

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.026

# 银杏果热风干燥工艺参数响应面法优化\*

张黎骅<sup>1,2</sup> 徐中明<sup>1</sup> 夏磊<sup>2</sup> 马志远<sup>2</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 四川农业大学信息与工程技术学院, 雅安 625014)

**【摘要】** 利用自制的热风干燥在线测试装置,对银杏果的热风干燥进行了试验研究,探讨了热风温度、热风速度及装载量对含水率、干燥速率的影响,通过响应面分析和逐步逼近法分析了热风温度、热风速度及装载量与干燥过程平均能耗、平均干燥速率、蛋白质保存率以及干燥后的感官品质之间的关系,建立了二次回归数学模型。并利用函数期望优化方法进行了多目标函数优化,确定了银杏果热风干燥的最佳工艺参数组合。结果表明,银杏果热风干燥过程中加速过程不明显,主要集中在恒速和降速的干燥阶段。其最佳工艺参数组合为:热风温度 68℃、热风速度 1.15 m/s、装载量 15.58 kg/m<sup>2</sup>。此时平均能耗为 11.86 kW·h/kg、平均干燥速率为 9.77%/h、蛋白质保存率为 90.30%、感官评分为 8.57 分。

**关键词:** 银杏果 热风干燥 参数优化 数学模型 响应面分析法

**中图分类号:** S375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0140-06

## Optimization of the Hot-air Drying Technical Parameters for Ginkgo Fruit Based on Response Surface Methodology

Zhang Lihua<sup>1,2</sup> Xu Zhongming<sup>1</sup> Xia Lei<sup>2</sup> Ma Zhiyuan<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(2. College of Information and Engineering Technology, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

### Abstract

The effects of drying temperature, material load and airflow rate on hot-air drying characteristics of the moisture content and dehydrating rate of ginkgo fruit were investigated by applying self-made hot-air drying online testing device. Drying temperature, material load and airflow rate were the influence factors, and moisture content, dehydration rate, average energy consumption of drying process, protein retention rate and sensory quality of dried ginkgo were the experimental indices, and the relationships between the experimental indices and the influence factors were analyzed through the responsesurface analysis method and sub-stepping method. The quadratic regression mathematical models that described the relations between the experimental indices and the influence factors were established. The optimal combination of technological parameters for drying materials was obtained through conducting a multi-objective function optimization by function expected optimization. The hot air drying process of ginkgo is mainly concentrated in constant-speed phase and decelerated phase, and the optimal parameters are as follows: hot-air temperature of 68℃, airflow rate of 1.15 m/s, and material load of 15.58 kg/m<sup>2</sup>. Under these conditions, the energy consumption is 11.86 kW·h/kg, the dehydration rate is 9.77%/h, protein retention rate is 90.30% and the sensory score is 8.57. The results can provide a theoretical basis for drying and industrialized production of ginkgo fruit.

**Key words** Ginkgo fruit, Hot-air drying, Parameters optimization, Mathematical model, Response surface methodology

收稿日期: 2011-09-18 修回日期: 2011-11-07

\* 四川省学术和技术带头人培养资金资助项目

作者简介: 张黎骅, 博士生, 四川农业大学副教授, 主要从事农产品加工机械与装备研究, E-mail: zhanglihua69@126.com

通讯作者: 徐中明, 教授, 博士生导师, 主要从事机械工程设计研究, E-mail: xuzm6@163.com

## 引言

目前,我国银杏果约占全球银杏果总产量的85%,种植面积超过6.7万 $\text{hm}^2$ <sup>[1-2]</sup>,栽植规模以每年10%~15%的速度增长,对银杏果进行深加工增值研究具有很高的经济价值。在银杏果深加工过程中基本的生产环节是贮藏、脱壳<sup>[3]</sup>。银杏鲜果含水率高以及种皮较硬,因此在贮藏、脱壳之前需对银杏鲜果进行干燥处理。

Yaldiz O等分别对蔬菜、苹果、无花果进行了热风干燥特性的研究<sup>[4-6]</sup>;张建军等分别对辣椒、牡丹压花、油菜籽进行了相应的研究<sup>[7-9]</sup>。结果表明:热风干燥农产品可以缩短干燥时间,且产品品质能得到很好的保证。

