

# 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化

陈健凯<sup>1,2</sup>, 林河通<sup>1,3\*</sup>, 林艺芬<sup>1,3</sup>, 李辉<sup>1,4</sup>, 王志艳<sup>1,3</sup>

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002; 2. 漳州职业技术学院食品与生物工程系, 漳州 363000;  
3. 福建农林大学农产品产后技术研究所, 福州 350002; 4. 闽南师范大学生物科学与技术系, 漳州 363000)

**摘要:** 为了提高杏鲍菇干制产品品质, 降低干燥能耗, 该文应用微波真空技术干燥杏鲍菇。采用三元二次回归旋转组合设计方法进行工艺参数优化试验, 考察分析微波强度( $X_1$ )、物料厚度( $X_2$ )、腔体绝对压力( $X_3$ )因素对品质指标色差( $Y_1$ )、复水比( $Y_2$ )、氨基酸含量( $Y_3$ )和单位能耗( $Y_4$ )的影响及因子间交互作用对指标的影响; 采用线性加权法, 将多目标综合优化, 确定干燥工艺的最优参数组合。结果表明: 微波强度、物料厚度、腔体绝对压力对试验指标色差、复水比、氨基酸含量、单位能耗影响显著, 物料厚度是影响色差的主要因素, 物料厚度小于2 cm时, 产品色泽较差; 腔体绝对压力是影响复水比和氨基酸含量的主要因素, 较小的腔体绝对压力有利于产品复水和减少氨基酸损失; 微波强度是影响单位能耗的主要因素, 高的微波强度, 能耗较高, 高的微波强度与较小的腔体绝对压力组合时, 干燥能耗更高; 杏鲍菇微波真空干燥高品质低能耗的最优工艺参数组合为微波强度12.5 kW/kg、物料厚度2.4 cm、腔体绝对压力18 kPa, 此条件下干燥的产品品质优良, 色泽洁白, 色差 $L$ 为78, 复水性好, 复水比为1.58, 氨基酸破坏少, 其值为473.1 mg/100 g, 单位能耗较低, 为9.3 kJ/kg。

**关键词:** 食用菌; 干燥; 优化; 杏鲍菇; 微波真空干燥; 品质; 能耗; 参数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.037

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-03-0277-08

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.

Chen Jiankai, Lin Hetong, Lin Yifen, et al. Optimized technology of *Pleurotus eryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 277-284. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

杏鲍菇 (*Pleurotus eryngii*), 味道鲜美, 营养丰富, 蛋白质含量高<sup>[1]</sup>, 是中国食用菌家族中的新宠, 近几年, 杏鲍菇产量剧增。由于杏鲍菇湿基含水率达88%~92%, 采后保鲜加工成为杏鲍菇产业发展急待解决的问题, 而干制是延长其货架供应期的重要措施之一。热风干燥是较常规的传统干制方法, 其优点是物料处理量大, 设备成本及操作费用低, 但由于干燥时间长, 干燥温度高, 易造成产品的品质差, 能耗高。微波真空干燥技术结合真空干

燥和微波干燥的优势, 是在真空条件下对物料进行微波加热而达到脱水目的, 具有高效低温的特点<sup>[2-6]</sup>。国内外一些学者应用该技术对香蕉、苹果等果蔬的干制进行研究<sup>[7-12]</sup>, 也有学者应用该技术对双孢菇、银耳等食用菌进行研究<sup>[13-14]</sup>, 研究结果表明微波真空干燥技术能较好地保持产品的色泽和营养品质, 有效降低能耗<sup>[15]</sup>。前人对杏鲍菇微波真空干燥已有初步研究, 认为杏鲍菇适合微波真空干燥<sup>[16]</sup>, 其干燥过程符合Page方程<sup>[17]</sup>。但有关微波真空干燥时兼顾产品品质和能耗的工艺参数优化研究目前尚未见报道。

本文采用三元二次回归旋转组合设计优化试验, 探讨不同水平的微波强度、物料厚度、腔体绝对压力等微波真空干燥工艺参数对杏鲍菇干燥产品色差、复水比、氨基酸含量和单位能耗的影响, 以期获得高品质、低能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数, 为杏鲍菇干制提供科学依据和生产指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与设备

KL-4型微波真空干燥机(广州凯棱工业用微波

收稿日期: 2013-04-08 修订日期: 2014-01-07

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAD07B06)、福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(闽教科(2007)20号)、福建省教育厅科技项目(JB10236)和福建省漳州市自然科学基金项目(ZZ2012J07)资助。

作者简介: 陈健凯(1969—), 女, 广东潮阳人, 副教授。研究方向为现代农产品加工技术。福建省漳州市马鞍山路1号, 漳州职业技术学院食品与生物工程系, 363000。Email: cjk22@126.com

\*通信作者: 林河通(1967—), 男, 福建安溪人, 博士, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会高级会员(E041200208S), 研究方向为农产品加工及贮藏工程。福州市金山 福建农林大学食品科学学院, 350002。Email: hetonglin@163.com

