

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, 2019, 40(1): 125-132.

CHENG Hui, JI Changying, ZHANG Bo, et al. Optimization of drying process for *Lentinus edodes* by combing heat pump with vacuum [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1): 125-132.

# 香菇热泵-真空联合干燥工艺优化

程 慧, 姬长英, 张 波, 蒋思杰

(南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031)

**摘要:**【目的】降低加工成本、保证干制香菇的品质。【方法】在单因素试验基础上运用 Box-Behnken Design(BBD) 方法设计优化试验, 研究热泵温度 ( $A$ )、真空度 ( $B$ ) 和转换点含水率 ( $C$ ) 对单位能耗、感官评分、复水比和硬度的影响, 推导多项式回归模型, 优化联合干燥工艺条件, 并与单一热泵干燥, 单一真空干燥相比较。【结果】确定了最佳联合干燥工艺: 热泵温度  $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 真空度  $110\text{ Pa}$ , 转换点含水率 ( $w$ ) $56\%$ 。在此条件下实测得单位能耗  $345.01\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 、感官评分  $8.3$ 、复水比  $2.72$ 、硬度  $3.61\text{ N}$ ; 与预测值相近, 相对误差分别为  $0.19\%$ 、 $3.61\%$ 、 $1.47\%$  和  $1.66\%$ 。联合干燥的单位能耗比真空干燥减少  $37.69\%$ , 但高于热泵干燥; 其感官评分和复水比与真空干燥相近, 高于热泵干燥; 其硬度略大于真空干燥, 小于热泵干燥。【结论】热泵干燥和真空干燥相结合, 得到能耗低、质量好的干制香菇, 解决了热泵干燥品质不佳、真空干燥能耗高等问题, 可为香菇的热泵-真空联合干燥提供理论依据。

**关键词:** 香菇; 单位能耗; 热泵干燥; 真空干燥; 联合干燥; 优化

中图分类号: S375

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)01-0125-08

## Optimization of drying process for *Lentinus edodes* by combing heat pump with vacuum

CHENG Hui, JI Changying, ZHANG Bo, JIANG Sijie

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

**Abstract:** 【Objective】To reduce the cost of processing, and obtain high quality dried *Lentinus edodes*. 【Method】On the basis of single-factor experiment, Box-Behnken Design (BBD) was used to study the effects of heat pump temperature ( $A$ ), vacuum degree ( $B$ ) and conversion point moisture content ( $C$ ) on unit energy consumption, sense judgment, rehydration ratio and hardness. We deduced a multinomial regression model, optimized the combined drying technology and compared with single heat pump drying and single vacuum drying. 【Result】The optimal parameters were obtained as follows: The heat pump temperature was  $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the vacuum degree was  $110\text{ Pa}$ , and the conversion point moisture content was  $56\%$ . Under these conditions, the tested unit energy consumption was  $345.01\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ , the sense judgment was  $8.3$ , the rehydration ratio was  $2.72$ , and the hardness was  $3.61\text{ N}$ , which were close to the predicted values. The relative errors were  $0.19\%$ ,  $3.61\%$ ,  $1.47\%$  and  $1.66\%$  respectively. The unit energy consumption of combined drying was  $37.69\%$  less than that of vacuum drying and higher than that of heat pump drying. The sense judgment and rehydration ratio of combined drying were close to those of single vacuum drying and higher than those of heat pump drying. The hardness was slightly larger than that of vacuum drying and less than that of heat pump drying. 【Conclusion】The method combining heat pump drying and vacuum drying obtained dried *L. edodes* with low energy consumption and good quality. It solves the poor quality in heat pump drying and high energy consumption in vacuum drying.

收稿日期: 2018-04-11 网络首发时间: 2018-12-28 14:38:57

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20181227.1104.016.html>

作者简介: 程 慧 (1994—), 女, 硕士研究生, E-mail: [2578987606@qq.com](mailto:2578987606@qq.com); 通信作者: 姬长英 (1957—), 男, 教授, 博士, E-mail: [chyji@njau.edu.cn](mailto:chyji@njau.edu.cn)

基金项目: 江苏省重点研发计划 (SBE2015310266)

This study can provide a theoretical basis for heat pump-vacuum combined drying of *L. edodes*.