因银杏果壳组织结构致密,阻止了果仁水分向外蒸发,所以银杏果干燥难度较大,干燥时间长,成本高,干燥后品质难以保证。所以,有必要对银杏果的干燥特性以及干燥工艺参数进行深入研究。本文以热风温度、热风速度、装载量为试验因素,取干燥过程平均能耗、平均干燥速率、蛋白质保存率以及银杏果干后的感官品质评分为目标参数进行鲜银杏果的恒温热风干燥试验,研究其干燥特性,并通过响应面分析和逐步逼近法建立二次回归数学模型。利用函数期望优化方法进行多目标函数优化,确定银杏果热风干燥的最佳工艺参数组合。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验所用银杏果购于四川省雅安市。选取大小均匀的银杏果进行试验,银杏果的初始干基含水率为93.42%。

### 1.2 仪器设备

本文采用的自制热风干燥在线测试装置如图1所示。主要仪器包括:Kanomax、KA31型热式风速计,加野麦克斯仪器(沈阳)有限公司,温度精度为0.1℃,风速精度为0.1 m/s;GZX2DH型电热恒温干燥箱,上海跃进医疗器械厂,温度波动度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ;ARRW60型电子精密天平,上海奥豪斯公司,测试质量精度0.01 g;FHA696MF型物料水分测定仪,德国阿尔邦万能仪表公司,测试精度0.01%;LCDG-DG11X型单相电度表,山东力创科技有限公司,测试精度0.01 kW·h;K9860型全自动凯氏定氮仪,济南海能仪器有限公司,重复性误差 $\pm 0.5\%$ 。

### 1.3 试验方法

首先用热式风速计检测使热风干燥装置中的温度、风速达到预定水平,然后按预先选定样本的装载

量将银杏果均匀铺在面积为5 200  $\text{mm}^2$ 筛网上,将筛网平放于干燥室的中心位置。试验开始后,每隔30 min读取质量数据并记录,干燥至干基含水率14.4%以下时停止试验。记录其干燥时间,取出冷却后放入保鲜袋中贮存。每次试验重复3次,取平均值。

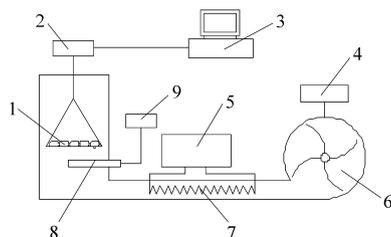


图1 干燥测试装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the drying testing device

1.干燥盘 2.精密天平 3.计算机 4.变频调节器 5.加热温度控制器 6.风机 7.加热电阻丝 8.温度/风速传感器 9.温度/风速检测仪

### 1.3.1 干燥试验设计

(1)单因素试验:选取热风温度、热风速度及银杏果装载量为试验因素,研究银杏果干燥特性与各因素之间的变化关系。

(2)二次旋转回归正交试验:设计运用 Central Composite Design 的中心组合设计理论<sup>[10]</sup>。以热风温度、热风速度以及装载量为试验因素,取平均能耗、平均干燥速率、蛋白质保存率及品质评分为响应值进行响应面的分析试验。

热风温度、热风速度以及装载量的水平及编码如表1所示。

表1 试验因素水平

Tab.1 Levels of experimental factors

编码	因素		
	热风温度 $x_1/^\circ\text{C}$	热风速度 $x_2/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	装载量 $x_3/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$
-1.682	65	0.5	9.62
-1	69	0.7	13.46
0	75	1.0	19.23
1	81	1.3	25.00
1.682	85	1.5	28.84

### 1.3.2 参数计算

(1)含水率测定:按照 GB/T 3543.6—1995 方法测定,105℃定时干燥法,在 GZX2DH 型电热恒温干燥箱内进行。

(2)平均干燥速率是指干燥过程中,单位时间减少的干基含水率,单位为%/h。

(3)平均能耗是指去除单位质量水分所需消耗的电量,单位为 kW·h/kg。

(4)粗蛋白保存率:采用凯氏定氮法测定蛋白质质量分数<sup>[11]</sup>。粗蛋白保存率  $Q$  计算公式为

$$Q = m_{d2} / m_{d1} \times 100\%$$

式中  $m_{d1}$ ——干燥前粗蛋白质量分数

$m_{d2}$ ——干燥后粗蛋白质量分数

(5)感官评分是农产品干燥中的一项重要指标,通常采用有经验的专家打分的方法(3位专家打分,取其平均值),综合考虑干制品形状、色泽、裂纹和香味等指标,根据表2评分标准进行评定。

