怀山药干燥影响的研究尚属空白,本研究拟在较高相对湿度环境下,对怀山药进行高湿处理后,研究其相对湿度控制对热风干燥特性的影响,并优化热风干燥的工艺参数,为怀山药干制品的制备提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

怀山药:初始湿基含水率 73.56%,购于河南省洛阳市丹尼斯百货超市。

### 1.2 仪器与设备

电子天平:JA-B/N 系列,上海佑科仪表有限公司;  
电热鼓风干燥箱:101 型,北京科伟永兴仪器有限公司;  
热泵干燥机:GHRH-20 型,广东省农业机械研究所干燥设备制造厂;

切片机:SHQ-1 型,德州市天马粮油机械有限公司;

恒温恒湿箱:HSP-150B 型,常州市万丰仪器制造有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 热风干燥工艺要点 将洁净怀山药切成厚度均匀的片状平铺于干燥网上,放入已设定湿度的恒温恒湿箱中进行高湿处理,再进行热风干燥处理。干燥过程中,定时快速取出称重,记录试样随干燥时间质量的变化,直至干基含水率达到安全含水率 0.12 g/g 时,干燥结束;做 3 次重复试验,取平均值,换算成干基含水率。

#### 1.3.2 怀山药片热风干燥特性影响的单因素试验

(1) 相对湿度:固定切片厚度 4 mm,恒湿时间 30 min,热风温度 60 °C,热风风速 3.5 m/s,分别考察 30%,40%,50%,60% RH 对怀山药片干燥特性及复水特性的影响。

(2) 恒湿时间:固定切片厚度 4 mm,相对湿度 50%,热风温度 60 °C,热风风速 3.5 m/s,分别考察恒温恒湿时间 0,30,60,90,120 min 对怀山药片干燥特性及复水特性的影响。

(3) 热风温度:固定切片厚度 4 mm,于 50% RH 处理 30 min,热风风速 3.5 m/s,分别考察热风温度 40,50,60,70,80 °C 对怀山药片干燥特性及复水特性的影响。

(4) 切片厚度:固定热风温度 60 °C,于 50% RH 处理 30 min,热风风速 3.5 m/s,分别考察切片厚度 2,3,4,5,6 mm 对怀山药片干燥特性及复水特性的影响。

(5) 热风风速:固定切片厚度 4 mm,于 50% RH 处理 30 min,热风温度 60 °C,分别考察热风风速 1.5,2.0,2.5,3.0,3.5 m/s 对怀山药片干燥特性及复水特性的影响。

#### 1.3.3 指标测定

(1) 怀山药含水率的测定:按 GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》的减压干燥法执行。

(2) 干基含水率的测定:参照文献[13]。

(3) 怀山药干制品复水性能的测定:参照文献[14]。

(4) 干燥能耗:本研究的干燥能耗以每干燥一个单位质量水分的耗能计,分别按式(1)、(2)计算干燥过程的总脱水量和干燥能耗<sup>[15]</sup>。

$$m_1 = m \times \frac{C_1 - C_2}{1 - C_1} \quad (1)$$

式中:

$m_1$ ——脱水质量,kg;

$m$ ——干品质量,kg;

$C_1$ ——初始水分含量,%;

$C_2$ ——最终水分含量,%。

$$N = \frac{3\,600 \times P \times t}{m_1} \quad (2)$$

式中:

$N$ ——干燥能耗,kJ/kg·H<sub>2</sub>O;

$P$ ——功率,kW;

$t$ ——时间,h;

$m_1$ ——脱水质量,kg。

(5) 色差的测定:色差是根据均匀色空间理论用色差仪进行测定的<sup>[16]</sup>,色差值表示被测样品色泽与标准样品色泽之间总色差的大小,值越小越好,每个试验样品选择不同角度测 3 次,取其平均值,按式(3)计算色差。

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \quad (3)$$

式中:

$\Delta E$ ——色差值;

$\Delta L$ ——偏向黑白值;

$\Delta a$ ——偏向红绿值;