设备有限公司)；DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)；GL-20G-II 型冷冻离心机(上海安亭科学仪器厂)；FW80 型高速万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司)；ADCI 系列全自动色差计(北京辰泰克仪器技术有限公司)；BS224S 型电子天平(赛多利斯科学仪器(北京)有限公司)；CP2102 型电子天平(奥豪斯仪器(上海)有限公司)。

## 1.2 主要试剂

茚三酮、正丙醇、正丁醇、乙二醇、亮氨酸、抗坏血酸、乙酸、乙酸钠、95%乙醇，均为分析纯。

## 1.3 试验方法

杏鲍菇，由福建省漳州市九湖食用菌研究所提供。选取菇体直径为 4~5 cm 的杏鲍菇，截去根部及尾部，留菇体约 12 cm 长度作为试验材料，沿菇长方向取材，根据试验要求切成不同厚度的圆片状。依据 GB/T 5009.3-2003 测定杏鲍菇的初始含水率。

将切好的杏鲍菇平摊在微波盘上，接通微波真空干燥机电源，设置作业参数，将盛放杏鲍菇的微波盘放入干燥腔中，抽真空达到设定值后开始微波加热干燥并同时计时。每个处理组干燥至物料湿基含水率 13% (安全含水率) 时终止干燥，迅速放入真空干燥皿冷却后进行真空包装，包装后放置真空干燥皿，待测定指标时取用。每份试验处理组平行重复做 3 次，测定各自试验指标值，最后取其平均值。每组试验的物料质量决定于微波强度，如参数微波强度 8 kW/kg，微波功率取 2 kW 时，物料质量为 0.25 kg。

### 1.3.1 指标测定

#### 1) 色差

色差计的  $L$  值表示物料色泽的明暗度。 $L=0$  表示黑色， $L=100$  表示白色， $L$  值大，颜色白，褐变程度低， $L$  值小，颜色暗，褐变程度高。为避免不同杏鲍菇产品以及同一产品不同部位褐变不均匀，本试验对每个处理组均抽取 10 个样品测试，每个产品取不同部位测试(每个样品测 8 处，上下两表面各测 4 处)，每个处理组检测 80 次，最后取其平均值作为这个处理组的色差值。

#### 2) 复水比的测定

产品复水性能用复水比表示，复水比为产品在复水一定时间后的质量与复水前质量之比，计算公式如下：

$$R_R = M_f / M_g$$

式中： $R_R$  为复水比； $M_f$  为产品复水沥干后的质量，kg； $M_g$  为复水前产品的质量，kg。

试验时，将称好的一定质量的样品放入 40℃ 恒

温的蒸馏水中，30 min 后，取出沥干 20 min，并用吸水纸拭干表面水分，称质量。每组进行 3 次平行试验，结果取平均值。

#### 3) 氨基酸含量测定

采用茚三酮显色法<sup>[18]</sup>测定样品中氨基酸总量。将样品粉碎，称取 1 g 干基质量进行检测。

#### 4) 单位能耗的计算

单位能耗是指每蒸发杏鲍菇一个单位质量水分所耗电能，以电机额定输入功率及每组试验总加热时间计算，计算公式如下：

$$N = \frac{WT}{G}$$

式中： $N$  为干燥能耗，kJ/kg； $W$  为电机额定输入功率，kW； $T$  为总干燥时间，s； $G$  为去除水分的质量，kg。

### 1.3.2 优化试验设计

前期的单因素试验，分别考察 3 个不同水平的微波强度、物料厚度、腔体绝对压力对试验指标的影响。在此基础上，确定本试验的 3 个试验因素微波强度  $X_1$ 、物料厚度  $X_2$ 、腔体绝对压力  $X_3$  的水平范围，以色差  $Y_1$ 、复水比  $Y_2$ 、氨基酸  $Y_3$ 、单位能耗  $Y_4$  为试验指标，采用三元二次回归旋转组合设计，对影响杏鲍菇微波真空干燥品质及能耗的工艺进行优化。各因素的水平设置及编码见表 1。

表 1 试验因素水平及其编码表  
Table 1 Experimental factors and levels

编码 Code	因素 Factor		
	微波强度 $X_1$ Microwave power density/(kW·kg <sup>-1</sup> )	物料厚度 $X_2$ Material thickness/cm	腔体绝对压力 $X_3$ Absolute pressure chamber/kPa
1.682	16	3.5	41
1	13.57	2.89	34.92
0	10	2	26
-1	6.43	1.11	17.08
-1.682	4	0.5	11
$\Delta_j$	3.57	0.89	8.92

### 1.3.3 统计分析

采用 Design Expert 进行试验数据处理和响应面分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验设计及结果

试验按 1.3 方法进行，采用三元二次回归旋转组合设计，试验方案和结果见表 1、表 2。

### 2.2 杏鲍菇干燥品质与能耗分析

利用软件对表 2 试验数据进行方差分析，结果如表 3。

### 2.2.1 工艺参数对杏鲍菇干燥产品色差的影响

影响杏鲍菇干燥产品色差的主效因素为  $X_2$  (物料厚度)  $> X_3$  (腔体绝对压力)  $> X_1$  (微波强度)。物料厚度对杏鲍菇干燥产品色差的影响极显著 ( $P < 0.01$ ) (表 3)。物料过厚, 微波能沿着厚度方向的