表2 感官品质指标评分标准

Tab.2 Standard of sense organ quality evaluation on ginkgo

评分指标	评分标准				加权值
色泽(外壳)	淡黄(10)	棕黄(8)	棕黑(4)	黑褐(2)	0.3
裂纹(果仁)	无裂纹(10)	不明显(8)	明显(4)	裂开(2)	0.3
色泽(果仁)	淡黄(10)	棕黄(8)	棕黑(4)	黑褐(2)	0.2
香味	浓(10)	一般(8)	淡(4)	无(2)	0.2

## 2 试验结果及分析

### 2.1 单因素试验

#### 2.1.1 热风温度

当热风速度为 1 m/s,装载量为 23.08 kg/m<sup>2</sup>时,不同热风温度下银杏果的干燥曲线及干燥速率曲线如图2所示。图2a显示,随着热风温度的增大,银杏果的干燥曲线变陡,即热风温度越大,所需的干燥时间越短。由图2b可见,银杏果热风干燥过程加速过程不明显,失水过程主要集中在恒速和降速干燥阶段,恒速阶段干燥速率受风温影响较显著,随热风温度增大而增大,但其增幅逐渐减小。主要由于在恒速干燥阶段,热风温度越高,银杏果内外水分压差越大,其干燥速率也越大。由试验结果分析可知,温度过高(≥90℃)银杏果被烤熟,营养成分被破坏,会出现壳体和果仁变成黑褐色物料,果仁产生裂纹甚至破裂,品质明显下降;温度过低(≤60℃)干燥速率太小,干燥效率太低。所以银杏果干燥温度在65~85℃为宜。

#### 2.1.2 热风速度

在热风温度为80℃,装载量为23.08 kg/m<sup>2</sup>条件下,不同热风速度下银杏果的干燥曲线及干燥速率曲线如图3所示。由图3a可知,在热风温度及装载量恒定的条件下,热风速度越大,干燥周期越短。由图3b可知,干燥风速对银杏果的热风干燥影响程度弱于热风温度的影响。造成这种情况的原因可能是:风速越高,能够越快地带走物料表面的湿分,同时也减小了银杏表面的传质、传热的边界层的膜

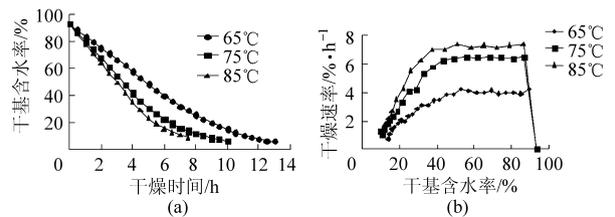


图2 不同热风温度下银杏果的干燥曲线及干燥速率曲线

Fig.2 Drying curves and dehydrating rate curves under different temperatures

(a) 干燥曲线 (b) 干燥速率曲线

厚<sup>[11]</sup>。这样就增加了物料表面与外部空间的传质梯度,有利于物料内水分扩散及表面的水分蒸发,所以干燥速率越快。但当蒸发出来的水分被热风全部带走后,增加热风速度不仅不能加速银杏果干燥速率,反而会不断造成过多能耗损失。由此可见,在不同银杏果干燥阶段采用不同风速干燥即变风速干燥方式不仅有利于物料水分的快速蒸发,而且有利于降低干燥能耗。通过试验分析,干燥风速宜选0.5~1.5 m/s。

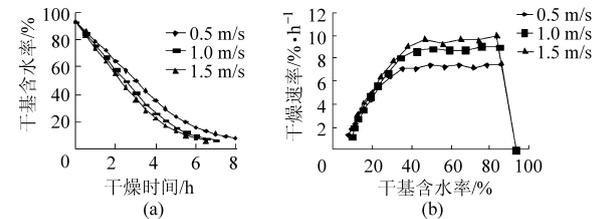


图3 不同热风速度下银杏果的干燥曲线及干燥速率曲线

Fig.3 Drying curves and dehydrating rate curves under different hot wind velocities