$\Delta b$ ——偏向黄蓝值。

(8) 多糖的测定:采用水提醇沉法提取怀山药多糖,采用苯酚—硫酸比色法测定多糖含量<sup>[17]</sup>。

1.3.4 统计分析 采用 Origin 8.5 和 DPS(ver.8.05) 数据处理软件对试验数据进行处理和方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 怀山药片热风干燥特性影响的单因素试验结果

2.1.1 相对湿度对怀山药片热风干燥特性和复水特性的影响 由图 1 可知:相对湿度对减少热风干燥时间影响很大,30%~60% RH 时,干燥时间明显低于直接热风干燥,可能是高湿作为一种热风干燥前的预处理方法,可加速物料内部水分子的迁移运动,使其中心和表面的温湿度趋于接近,然后降低介质湿度,使湿物料中心至表面的温湿度梯度一致,从而加速干燥,减少干燥时间,与 Kaya 等<sup>[18]</sup>的研究结论相符合。相对湿度为 30% 时,干燥时间较长为 9 h,可能是在该试验条件下物料水分尚未分布均匀,导致干燥时间偏长,而 60% RH 与热风干燥箱内湿度差较大,使物料表面快速蒸发导致表面稍微结壳,阻碍水分迁移,但在 40%~60% RH 条件下处理、干燥 4 h 时,干基含水率基本接近 0.12 g/g,即干燥时间总体差别不大。

直接热风干燥的复水性最差,其次是 30% RH,复水比在 40%~60% RH 时随相对湿度的增加而降低,可能与干燥时间相关,干燥的时间越长,复水性就越差<sup>[13]</sup>,但总体差异不大。

综上:相对湿度宜控制在 40%。

2.1.2 恒湿时间对怀山药片热风干燥特性和复水特性的影响 由图 2 可知:恒湿时间对怀山药片热风干燥有很大的影响,直接热风干燥,怀山药片达到安全含水率的时间约为

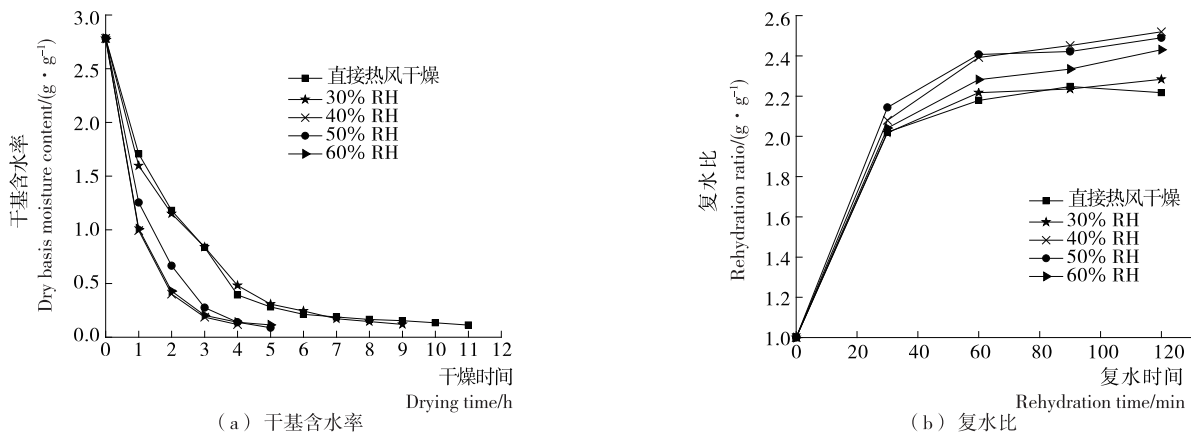


图 1 不同相对湿度下的干燥曲线和复水曲线

Figure 1 The drying and rehydration characteristics curve under different relative humidity

12 h。但也不是恒湿时间越长越好,50% RH 保持 30 min 和 60 min 时,干燥时间均为 5 h,可能是恒湿 30 min 时,物料已充分预热,内部水分梯度和温度梯度相一致,当降湿后干燥速率增加,当 50% RH 保持 90 min 和 120 min 后降湿,干燥速率也很大,但保持时间越长,总干燥时间越长。因此在干燥前期,物料被预热到湿球温度且稳定后,降低干燥介质的相对湿度有利于缩短干燥时间,提高干燥效率<sup>[19]</sup>。