衰减量增加, 中心部分获得的微波能减少, 同时内部水分扩散至物料表面路径长, 这些都相对延长了干燥时间, 导致褐变程度高, 色泽较差; 物料太薄, 在微波真空干燥过程中容易引起焦化, 表层组织硬化、结壳, 使得后期水分扩散速度慢, 干燥时间长<sup>[19-20]</sup>。

表 2 试验设计及结果

Table 2 Experimental designs and results

序号 No	微波强度 $X_1$ Microwave power density/(kW·kg <sup>-1</sup> )	物料厚度 $X_2$ Material thickness/cm	腔体绝对压力 $X_3$ Absolute pressure chamber/kPa	色差 $Y_1$ Color	复水比 $Y_2$ Rehydration ratio	氨基酸质量分数 $Y_3$ Amino acids/(mg·(100g) <sup>-1</sup> )	单位能耗 $Y_4$ Unit energy consumption/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	1 (13.57)	1 (2.89)	1 (34.92)	73.63	0.78	339.49	9.76
2	1 (13.57)	1 (2.89)	-1 (17.08)	78.53	1.23	466.82	10.94
3	1 (13.57)	-1 (1.11)	1 (34.92)	50.89	0.94	400.25	9.78
4	1 (13.57)	-1 (1.11)	-1 (17.08)	59.90	1.61	365.28	13.72
5	-1 (6.43)	1 (2.89)	1 (34.92)	71.57	0.74	361.48	7.83
6	-1 (6.43)	1 (2.89)	-1 (17.08)	75.38	1.11	369.14	7.79
7	-1 (6.43)	-1 (1.11)	1 (34.92)	62.98	0.99	405.94	8.42
8	-1 (6.43)	-1 (1.11)	-1 (17.08)	66.76	1.27	397.51	7.80
9	1.682 (16)	0 (2)	0 (26)	78.16	0.90	456.50	9.69
10	-1.682 (4)	0 (2)	0 (26)	58.99	0.76	390.80	10.08
11	0 (10)	1.682 (3.5)	0 (26)	67.97	0.77	368.65	9.09
12	0 (10)	-1.682 (0.5)	0 (26)	46.38	0.79	303.50	12.11
13	0 (10)	0 (2)	1.682 (41)	60.94	0.70	322.72	9.44
14	0 (10)	0 (2)	-1.682 (11)	77.67	1.64	485.74	10.62
15	0 (10)	0 (2)	0 (26)	72.42	0.82	469.96	9.51
16	0 (10)	0 (2)	0 (26)	69.20	0.81	466.64	9.48
17	0 (10)	0 (2)	0 (26)	69.03	0.79	479.52	9.56
18	0 (10)	0 (2)	0 (26)	71.66	0.81	459.89	9.45
19	0 (10)	0 (2)	0 (26)	70.01	0.77	468.97	9.65
20	0 (10)	0 (2)	0 (26)	70.56	0.79	480.72	9.60

表 3 回归系数显著性分析

Table 3 Significance analysis of regression coefficient

系数值 Coefficient values	P 值			
	色差 $Y_1$ Color	复水比 $Y_2$ Rehydration ratio	氨基酸 $Y_3$ Amino acids/(mg·(100g) <sup>-1</sup> )	单位能耗 $Y_4$ Unit energy consumption/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
$X_1$	0.3003	0.1609	0.2366	0.0198
$X_2$	0.0004	0.0549	0.5252	0.0724
$X_3$	0.0228	<0.0001	0.0111	0.1572
$X_1X_1$	0.9704	0.3254	0.0926	0.9245
$X_2X_2$	0.0102	0.6371	0.0002	0.4783
$X_3X_3$	0.9225	0.0001	0.0232	0.9441
$X_1X_2$	0.0499	0.7153	0.2361	0.5257
$X_1X_3$	0.6644	0.2048	0.3258	0.0469
$X_2X_3$	0.7788	0.7153	0.0160	0.5334

腔体绝对压力对杏鲍菇干燥产品色差的影响显著 ( $P < 0.05$ ) (表 3)。腔体绝对压力越小, 真空度高, 物料中水分的蒸发温度越低, 料温较低, 同时腔体内水汽能快速排出, 这些因素使得干燥过程产品褐变减少, 产品色泽越好<sup>[21]</sup>。

由表 3 可知,  $X_1$  (微波强度) 与  $X_2$  (物料厚度) 的交互作用对杏鲍菇干燥产品的色差影响显著 ( $P < 0.05$ )。当物料厚度小于 2 cm 时, 取任一水平的微波强度值, 色差  $L$  值均很低, 产品的色泽均较差;

物料厚度大于 2 cm 以上时, 随着微波强度值越大, 色差  $L$  值也越大, 产品色泽越白, 这是由于微波强度增大, 干燥速度加快, 缩短干燥时间, 减少干燥过程发生的褐变; 物料厚度在 2.00~2.89 cm, 微波强度在 11.79~13.57 kW/kg 区间时, 能获得较佳色泽的产品 (图 1)。