(a) 干燥曲线 (b) 干燥速率曲线

#### 2.1.3 装载量

在热风温度为80℃及热风速度为1 m/s的条件下,不同装载量下银杏果的干燥曲线及干燥速率曲线如图4所示。由图4a可见,装载量越小,所需干燥时间就越短。当装载量为28.84 kg/m<sup>2</sup>时,其干燥时间大于8 h。分析图4b可知,装载量对银杏果热风干燥速率影响程度强于热风速度的影响。物料恒速阶段干燥速率随着装载量的增加而降低,但减少幅度随着装载量的增加而降低。这是因为在相同热能条件下,当装载量较多时,虽然单位时间失去的水分较多,但含水率却会降低。所以,干燥速率会减小。但装载量较小时,则能耗太高。综合考虑生产效率和能耗,在本试验条件下,宜选装载量为9.62~28.84 kg/m<sup>2</sup>。

## 2.2 二次回归正交试验

按照CCD试验设计方案,随机组合试验次序,所得试验结果如表3所示。表中 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 为试验

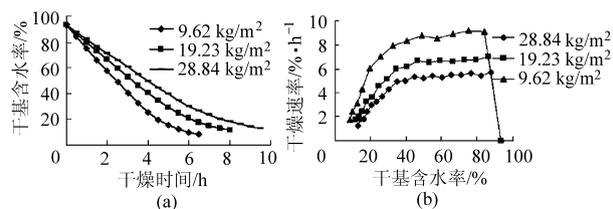


图 4 不同装载量下银杏果的干燥曲线及干燥速率曲线

Fig. 4 Drying curves and dehydrating rate curves under different loaded qualities

(a) 干燥曲线 (b) 干燥速率曲线

表 3 试验设计及其结果

Tab. 3 Experimental design and results

试验序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	平均能耗 $Y_1$ / $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均干燥速率 $Y_2$ / $\% \cdot \text{h}^{-1}$	蛋白质保存率 $Y_3$ / $\%$	品质评分 $Y_4$
1	1	1	1	12.846	11.959	80.08	5.6
2	1	1	-1	19.772	15.589	81.76	5.6
3	1	-1	1	17.512	11.479	80.22	6.3
4	1	-1	-1	16.154	8.689	75.56	7.7
5	-1	1	1	11.160	5.049	85.11	8.1
6	-1	1	-1	12.658	11.779	91.98	8.1
7	-1	-1	1	11.890	5.805	78.77	8.0
8	-1	-1	-1	10.104	7.615	80.31	7.3
9	1.682	0	0	18.974	17.824	80.27	5.2
10	-1.682	0	0	12.468	7.998	85.29	8.3
11	0	1.682	0	16.572	9.993	84.38	7.1
12	0	-1.682	0	11.302	4.153	72.47	8.4
13	0	0	1.682	11.381	4.491	84.24	6.5
14	0	0	-1.682	17.545	10.655	85.61	7.9
15	0	0	0	8.642	7.853	82.26	8.9
16	0	0	0	10.544	8.169	81.76	8.7
17	0	0	0	9.691	7.817	82.52	8.8
18	0	0	0	9.821	6.034	84.81	8.9
19	0	0	0	10.335	6.212	83.63	8.2
20	0	0	0	8.407	5.768	83.37	8.7

表 4 回归统计分析

Tab. 4 Anova for the regression response surface model

预测模型	显著性检验 $F$ 值	失拟性检验 $F_{Lr}$ 值	相关系数 $R^2$
$Y_1 = 9.606 + 2.300X_1 + 0.706X_2 - 1.146X_3 - 1.446X_2X_3 + 1.961X_1^2 + 1.330X_2^2 + 1.516X_3^2$	12.61 **	4.61 <sup>ns</sup>	0.8804
$Y_2 = 7.279 + 2.489X_1 + 1.509X_2 - 1.446X_3 + 0.963X_1X_3 - 1.418X_2X_3 + 2.149X_1^2$	36.87 **	0.86 <sup>ns</sup>	0.9445
$Y_3 = 82.94 - 1.98X_1 + 3.23X_2 - 0.57X_3 - 1.49X_1X_2 + 1.42X_1X_3 - 1.46X_2X_3 - 1.68X_2^2 + 0.62X_3^2$	40.46 **	0.56 <sup>ns</sup>	0.9671
$Y_4 = 8.70 - 0.84X_1 - 0.30X_2 - 0.22X_3 - 0.46X_1X_2 - 0.26X_1X_3 - 0.70X_1^2 - 0.35X_2^2 - 0.54X_3^2$	23.67 **	2.73 <sup>ns</sup>	0.9451