恒湿时间在 30~120 min 时,复水性随时间的增加而降低,直接热风干燥的复水性最差,可能也与干燥时间相关,直接热风干燥的干燥时间最长,复水性最差,而恒湿时间控制 30 min 的干燥时间最短,复水性最好,恒湿时间 60~120 min 的复水性较为接近。

综上:恒湿处理时间宜控制在 30 min。

2.1.3 热风温度对怀山药片热风干燥特性和复水特性的影响 由图 3 可知:热风 60 °C 时,干燥时间最短为 5 h,可能是厚度一致,温度越高,物料水分蒸发速度越快,表面易硬化,从而阻碍水分的散发,而温度太低,水分蒸发速度减慢,干燥时间长。

总体上,复水性随热风温度的升高而降低,可能是随热风温度升高,淀粉类物料在较高温度下发生变化,而使亲水

性下降<sup>[12]</sup>,而热风温度 40 °C 时,物料干燥时间较长,复水性下降<sup>[20-21]</sup>。

综上:选取的热风温度范围为 50~70 °C。

2.1.4 切片厚度对怀山药片热风干燥特性和复水特性的影响 由图 4 可知:2 mm 厚度的干燥时间最短为 5 h,是因为物料切片较薄,水分蒸发快,但皱缩比较厉害;物料厚度在 3~6 mm 时,干燥时间分别为 7,6,8,8 h,可能是物料由较高湿度环境换入低湿环境,物料内部的水分蒸发速度加快,干燥速率也快,而较薄的物料易表面硬化,降低水分蒸发速度,因此,物料厚度 4 mm 较为理想。

复水性与物料细胞及结构的破坏程度有关<sup>[22]</sup>。2 mm 厚度的怀山药片复水性最好,且在 30 min 时复水就基本完全,这主要是因为 2 mm 怀山药片厚度很薄,能很快吸水复原,而 5,6 mm 厚度怀山药片的复水性优于 3,4 mm 的。这是因为物料稍薄,在干燥过程中形成硬壳,致使结构紧密,复水性下降。

综上:选择怀山药的切片厚度为 3~5 mm。

2.1.5 热风风速对怀山药片热风干燥特性和复水特性的影响 由图 5 可知:在热风风速 1.5~3.5 m/s 时,干燥时间随风速的增大而减小,这是因为空气流速的加快降低了怀山药片表面的水蒸气分压,从而加快表面水分传递的速度<sup>[23]</sup>,减

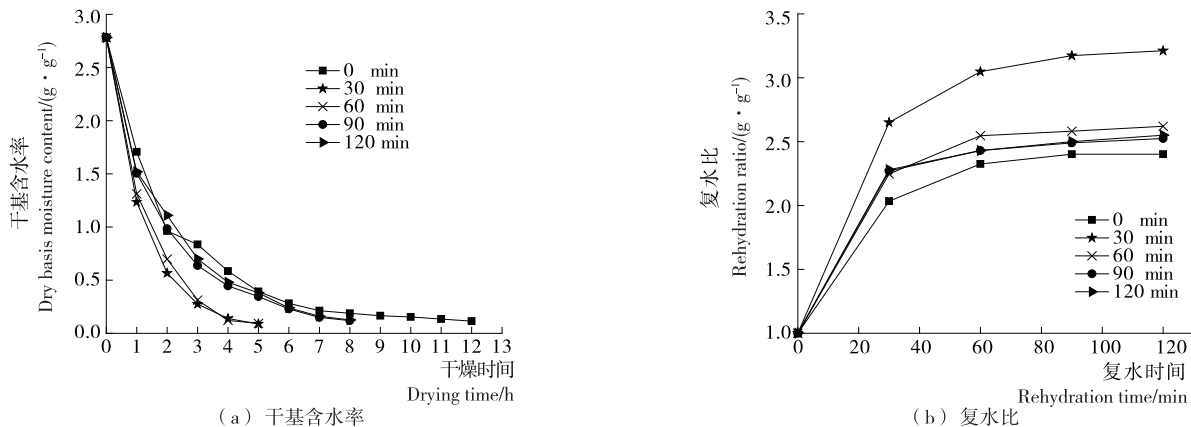


图 2 不同恒湿时间下的干燥曲线和复水曲线

Figure 2 The drying and rehydration characteristics curve under different time of constant temperature and humidity