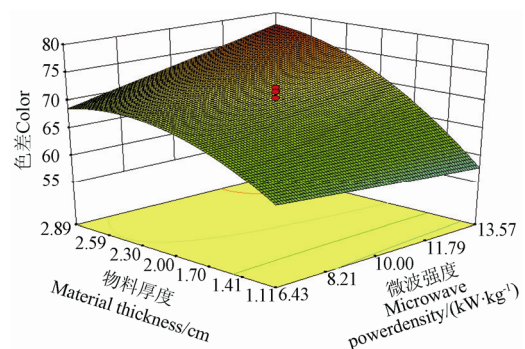


图 1 微波强度和物料厚度对杏鲍菇干燥产品色差的影响

Fig.1 Effects of microwave power density and material thickness on color of dried *Pleurotus eryngii*

### 2.2.2 工艺参数对杏鲍菇干燥产品复水比的影响

影响杏鲍菇干燥产品复水比的主效因素为  $X_3$  (腔体绝对压力)  $> X_2$  (物料厚度)  $> X_1$  (微波强度)。腔体绝对压力对杏鲍菇干燥产品复水性能的影响

极显著 ( $P < 0.0001$ ) (表 3), 腔体绝对压力小能获得复水性能较好的杏鲍菇干燥产品。腔体绝对压力小, 水蒸发温度低, 物料表面水分很快汽化, 蒸发速度快, 从而提高了内部水分的扩散速度, 同时, 真空度高使物料内外部蒸汽压差增大, 增加了物料内部水分向外扩散的动力, 在微波特有的加热方式下使内部水分快速蒸发, 物料在脱水过程中组织结构形成一定的多孔性膨化效果, 降低物料收缩, 这些有利于提高产品的复原性能<sup>[22]</sup>。这与一些学者的研究结果一致, 如 Jayaraman K S 等<sup>[23]</sup>发现干燥过程果蔬组织遭破坏从而降低其吸水性能, 故复水性下降; McMinn W A M 等<sup>[24]</sup>认为干燥过程收缩越小, 多孔性越好, 则复水性越好。腔体绝对压力小有利于提高杏鲍菇干燥产品的复水性能, 但要根据设备的极限参数, 如果接近或等于设备的极限值, 真空腔体内的气体分子易被电场电离, 从而出现气体击穿, 甚至拉弧放电现象, 这样不仅要消耗较多的微波能, 而且会损坏部件并产生微波反射, 缩短磁控管使用寿命<sup>[25-28]</sup>。因素间的交互作用对产品的复水性影响均不显著, 如表 3。

### 2.2.3 工艺参数对杏鲍菇干燥产品氨基酸含量的影响

影响杏鲍菇干燥产品氨基酸含量的主效因素为  $X_3$  (腔体绝对压力)  $> X_1$  (微波强度)  $> X_2$  (物料厚度)。腔体绝对压力对杏鲍菇干燥产品氨基酸含量的影响显著 ( $P < 0.05$ ), 微波强度和物料厚度对杏鲍菇干燥产品氨基酸含量的影响不显著 ( $P > 0.05$ ), 但物料厚度的二次效应对杏鲍菇干燥产品氨基酸含量的影响极显著 ( $P < 0.01$ ) (表 3)。腔体绝对压力小, 水分蒸发温度低, 物料脱水过程料温较低, 对杏鲍菇干燥产品氨基酸的破坏较小。

$X_2$  (物料厚度) 与  $X_3$  (腔体绝对压力) 的交互作用对杏鲍菇干燥产品氨基酸含量的影响显著 ( $P < 0.05$ ) (图 2)。

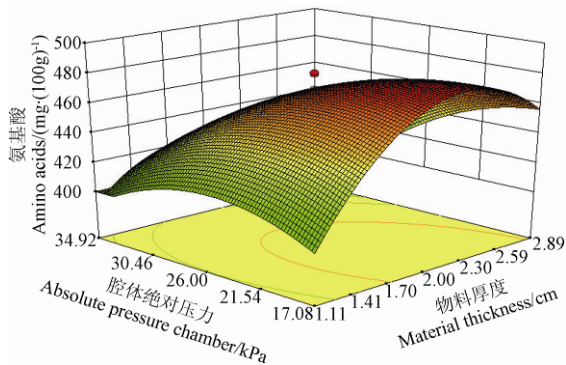


图 2 物料厚度和腔体绝对压力对杏鲍菇干燥产品氨基酸的影响

Fig.2 Effects of material thickness and chamber pressure on amino acid of dried *Pleurotus eryngii*

由图 2 可看出, 当物料厚度小于 1.41 cm 时, 取任一水平的腔体绝对压力值, 杏鲍菇干燥产品的氨基酸含量均较低, 小于 440 mg/100 g, 这是由于物料厚度较薄, 吸收的微波热使物料表面水分迅速蒸发, 物料温度升高, 表面硬化形成结壳, 进而使得内部水分蒸发困难, 后期水分干燥速度慢, 料温高且干燥时间长, 对氨基酸破坏大; 物料厚度大于 2.40 cm, 腔体绝对压力大于 30.46 kPa 时, 杏鲍菇干燥产品的氨基酸含量较低, 小于 440 mg/100 g, 物料太厚, 腔体绝对压力大, 物料中心的水分蒸发较难, 延长干燥时间, 而物料外层水分蒸发后继续吸收微波热, 导致外部料温高, 氨基酸破坏大; 腔体绝对压力在 18~21.54 kPa, 物料厚度在 2.10~2.40 cm, 能获得氨基酸含量较高的杏鲍菇干燥产品, 其氨基酸含量大于 480 mg/100 g。