注：\*\* 表示极显著；ns 表示极不显著。

导致随着温度的增加其干燥速率的增加幅度逐渐减小。由图 6 还可得出,热风温度和速度的交互作用不显著,而其他因素交互作用显著。各结构参数对平均干燥速率的影响强度次序为:热风温度、装

因素编码值。

### 2.2.1 回归分析

对试验结果采用回归分析中的逐步逼近法来寻求预测模型的优化方程,设置显著水平  $\alpha = 0.10$ 。其回归和分析结果如表 4 所示。由分析可知,  $F > F_{0.05}(9,5) = 4.77$ ,表明 4 个模型极显著;失拟性检验失拟项  $F_{Lr} < F_{0.05}(5,5) = 5.05$ ,失拟性不显著,表明在试验范围内,试验误差较小,回归模型与实际情况拟合程度高。 $R^2$  的值分别为 0.8804、0.9445、0.9671、0.9451,表明 4 个模型分别可以解释其响应值 88.04%、94.45%、96.71% 和 94.51% 的变化。说明以上模型能够对银杏果热风干燥的平均能耗、平均干燥速率、蛋白质保存率以及感官评分进行分析和预测。

### 2.2.2 响应面分析

图 5 给出了热风温度、热风速度和装载量 3 因素之一取零水平时,其他 2 因素对平均能耗的影响<sup>[11~12]</sup>。通过观察可以发现:在试验范围内,平均能耗随着热风温度、热风速度的升高而增大,随着装载量的增加而减小。原因可能有:当温度越高、热风温度越高,装载量越少时,其能耗损失越大。由图 5 还可知热风速度和装载量的交互作用显著,而其他因素交互作用不显著。在试验范围内,各结构参数对平均能耗的影响强度次序为:装载量、热风温度、热风速度。

图 6 给出了热风温度、热风速度和装载量 3 因素之一取零水平时,其他 2 因素对平均干燥速率的影响。通过观察可以发现:在试验范围内,平均干燥速率随着热风温度、风速的升高而增大;而且随着装载量的增加而减小,热风温度对平均干燥速率的影响作用逐渐减小。原因主要有:随着热风温度和速度的增加,其可以供给更多的热量而使水分蒸发。但随着水分蒸发质量的增加,所需能耗也增加,从而