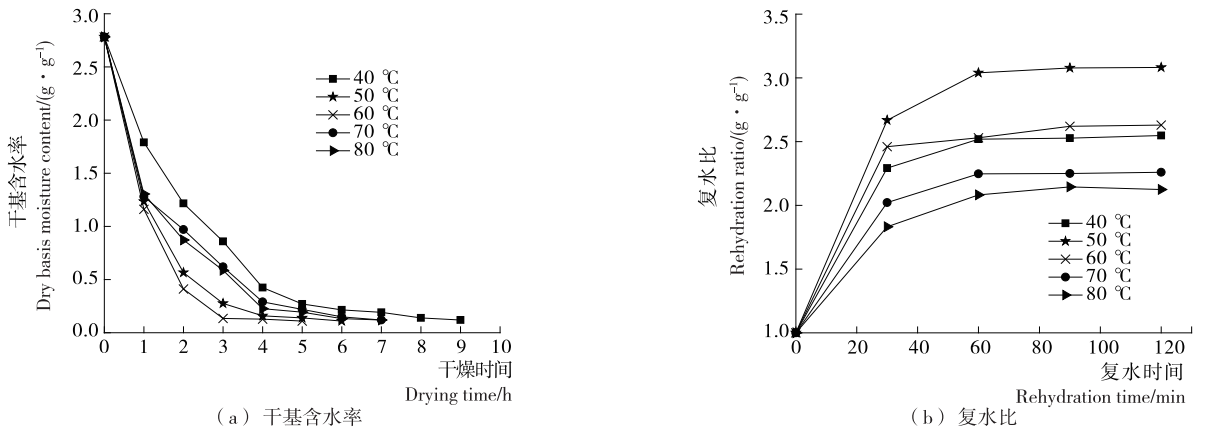


图3 不同热风温度下的干燥曲线和复水曲线

Figure 3 The drying and rehydration characteristics curve under different temperature of hot air drying

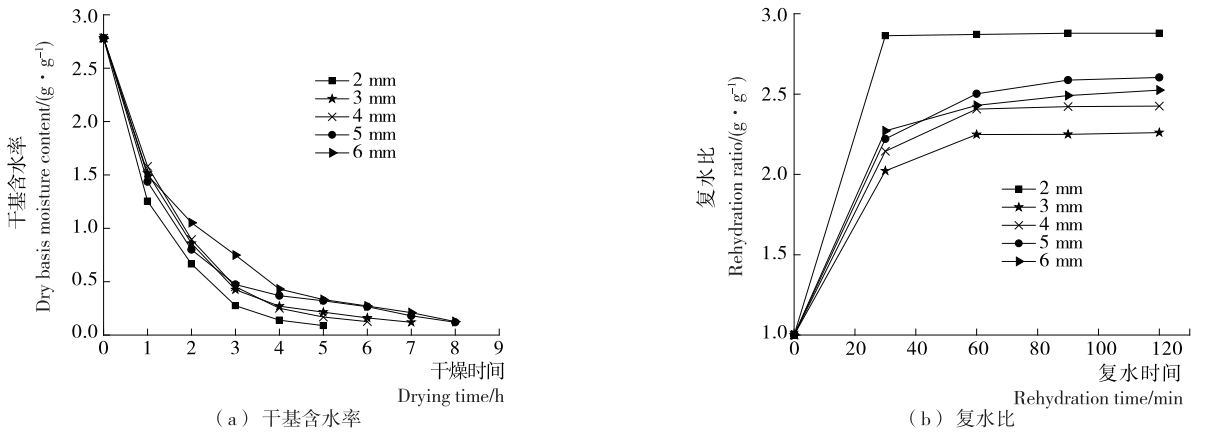


图4 不同切片厚度下的干燥曲线和复水曲线

Figure 4 The drying and rehydration characteristics curve under different thickness of Chinese yam slice