### 2.2.4 工艺参数对杏鲍菇微波真空干燥单位能耗的影响

影响杏鲍菇微波真空干燥单位能耗的主效因素为  $X_1$  (微波强度)  $> X_2$  (物料厚度)  $> X_3$  (腔体绝对压力)。微波强度对杏鲍菇微波真空干燥的单位能耗影响显著 ( $P < 0.05$ ), 较高的微波强度干燥时, 单位能耗较高; 物料厚度和腔体绝对压力对杏鲍菇微波真空干燥的单位能耗影响不显著 ( $P > 0.05$ )。  $X_1$  (微波强度) 与  $X_3$  (腔体绝对压力) 的交互作用对杏鲍菇微波真空干燥的单位能耗影响显著 ( $P < 0.05$ ) (图 3)。

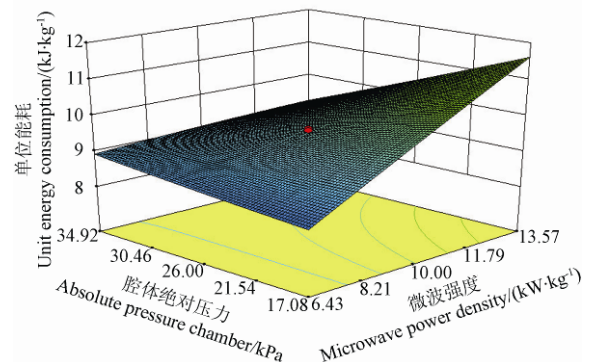


图 3 微波强度和腔体绝对压力对杏鲍菇干燥单位能耗的影响

Fig.3 Effects of microwave power density and chamber pressure on unit energy consumption of dried *Pleurotus eryngii*

较高的微波强度与较小的腔体绝对压力组合干燥时, 单位能耗更高。如表 2 中的第 3 组和第 4 组的微波强度 (13.57 kW/kg) 和物料厚度 (1.11 cm) 相同, 第 3 组的腔体绝对压力为 34.92 kPa, 其单位能耗为 9.78 kJ/kg, 第 4 组的腔体绝对压力为 17.08 kPa, 其单位能耗为 13.72 kJ/kg, 第 4 组的单位能耗在 20 组试验中最高, 这是由于微波强度大,

耗电大,抽真空也是耗电过程,真空度抽得越高即腔体绝对压力越小,耗电越大。

### 2.3 单目标回归方程与优化结果分析

采用 Design Expert 对表 2 的试验数据进行回归处理,分别得到产品色差  $Y_1$ 、复水比  $Y_2$ 、氨基酸  $Y_3$ 、单位能耗  $Y_4$  的三元二次回归方程,如下

$$Y_1 = 57.65291 - 0.92059X_1 + 17.62514X_2 - 0.37372X_3 + 0.950493X_1X_2 - 0.02481X_1X_3 + 0.064241X_2X_3 + 0.003928X_1^2 - 5.24836X_2^2 + 0.001651X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 3.167071 + 0.019881X_1 - 0.16227X_2 - 0.14586X_3 - 0.00511X_1X_2 - 0.00184X_1X_3 + 0.002047X_2X_3 + 0.002619X_1^2 + 0.019818X_2^2 + 0.002486X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = -194.606 + 28.09871X_1 + 269.8835X_2 + 20.95827X_3 + 4.469597X_1X_2 - 0.36557X_1X_3 - 2.80883X_2X_3 - 1.22461X_1^2 - 58.793X_2^2 - 0.28245X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_4 = 5.220568 + 1.040106X_1 - 1.84806X_2 + 0.09076X_3 - 0.08419X_1X_2 - 0.02245X_1X_3 + 0.033065X_2X_3 - 0.00231X_1^2 + 0.281934X_2^2 + 0.000274X_3^2 \quad (4)$$

应用 Design Expert 软件优化程序对表 2 试验数据进行 4 个试验指标的单目标优化处理。

优化目标函数确定及约束条件如下:

目标函数色差 ( $Y_1$ )、复水比 ( $Y_2$ )、氨基酸 ( $Y_3$ ) 在各自对应的约束条件下应达到最大值,单位能耗 ( $Y_4$ ) 达到最小值,即  $Y_j = \text{Max } Y (j=1, 2, 3)$ ,  $Y_4 = \text{Min } Y$ 。

约束条件:  $Y_j > 0 (j=1, 2, 3, 4)$ ,  $-1.682 \leq X_i \leq 1.682 (i=1, 2, 3)$ 。

各试验指标的优化值及对应的工艺参数组合如表 4。

表 4 单目标函数优化结果  
Table 4 Results of single targets' optimization

目标 Objective	因子 Factor			目标优化值 Objective optimization
	微波强度 $X_1$ Microwave power density/ (kW·kg <sup>-1</sup> )	物料厚度 $X_2$ Material thickness/cm	腔体绝对压力 $X_3$ Absolute pressure chamber/kPa	
$Y_1$	13.57	2.12	17.08	78.93
$Y_2$	13.00	1.11	17.08	1.69
$Y_3$ /(mg·(100g) <sup>-1</sup> )	12.38	2.12	20.05	487.29
$Y_4$ /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	6.43	2.00	26.00	7.76