量、热风速度。

图 7 给出了热风温度、热风速度和装载量 3 因素之一取零水平时,其他 2 因素对蛋白质保存率的影响。通过观察可以发现:在试验范围内,蛋白质保

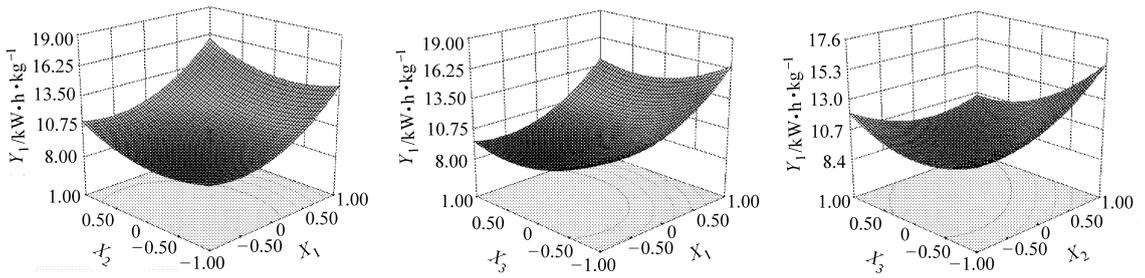


图5 平均能耗的响应曲面

Fig. 5 Response surface of the average energy consumption

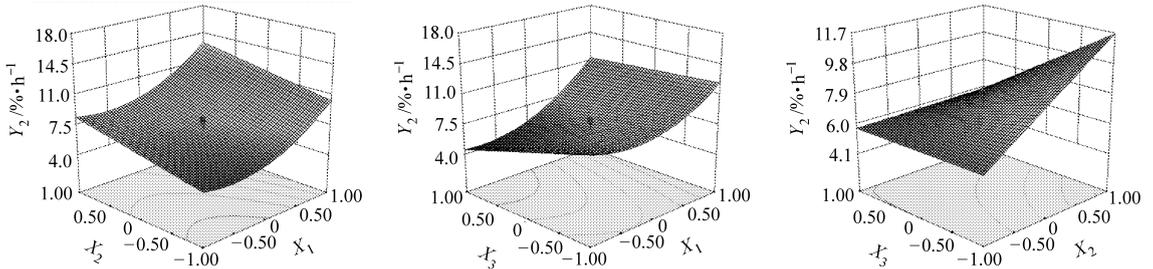


图6 平均干燥速率的响应曲面

Fig. 6 Response surface of the average drying rate

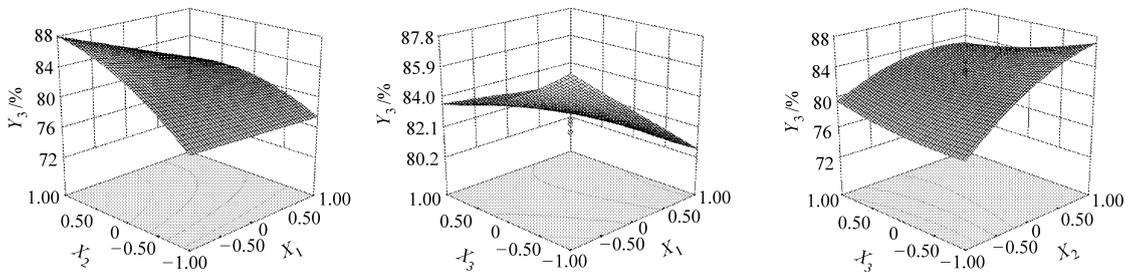


图7 蛋白质保存率的响应曲面

Fig. 7 Response surface of the protein retention rate

存率随着热风温度、装载量的增加而减小;随着热风速度的增加而增加。当热风温度较低时,风速对蛋白质保存率的影响较大。导致蛋白质保存率下降的原因是干燥温度越高,其干燥时间越长,则蛋白质分解越显著。因此为了减少银杏果蛋白质的损失,应尽可能地降低加热温度、缩短加热时间。由图7还可得出,各因素交互作用影响均显著。各工艺参数对蛋白质保存率的影响强度次序为:热风温度、热风速度、装载量。

图8给出了热风温度、热风速度和装载量3因素之一取零水平时,其他2因素对感官评分的影

响。通过观察可以发现:在试验范围内,感官评分随着热风温度、风速以及装载量的升高而减小;导致银杏果感官评分减小的原因有多种:一方面,较高的温度会使银杏果表层发生熟化,使其颜色由最初的浅黄色逐渐转变为黄色;另一方面,加热过程中杏仁也会伴有美拉德反应所导致的褐变现象以及裂纹的发生。由于美拉德反应的褐变程度受到加热温度和时间的影响。因此应尽可能地降低加热温度、缩短加热时间。由图8还可得出,热风温度和速度的交互作用显著,而其他因素交互作用不显著。各结构参数对感官评分的影响强度次序为:热风温度、热风速度、装载量。