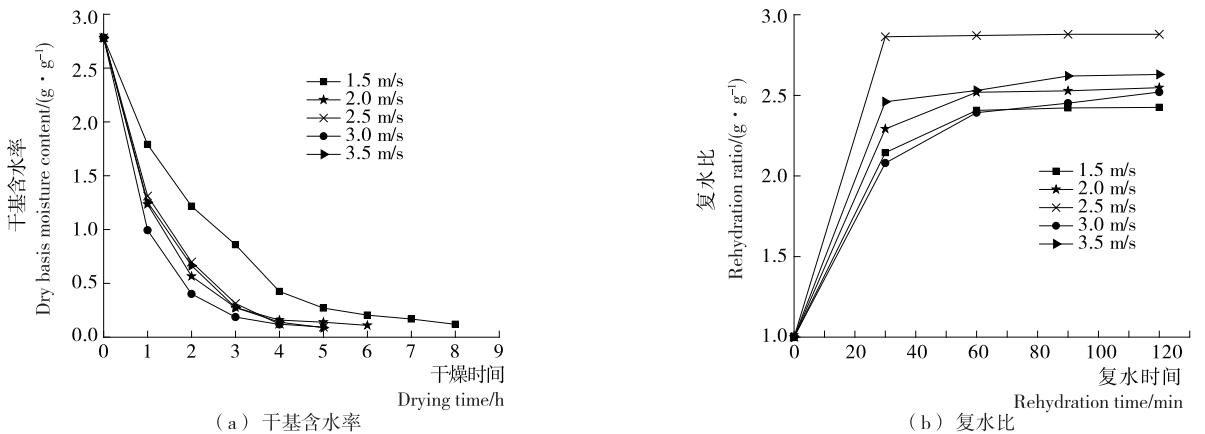


图5 不同风速下的干燥曲线和复水曲线

Figure 5 The drying and rehydration characteristics curve under different drying air velocity

少干燥时间。

复水比随热风干燥速度的增大呈现先增大后减小的趋势,可能是在一定的速度范围内,温度一定,速度越小,致使水分的迁移速度变缓,进而降低表面水分,而干燥速度继续增大,水分蒸发强度增大,导致复水性下降<sup>[24]</sup>。

综上:选择的热风干燥风速为2.5~3.5 m/s。

### 2.2 怀山药片热风干燥的正交试验结果

根据单因素试验结果,选取相对温度为40%,恒温恒湿

处理时间为30 min,以怀山药片干燥能耗为试验指标,选取热风温度、切片厚度和热风风速为影响因素,采用L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验方法进行工艺优化,具体试验因素与水平见表1,试验结果与极差分析见表2,方差分析见表3。

由表2、3可知:各因素对指标影响主次为热风温度>热风风速>切片厚度,各因素对干燥能耗具有一定显著性,其中:热风温度在 $\alpha=0.05$ 水平下显著,切片厚度和热风风速在 $\alpha=0.1$ 水平下显著;最佳工艺参数为A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>,即切片厚

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	A 热风温度/℃	B 切片厚度/mm	C 热风风速/(m·s <sup>-1</sup> )
1	50	3	2.5
2	60	4	3.0
3	70	5	3.5

表 2 正交试验结果与极差分析

Table 2 The result and range analysis of orthogonal test

试验号	A	B	C	空列	干燥能耗/ (kJ·kg <sup>-1</sup> ·H <sub>2</sub> O)
1	1	1	1	1	37 856
2	1	2	2	2	35 263
3	1	3	3	3	36 559
4	2	1	3	2	19 056
5	2	2	1	3	19 098
6	2	3	2	1	28 986
7	3	1	2	3	21 834
8	3	2	3	1	25 723
9	3	3	1	2	27 572
-----					
k <sub>1</sub>	36 559.33	26 248.67	30 855	28 175.33	
k <sub>2</sub>	22 380.00	26 694.67	27 297	28 694.33	
k <sub>3</sub>	25 043.00	31 039.00	25 830.33	27 112.67	
R	14 179.33	4 790.33	5 024.67	1 581.67	