较小的腔体绝对压力对降低物料干燥过程的

褐变有利。当厚度取 2.12 cm、腔体绝对压力为 17.08 kPa、微波强度为 13.57 kW/kg 时,杏鲍菇干燥产品的色差  $L$  值最高为 78.93,色泽最白。

腔体绝对压力小能获得较好复水性能的杏鲍菇干燥产品,如表 4:  $Y_2$  所示各因素的组合,能获得最高复水比 1.69 的杏鲍菇干燥产品;腔体绝对压力太大,在微波真空干燥过程中,物料水分蒸发温度较高,导致品温高,破坏氨基酸,物料厚度薄,干燥后期水分蒸发困难,干燥时间长,对氨基酸破坏较大,腔体绝对压力、物料厚度、微波强度的水平组合如表 4:  $Y_3$ , 能获得最高氨基酸值为 487.29 mg/100 g; 单位能耗的主要影响因素是微波强度,微波强度取本试验范围的最低值 6.43 kW/kg 时,能获得单位能耗最低值 7.76 kJ/kg,但这个微波强度水平不利于其他 3 个试验指标 ( $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ )。

### 2.4 工艺参数的综合优化组合及分析

为获得高品质低能耗的杏鲍菇微波真空干燥优化工艺参数组合,对 4 个试验指标进行加权分配。作为蔬菜,食用菌产品首先应具有较好的外观色泽和复水性能,其次考虑其营养价值和干燥能耗,为此,采用线性加权法,对各指标进行加权,赋予一定的权重指数,将多目标非线性优化转化为单目标非线性优化,然后加以综合优化计算。因目标函数各自量纲不同,为此采用线性功效系数法,将各目标函数转化为无量纲函数,再利用各目标回归方程 (2.3 中 4 个试验指标式 (1)~式 (4) 方程) 来进行综合优化。令:

$$F = \eta_1 Y_1 + \eta_2 Y_2 + \eta_3 Y_3 + \eta_4 Y_4 \quad (5)$$

式中:  $F$  为综合评价函数,  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 、 $\eta_4$  为对应的色差 ( $Y_1$ )、复水比 ( $Y_2$ )、氨基酸 ( $Y_3$ )、单位能耗 ( $Y_4$ ) 的一组加权系数,且  $\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 = 1$ 。考虑各目标函数的重要程度,权重系数分配为  $\eta_1 = 0.3$ ,  $\eta_2 = 0.3$ ,  $\eta_3 = 0.2$ ,  $\eta_4 = 0.2$ 。

应用 Design Expert 软件进行加权综合优化处理,得出加权综合优化方程为:

$$Y_{\text{综合}} = 1.346965 + 5.363463X_1 + 57.18925X_2 + 3.967558X_3 + 1.188706X_1X_2 - 0.08664X_1X_3 - 0.50806X_2X_3 - 0.23724X_1^2 - 13.2945X_2^2 - 0.05416X_3^2$$

综合优化工艺参数组合为:  $X_1 = 12.46$  kW/kg,  $X_2 = 2.38$  cm,  $X_3 = 18.24$  kPa。考虑到实际试验操作的可行性,对得到的优化工艺参数组合进行适当修正,分别取  $X_1 = 12.5$  kW/kg,  $X_2 = 2.4$  cm,  $X_3 = 18$  kPa 进行验证试验,获得的杏鲍菇干制品色差 ( $Y_1$ ) 为 78,复水比 ( $Y_2$ ) 为 1.58,氨基酸 ( $Y_3$ ) 为 473.1 mg/100 g,单位能耗 ( $Y_4$ ) 为 9.3 kJ/kg。验证



试验结果中, 3 个试验指标色差  $L$  值、复水比、氨基酸都接近单目标优化时的最高值(表 4), 单位能耗值高于单目标优化的最低值  $7.76 \text{ kJ/kg}$ (表 4), 这是由于单位能耗的主要影响因素是微波强度, 较低微波强度能获得低的单位能耗值, 如表 4 单目标优化中, 单位能耗的优化组合中, 微波强度为  $6.43 \text{ kW/kg}$ , 但是较低微波强度, 将大大延长微波真空干燥时间, 干燥过程产品褐变程度提高, 对产品品质破坏大, 获得的产品色差较差、复水比和氨基酸含量较低。优化结果, 综合考虑了产品品质及干燥能耗, 既能获得较高品质产品, 又能有效地把能耗控制在较低水平。