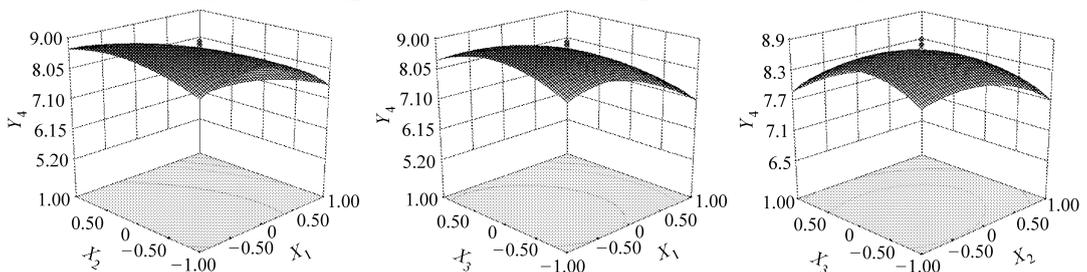


图8 感官评分的响应曲面

Fig. 8 Response surface of the sensory score

度、装载量。

## 2.3 参数优化

由4个目标参数响应面分析可得,如果热风温度过高,不仅使蛋白质保存率、干制品品质较低,而且单位质量干燥能耗也较大;而热风温度过低,单位时间干燥速率较小,会影响干燥效率。因而本文对上述4个目标函数进行多目标优化,进而找到满足这4个目标函数的最佳干燥工艺参数组合。其目标函数为

$$\begin{cases} Y_1 \rightarrow Y_{1\min} \\ Y_2 \rightarrow Y_{2\max} \\ Y_3 \rightarrow Y_{3\max} \\ Y_4 \rightarrow Y_{4\max} \end{cases}$$

约束条件

$$\begin{cases} Y_j \geq 0 \\ -1.682 \leq X_i \leq 1.682 \end{cases} \quad (j=1,2,3,4; i=1,2,3)$$

利用期望函数法进行寻优,考虑到各目标函数的重要性不同,设置感官评分重要度为5,平均能耗、蛋白质保存率为4,平均干燥速率为3。由数据软件分析可得优化工艺条件为:热风温度为68℃(编码值-1.24)、热风速度为1.15 m/s(编码值0.51)及装载量为15.58 kg/m<sup>2</sup>(编码值-0.64)。此时平均能耗为11.96 kW·h/kg、平均干燥速率为10.01%/h、蛋白质保存率为89.66%、感官评分为8.4。

## 2.4 模型的验证

为验证模型的可靠性,采用上述最优工艺参数进行3次试验,试验结果如表5所示。

表5 优化方案的验证结果

Tab.5 Validation results of optimization scheme

试验项目	试验序号			平均值
	1	2	3	
平均能耗/kW·h·kg <sup>-1</sup>	11.69	12.29	11.59	11.86
平均干燥速率/%·h <sup>-1</sup>	9.57	9.85	9.89	9.77
蛋白质保存率/%	88.95	90.63	91.32	90.30
感官评分	8.6	8.3	8.8	8.57

试验结果表明,平均能耗、平均干燥速率、蛋白质保存率以及感官评分的相对误差分别为0.87%、2.40%、0.73%、1.98%,均小于5%。说明回归模型对银杏果热风干燥品质的分析和预测是可行的。

## 3 成本分析及应用前景

根据市场调查,未干燥银杏果平均16元/kg,干燥后的银杏果平均32元/kg,其中1.5 kg未干燥银杏果可得到1 kg干的银杏果,这样干燥1 kg银杏果可产生附加值8元。据统计目前干燥平均能耗为14.8 kW·h/kg,若采用本文研究的干燥工艺,干燥1 kg银杏果比目前的干燥工艺可以省电2.9 kW·h,按1元/(kW·h)计算,可以降低银杏果干燥成本2.9元,而且干燥速率高、干燥后的银杏果品质好,是一种快速、高效和节能的干燥工艺,由此可知本文研究结果在银杏果干燥生产中具有广泛的应用前景。

## 4 结论

(1)银杏果在热风干燥过程中,升速过程不明显,主要集中在恒速和降速干燥两个阶段。在本试验范围内,当热风温度和热风速度越高、装载量越少时,则银杏果干燥速率越大,干燥能耗也越高。虽温度越高,干燥速率越快,但温度过高,会导致银杏果的果仁出现褐化和裂纹,导致蛋白质保存率和感官评分急剧下降。

(2)热风温度、装载量、风速与平均能耗、平均干燥速率、蛋白质保存率、感官评分之间存在二次非线性关系,而且不同干燥因素对平均能耗、平均干燥速率及感官评分指标的影响程度不同。

(3)利用多目标非线性优化分析及函数期望寻优法,对干燥工艺进行综合优化,得到银杏果热风干燥最佳工艺参数组合,即热风温度68℃、热风速度1.15 m/s、装载量15.58 kg/m<sup>2</sup>。此时平均能耗为11.86 kW·h/kg、平均干燥速率为9.77%/h、蛋白质保存率为90.30%、感官评分为8.57分。