表 3 正交试验方差分析表<sup>†</sup>

Table 3 The variance analysis of orthogonal test

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著水平
A	340 770 996.2	2	170 385 498.1	87.370 7	$\alpha=0.05$
B	42 019 441.56	2	21 009 720.78	10.773 4	$\alpha=0.1$
C	40 057 750.22	2	20 028 875.11	10.270 5	$\alpha=0.1$
-----					
误差 e	3 900 290.889	2	1 950 145.444		
总和	426 748 478.9	8			

<sup>†</sup>  $F_{0.01(2,2)}=99.01, F_{0.05(2,2)}=19, F_{0.1(2,2)}=9$ 。

度为 3 mm 的物料在恒湿(相对湿度 40%)条件下处理 30 min 后,进行热风干燥(热风温度 60℃、切片厚度为 3 mm、热风风速 3.5 m/s),此条件下干燥能耗最小(19 056 kJ/kg·H<sub>2</sub>O),得到的怀山药片的  $\Delta E$  值和多糖含量分别为 8.17%、5.14%,均优于直接热风干燥的( $\Delta E$  值和多糖含量分别为 12.35%、4.96%)。

### 3 结论

通过相对湿度对怀山药干燥影响的研究,在恒湿条件(相对湿度 40%)下,获取了最佳的干燥参数:热风温度 60℃、切片厚度 3 mm、热风风速 3.5 m/s,该条件下干燥能耗最小且得到的怀山药片的  $\Delta E$  值和多糖含量均优于直接热风干燥的。

相对湿度控制对减少怀山药热风干燥时间,提高热风干燥品质有很大的影响,它能使物料快速预热,降低湿度后,加

快水分蒸发,从而加快干燥速率,干燥时间比直接热风干燥缩短了将近 1/2,且比热风干燥品质有所提高,符合现在干燥的发展方向,可为怀山药热风有效干燥提供新的思路。

### 参考文献

- [1] 毕金峰,陈芹芹,刘璇,等.国内外果蔬粉加工技术与产业现状及展望[J].中国食品学报,2013,13(3):8-12.
- [2] LUO Qiong, CAI Yi-zhong, YAN Jun, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic effects and antioxidant activity of fruit extracts from Lycium barbarum [J]. Life Sciences, 2004, 76(2): 137-149.
- [3] 王文明,陈红意,赵满全.提高紫花苜蓿热风干燥品质的工艺参数优化[J].农业工程学报,2015,31(Z1):337-345.
- [4] 张卫鹏,肖红伟,高振江,等.中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质[J].农业工程学报,2015,31(10):269-276.
- [5] 张绪坤,姚斌,吴起,等.用傅里叶数与优化法分析污泥过蒸汽干燥有效扩散系数[J].农业工程学报,2015,31(6):230-237.
- [6] DUC L A, HAN J W, KEUM D H. Thin layer drying characteristics of rapeseed (Brassica napus L)[J]. Journal of Stored Products Research, 2011, 47(1): 32-38.
- [7] ZLATANOVIC I, KOMATINA M, ANTONIJEVIC D. Low-temperature convective drying of apple cubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(1): 114-123.
- [8] DONADON J R, RESENDE O, TEIXEIRA S D P, et al. Effect of hot air drying on ultrastructure of crambe seeds[J]. Drying Technology, 2013, 31(3): 269-276.
- [9] BARATI E, ESFAHANI J. A new solution approach for simultaneous heat and mass transfer during convective drying of mango [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 102(4): 302-309.
- [10] JU Hao-yu, EI-MASHAD H, FANG Xiao-ming, et al. Drying characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions[J]. Drying Technology, 2016, 34(3): 296-306.
- [11] 王庆惠,李忠新,杨劲松,等.圣女果分段式变温变湿热风干燥特性[J].农业工程学报,2014,30(3):271-276.
- [12] DAI Jian-wu, RAO Jun-quan, WANG Dong, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves[J]. Drying Technology, 2015, 33(12): 365-376.
- [13] 吴锦铸,胡卓炎,何松,等.干制工艺对胡萝卜复水性的影响[J].食品科学,1998(12):23-27.
- [14] 钱革兰,张琦,崔政伟.真空微波和冷冻干燥组合降低胡萝卜片的干燥能耗[J].农业工程学报,2011,27(6):387-392.
- [15] 冯寅洁,石芳荣,应铁进.加工工艺和复水条件对脱水胡萝卜复水性的影响[J].中国食品学报,2009,9(4):149-154.
- [16] NASTAJ J F, WITLIEWICZ K. Mathematical modeling of the primary and secondary vacuum freeze drying of random solids at microwave heating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(21/22): 4 796-4 806.