### 3 结 论

1) 微波强度、物料厚度、腔体绝对压力对杏鲍菇微波真空干燥产品色差、复水比、氨基酸含量和单位能耗的影响显著。物料厚度是影响杏鲍菇微波真空干燥产品色差的主要因素, 物料厚度小于  $2 \text{ cm}$  时, 产品的色泽较差; 腔体绝对压力是影响杏鲍菇微波真空干燥产品复水比和氨基酸含量的主要因素, 较小的腔体绝对压力有利于杏鲍菇微波真空干燥产品复水和减少氨基酸损失; 微波强度是影响杏鲍菇微波真空干燥单位能耗的主要因素, 微波强度高, 则能耗较高, 高的微波强度与较小的腔体绝对压力组合时, 鲍菇微波真空干燥的能耗更高。

2) 高品质、低能耗杏鲍菇微波真空干燥的综合优化工艺参数为: 微波强度  $12.5 \text{ kW/kg}$ 、物料厚度  $2.4 \text{ cm}$ 、腔体绝对压力  $18 \text{ kPa}$ , 在此工艺参数条件下获得的杏鲍菇干制品色差( $Y_1$ )为 78, 复水比( $Y_2$ )为 1.58, 氨基酸( $Y_3$ )为  $473.1 \text{ mg/100 g}$ , 单位能耗( $Y_4$ )为  $9.3 \text{ kJ/kg}$ 。

#### [参 考 文 献]

- [1] 荣瑞芬, 李鸿玉, 叶磊, 等. 杏鲍菇营养及功能成分分析测定[J]. 亚太传统医药, 2007(5): 85—87.  
Rong Rui fen, Li Hongyu, Ye Lei, et al. Determination of nutritive and functional components of *Pleurotus eryngii*[J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2007(5): 85—87. (in Chinese with English abstract)
- [2] Drouzas E, Schubert H. Microwave application in vacuum drying of fruits [J]. Journal of Food Engineering, 1996, 28(2): 203—209.
- [3] 韩清华, 李树君, 马季威, 等. 微波真空干燥膨化苹果脆片的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 155—158.  
Han Qinghua, Li Shujun, Ma Jiwei, et al. Microwave vacuum drying and puffing characteristics of apple chips[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 155—158. (in Chinese with English abstract)
- [4] 朱德泉, 王继先, 钱良存, 等. 猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 248—252.  
Zhu Dequan, Wang Jixian, Qian Liangcun, et al. Optimization of technical parameters of microwave-vacuum drying of Chinese gooseberry slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 248—252. (in Chinese with English abstract)
- [5] Lin T M, Durance T D, Scaman C H. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices[J]. Food Research International, 1998, 31(2): 111—117.
- [6] Bondaruk J, Markowski M, Błaszczak W. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 306—312.
- [7] Figiel A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1): 98—104.
- [8] Giri S K, Prasad S. Optimization of microwave-vacuum drying of button mushroom using response-surface methodology[J]. Drying Technology, 2007, 25(5): 901—911.
- [9] Fernando W J N, Low H C, Ahmad A L. Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials: A study on slices of banana, cassava and pumpkin[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 102(4): 310—316.
- [10] 李辉, 袁芳, 林河通, 等. 食品微波真空干燥技术研究进展[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(1): 46—50.  
Li Hui, Yuan Fang, Lin Hetong, et al. Research advances of microwave-vacuum drying technology for dried food processing[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(1): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张慇. 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.
- [12] 李辉, 林河通, 袁芳, 等. 荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 107—112.  
Li Hui, Lin Hetong, Yuan Fang, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of litchi pulp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 107—112. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李波, 芦菲, 刘本国, 等. 双孢菇片微波真空干燥特性及工艺优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 380—384.  
Li Bo, Lu Fei, Liu Benguo, et al. Microwave-vacuum