## 参 考 文 献

- 刘少达,朱立学,刘清生. 银杏脱壳技术的试验研究[J]. 农机化研究,2006,28(9):135~137.  
Liu Shaoda, Zhu Lixue, Liu Qingsheng. Experiment and research on ginkgo shell-exuviating technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(9):135~137. (in Chinese)
- 朱立学,刘少达,刘清生. 银杏脱壳技术与设备研究[J]. 仲恺农业技术学院学报,2006(3):5~8.  
Zhu Lixue, Liu Shaoda, Liu Qingsheng. Study on a key technology and equipment of ginkgo exuviating [J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Technology, 2006(3):5~8. (in Chinese)
- 薛福连. 银杏产品的加工利用[J]. 农村经济与科技,2005(7):62.
- Yaldiz O, Ertekin C. Thin layer solar drying of some different vegetables[J]. Drying Technology, 2001,19:583~596.

- Wang Chunhua, Yang Kejian, Han Dong. Trees' 3D modeling based on branching type and space points [J]. Application Research of Computers, 2009, 26(4): 1591~1593. (in Chinese)
- 5 徐奕, 周军, 周源华. 立体匹配技术[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(15): 1~5.  
Xu Yi, Zhou Jun, Zhou Yuanhua. On stereo matching technology [J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(15): 1~5. (in Chinese)
- 6 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 7 Zimmer Y, Tepper R, Akselrod S. An improved method to compute the convex hull of a shape in a binary image [J]. Pattern Recognition, 1997, 30(3): 397~402.
- 8 章毓晋. 图像工程(中)——图像分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 9 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学技术出版社, 1998: 72~78.
- 10 蔡健荣, 周小军, 王锋, 等. 柑橘采摘机器人障碍物识别技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 171~175.  
Cai Jianrong, Zhou Xiaojun, Wang Feng, et al. Obstacle identification of citrus harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 171~175. (in Chinese)
- 11 Mühlmann K, Maier D, Hesser J, et al. Calculating dense disparity maps from color stereo images, an efficient implementation [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1~3): 79~88.
- 12 Hirschmüller H, Innocent P R, Garibaldi J M. Real-time correlation-based stereo vision with reduced border errors [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1~3): 229~246.
- 13 Kim T, Im Y. Automatic satellite image registration by combination of stereo matching and random sample consensus [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2003, 41(5): 1111~1117.
- 14 Steger C, Ulrich M, Wiedemann C. Machine vision algorithms and applications [M]. Berlin: Wiley-VCH, 2008: 241~257.
- 15 Zhang Wenli, Li Yongping. Real-time tree model reconstructing for fruit harvesting robot system [C]//Proceedings of the 9th International Conference on CAID&CD, 2008: 580~585.

(上接第 145 页)

- 5 Menges H O, Ertekin C. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(1): 119~125.
- 6 Azzouz S, Guizani A, Jomaa W, et al. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(4): 323~330.
- 7 张建军, 马永昌, 王海霞, 等. 辣椒热风干燥的工艺优化试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 223~224.
- 8 刘珂, 朱文学. 牡丹压花热风干燥特性及动力学模型研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(11): 188~192.  
Liu Ke, Zhu Wenxue. Study on hot-air drying characteristic of pressed peony and dynamic model [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(11): 188~192. (in Chinese)
- 9 张喜梅, 吴雪辉, 李昌宝, 等. 油茶籽的热风干燥特性及数学描述[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 116~120.  
Zhang Ximei, Wu Xuehui, Li Changbao, et al. Characteristics and mathematical description of hot-air drying of camellia oleifera seed [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(8): 116~120. (in Chinese)
- 10 明道绪. 高级生物统计[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 270~285.
- 11 易军鹏, 朱文学, 马海乐, 等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 103~110.  
Yi Junpeng, Zhu Wenxue, Ma Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from *Paeonia suffruticosa* Andr. seeds with response surface analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 103~110. (in Chinese)
- 12 Funda Kahraman. The use of response surface methodology for prediction and analysis of surface roughness of AISI 4140 steel [J]. Materials and Technology, 2009, 43(5): 267~270.