(下转第 183 页)

$\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  不稳定,在银杏叶色素生产和应用过程中应尽量避免与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  接触;70 °C 以上温度会促进银杏叶色素分解,在制备和贮存银杏叶色素时应尽量避免长时间处于 70 °C 以上的高温;银杏叶色素对日光和室内光均不稳定,宜避光保存。银杏叶色素可以作为一种良好的天然食用色素进行开发利用。

### 参考文献

- [1] STROMGAARD K, NAKANISHIK. Chemistry and biology of terpenes trilactones from *Ginkgo biloba* [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2004, 43(13): 1 640-1 658.
- [2] LIN Xiao-han, ZHANG Jin, LI Ying, et al. Functional genomics of a living fossil tree, *Ginkgo*, based on next-generation sequencing technology [J]. *Physiologia Plantarum*, 2011, 143 (3): 207-218.
- [3] 池静端,徐礼,马辰.银杏叶的化学成分研究[J].*中国中药杂志*, 1997, 22(2): 105-107.
- [4] 杨静峰,张旭,梁忠岩.银杏叶水溶性多糖的分离、纯化、初步鉴定及活性研究[J].*特产研究*, 2006, 28(4): 51-53.
- [5] BEEK T A V, SCHEEREN H A, MELGERW C, et al. Determination of ginkgolides and bilobalide in *Ginkgo biloba* leaves and phytopharmaceuticals [J]. *Journal of Chromatography A*, 1991, 543: 375-387.
- [6] 刘咏,陈莉.银杏叶中绿色素的组成及稳定性研究[J].*食品科技*, 2007, 33(6): 174-176.
- [7] 文亦夫,向小奇,刘旋,等.银杏叶黄色素提取及稳定性研究[J].*食品科学*, 2010, 31(8): 43-45.
- [8] 赵磊,张玲珑,裴付宇,等.银杏叶黄色素对大麻/桑皮/羊毛混纺纱的染色性能[J].*毛纺科技*, 2015, 43(3): 33-36.
- [9] 许海棠,廖艳娟,欧小辉,等.密蒙花黄色素的提取及其稳定性研究[J].*食品与发酵工业*, 2015, 41(6): 218-222.
- [10] 崔荣健,岳鹏.辣椒红素超声波辅助提取工艺的研究与优化[J].*食品研究与开发*, 2010, 31(12): 48-50.
- [11] 王芳,张庆庆,乔璐,等.响应面法优化乌饭叶色素提取工艺[J].*山西农业科学*, 2014, 42(8): 917-920.
- [12] 黄昕蕾,李晓东,孙国峰,等.萱草花色素的超声波辅助提取及其稳定性研究[J].*山西农业科学*, 2013, 41(5): 440-445.
- [13] 罗璇,何景.超声辅助提取花生红衣色素工艺的优化[J].*食品与机械*, 2016, 32(9): 172-176.
- [14] 张瑞,邢军,毛居代·阿尔买买提,等.红苋菜天然红色素的提取及其稳定性[J].*食品与发酵工业*, 2013, 39(1): 208-214.
- [15] 杨萍,牛春艳.响应面法优化紫色甘薯茎、叶色素提取工艺[J].*食品科学*, 2010, 31(12): 148-152.
- [16] 杨钰钦,吴赞敏,任崇玲,等.辣椒红色素的提取、乳化及对牛奶蛋白复合纤维的染色[J].*毛纺科技*, 2010, 38(6): 24-29.
- [17] 张娜,魏龙,蒋彩飞,等.莴笋叶色素稳定性研究[J].*中国食品添加剂*, 2016(12): 94-98.
- [18] PATRAS A, BRUNTON N P, O'DONNELL C, et al. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods, mechanisms and kinetics of degradation [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(1): 3-11.
- [19] 崔福顺,金清,李铨军,等.兴安杜鹃花色素提取及理化性质研究[J].*食品与机械*, 2011, 27(4): 61-64.
- [20] 王芳,张庆庆,赵森妙,等.乌饭叶色素的稳定性研究[J].*湖南农业科学*, 2014(15): 56-59.
- [21] 杨萍.紫色甘薯茎叶色素理化性质研究[J].*东北农业大学学报*, 2010, 41(7): 113-117.
- [22] 章斌,侯小桢,郭丽莎.山竹壳色素稳定性研究[J].*食品与机械*, 2011, 27(3): 35-37.
- [21] 吴中华,李文丽,赵丽娟,等.枸杞分段式变温热风干燥特性及干燥品质[J].*农业工程学报*, 2015, 31(11): 287-293.
- [22] 陈健凯,林河通,林艺芬,等.基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J].*农业工程学报*, 2014, 30(3): 277-284.
- [23] 李晖,任广跃,段续,等.热泵干燥怀山药片的工艺研究[J].*干燥技术与设备*, 2013(6): 36-41.
- [24] 张涛,赵士杰,冉雪.生姜热风干燥试验研究[J].*农机化研究*, 2014(4): 160-162.
- [19] 王艳,胡一鸿,陈秋志.玉竹糖蛋白分离纯化及其体外抗氧化能力[J].*食品科学*, 2015, 36(2): 52-56.
- [20] 程旺开,汤强,许月明,等.超声波辅助乙醇提取黄秋葵果渣多酚的工艺优化[J].*食品与机械*, 2016, 32(4): 192-196.
- [21] 马永强,荆丽荣,刘晓飞.双水相超声波法辅助提取甜玉米芯多酚及抑菌性研究[J].*食品科学*, 2013, 34(24): 61-64.
- [22] 陶阿丽,余大群.响应面曲线法优化超声辅助茶多酚提取工艺研究[J].*长江大学学报:自然科学版*, 2014, 11(23): 60-64.
- [23] ROSTAMI H, GHARIBZAHEDI S M T. Microwave-assisted extraction of jujube polysaccharide: Optimization, purification and functional characterization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 143: 100-101.