- drying characteristics and process optimization of *Agaricus bisporus* slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 380—384. (in Chinese with English abstract)
- [14] 黄艳, 郑宝东. 银耳微波真空干燥工艺优化的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 82—89.
- Huang Yan, Zheng Baodong. Study on optimization of microwave vacuum drying technology for *tremella fuciformis*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(20): 82—89. (in Chinese with English abstract)
- [15] 韩清华, 李树君, 马季威, 等. 微波真空干燥膨化苹果片的能耗与品质分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 74—77.
- Han Qinghua, Li Shujun, Ma Jiwei, et al. Analysis on energy consumption and product quality of microwave vacuum drying and puffing apple slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 74—77. (in Chinese with English abstract)
- [16] 邢淑婕, 刘开华. 不同干制方法对杏鲍菇品质的影响[J]. 食用菌学报, 2010, 17(1): 83—85.
- Xing Shujie, Liu Kaihua. Effect of different drying methods on the quality of *pleurotus eryngii* fruit bodies[J]. Acta Edulis Fungi, 2010, 17(1): 83—85. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘春泉, 严启梅, 江宁, 等. 杏鲍菇真空微波干燥特性及动力学模型[J]. 核农学报, 2012, 26(3): 494—498.
- Liu Chunquan, Yan Qimei, Jiang Ning, et al. Properties and dynamics model of vacuum microwave dried *Pleurotus eryngii*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(3): 494—498. (in Chinese with English abstract)
- [18] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 41—44.
- [19] 徐凤英, 李长友, 陈震. 荔枝在不同红外辐射源下真空干燥优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 147—150.
- Xu Fengying, Li Changyou, Chen Zhen. Optimization test of litchi vacuum drying under different infrared radiation sources[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 147—150. (in Chinese with English abstract)
- [20] 胡国庆. 毛豆热风与真空微波联合干燥过程研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006.
- Hu Guoqing. Study on Drying Process of Edamame by Hot-air and Vacuum Microwave Combination[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨薇, 欧又成, 张付杰, 等. 蘑菇热风、微波对流和微波真空干燥的对比试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 102—104.
- Yang Wei, Ou Youcheng, Zhang Fujie, et al. Comparative experiment on hot-air, microwave-convective and microwave-vacuum drying of mushroom[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 102—104. (in Chinese with English abstract)
- [22] Jayaraman K S, Das Gupta D K, Rao N B. Effect of pretreatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower[J]. International Journal of Food Science and Technology, 1990, 25(1): 47—60.
- [23] McMinn W A M, Magee T R A. Physical characteristics of dehydrated potatoes: Part II[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 33(1/2): 49—55.
- [24] 张国琛. 扇贝柱微波真空干燥机理及品质研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- Zhang Guochen. Studies on the Vacuum-microwave Drying of Scallop[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [25] Mousa N, Farid M. Microwave vacuum drying of banana slices[J]. Drying Technology, 2002, 20(10): 2055—2066.
- [26] Kaensup W, Chutima S, Wongwiset S. Experimental study on drying of chilli in a combined microwave-vacuum-rotary drum dryer[J]. Drying Technology, 2002, 20(10): 2067—2079.
- [27] Quezada P A, Borquez R M. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of foods[C]// 2<sup>nd</sup> Mercosur Congress on Chemical Engineering and 4<sup>th</sup> Mercosur Congress on Process Systems Engineering, 2005: 1—9.
- [28] Kmlis M, Kuehnert S, Leiker M. Influence of energy input and initial moisture on physical properties of microwave-vacuum dried strawberries[J]. European Food Research and Technology, 2005, 221(6): 803—809.
- [29] 陈团伟, 康彬彬, 陈绍军, 等. 远红外烘烤咸酥花生的工艺参数优化及品质分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 320—325.
- Chen Tuanwei, Kang Binbin, Chen Shaojun, et al. Optimized parameters and quality analysis of salty and crisp peanut by far-infrared roasting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 320—325. (in Chinese with English abstract)
- [30] 唐小俊, 池建伟, 张名位, 等. 苦瓜微波干燥工艺优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 68—73.
- Tang Xiaojun, Chi Jianwei, Zhang Mingwei, et al. Experimental study on microwave drying of *momordica charantia* L. slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 68—73. (in Chinese with English abstract)

## Optimized technology of *Pleurotus eryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption

Chen Jiankai<sup>1,2</sup>, Lin Hetong<sup>1,3\*</sup>, Lin Yifen<sup>1,3</sup>, Li Hui<sup>1,4</sup>, Wang Zhiyan<sup>1,3</sup>

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Department of Food and Bioengineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China; 3. Institute of Postharvest Technology of Agricultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 4. Department of Biological Science and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

**Abstract:** Microwave-vacuum experiments of *Pleurotus eryngii* were conducted in order to improve the quality of products and decrease the drying energy consumption. The effects of microwave power density ( $X_1$ ), material thickness ( $X_2$ ), absolute pressure chamber ( $X_3$ ) and the interaction of these three factors on color ( $Y_1$ ), rehydration ratio ( $Y_2$ ), amino acids ( $Y_3$ ) and unit energy consumption ( $Y_4$ ) were investigated in this study. The process parameters were optimized through the quadratic orthogonal rotary combination design with three factors and three levels. Linear weighting method was used to analyze comprehensive multi-objective optimization. The regression equations of four indexes were developed based on the experimental data and the optimal combination in process were obtained. The results showed that there were significant impacts of color, rehydration ratio, amino acids of *Pleurotus eryngii* and unit energy consumption from power density, material thickness and absolute pressure chamber. The major factor affecting on the color of *Pleurotus eryngii* was material thickness. The color of *Pleurotus eryngii* was poor when material thickness was less than 2 cm. The major factor affecting on rehydration ratio and amino acid of *Pleurotus eryngii* was absolute pressure chamber. The smaller absolute pressure chamber was beneficial to rehydration of dried *Pleurotus eryngii* and reduced the loss of amino acid of *Pleurotus eryngii* during drying. Microwave power density was the major factor affecting on the unit energy consumption. The energy consumption was high when *Pleurotus eryngii* was dried at high microwave power density. The combination of high microwave power density and small absolute pressure chamber could cause even higher energy consumption. The microwave power density of 12.5 kW/kg, material thickness of 2.4 cm and absolute pressure chamber of 18 kPa were the optimized parameters of microwave-vacuum dried *Pleurotus eryngii* with high-quality and low-energy consumption. Their product quality was excellent, the color was white (the value of color difference was 78), rehydration ratio (1.58) was appropriate, amino acids (473.1 mg/100 g) was less damaged, and unit energy consumption (9.3 kJ/kg) was lower.

**Key words:** fungi; drying; optimization; pleurotus eryngii; microwaves-vacuum drying; quality; energy consumption; parameter

(责任编辑: 刘丽英)