(上接第 151 页)

- [17] 孙仕玲.山药多糖含量的测定方法研究[J].*农业与技术*, 2007, 30(3): 35-39.
- [18] KAYA A, AYDIN O, DEMIRTAS C. Drying kinetics of red delicious apple [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 96(4): 517-524.
- [19] 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等.干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J].*农业工程学报*, 2015, 31(16): 296-304.
- [20] 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].*大连海洋大学学报*, 2006, 21(2): 158-161.

(上接第 166 页)

- [14] 陈钢,李栋林,史建鑫,等.响应面法优化超声耦合双水相体系提取茶多酚工艺[J].*食品科学*, 2016, 37(6): 95-100.
- [15] LI Da-gang, YUAN Fu-fang, CHEN Ru-pan, et al. The extraction of polyphenols from tea leaves based on mechanochemical methodology and aqueous two-phase system [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 834-836: 508-514.
- [16] 欧阳玉祝,张辞海,薛慧.超声协同双水相体系提取路边青总多酚工艺[J].*食品科学*, 2011, 32(16): 89-92.
- [17] 马艺丹,刘红,廖小伟.神秘果种子多酚超声双水相复合提取工艺及其抗氧化活性[J].*食品与机械*, 2015, 31(6): 173-178.
- [18] 张艳霞,朱彩平,邓红.超声辅助双水相提取石榴皮多酚[J].*食品与发酵工业*, 2016, 42 (12): 150-156.