**Key words:** *Lentinus edodes*; unit energy consumption; heat pump drying; vacuum drying; combined drying; optimization

香菇 *Lentinus edodes* 又称花菇、香信、香蕈、冬菇、香菌, 为侧耳科植物香蕈的子实体, 作为世界第 2 大食用菌, 在我国食用菌种植产业中占有很大比例<sup>[1]</sup>, 在民间素有“山珍”之称。香菇具有提高免疫、降血压、降血脂、降胆固醇、防癌抗癌等功效, 且适合加工和烹调, 受到消费者的极大青睐。当前除了直接烹调用外, 香菇还被制成香菇酱、脆片等食品<sup>[2]</sup>。但是香菇中含有大量水分, 储藏时间短, 难以运输, 干制香菇可以很好地解决这个问题。

干燥过程对香菇的口感和储藏稳定性有很大影响, 因此研究干燥工艺显得尤为重要。目前, 普遍使用的干燥加工方法为热泵干燥, 此干燥方式热效率高<sup>[3]</sup>, 常用于胡萝卜<sup>[4]</sup>、毛竹笋<sup>[5]</sup>、红枣<sup>[6]</sup>、杏鲍菇<sup>[7]</sup>等果蔬, 但其存在多种缺陷, 如微生物以及细菌总数易超标<sup>[4]</sup>等; 真空干燥虽干燥时间长、成本高<sup>[8]</sup>, 但其干燥品质明显高于热泵干燥, 故常用于对品质要求较高果蔬, 如野生软枣猕猴桃<sup>[9]</sup>、黄秋葵<sup>[10]</sup>、雪莲果粉<sup>[11]</sup>、桑葚<sup>[12]</sup>等。目前, 关于香菇的热泵-真空联合干燥还鲜有报道。本文将这 2 种干燥方式结合起来, 进行分阶段干燥, 期望优势互补, 得到品质与真空干燥相近, 能耗又低于真空干燥的干制香菇。另外, 本文还利用响应面法优化香菇热泵-真空联合干燥工艺参数, 建立动力学模型, 并将试验结果与单一热泵干燥、单一真空干燥对比, 为联合干制香菇实际生产提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

新鲜香菇购于农贸市场, 挑选大小、菇头厚度相近且表面无明显破损的香菇作为试验样品。试验测定新鲜香菇的初始湿基含水率 ( $w$ ) 为  $(89.27 \pm 1)\%$ 。简单冲洗后, 放入冰箱内  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下保存待用。

### 1.2 试验方法

1.2.1 工艺流程 新鲜香菇→热泵干燥 (热泵干燥机: LAD-060 型, 徐州市海涛制冷设备有限公司)→真空干燥 (真空干燥机: LABCONCO FreeZone 型, 上海珂淮仪器有限公司), 最终湿基含水率 ( $w$ ) 在 13% 以下<sup>[7]</sup>→测定指标。

1.2.2 确定试验因素 香菇的热泵-真空联合干燥产品品质与很多因素有关, 如热泵干燥的风速、湿度、温度和真空干燥的真空度 (以下简称真空度)、温度以及装载量、转换点含水率等<sup>[13-16]</sup>。由于试验设备

限制, 很多参数都不可调, 所以固定热泵干燥风速为  $1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 湿度为 10%, 真空干燥冷阱温度为  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据王安建等<sup>[17]</sup>的研究,  $1\ 176\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  为热泵干燥的最优装载量, 本试验修正固定装载量为  $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。每次试验物料质量为  $1.2\text{ kg}$ , 当热泵干燥结束, 转为真空干燥时, 真空干燥铺料总面积为  $0.25\text{ m}^2$ 。

综上所述, 确定热泵温度、真空度和转换点含水率为试验的 3 个因素, 分别分析其对单位能耗、感官评分、复水比和硬度的影响。

1.2.3 单因素试验 用单因素试验法来确定因素 (热泵温度、真空度和转换点含水率) 的 0 水平。在装载量为  $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 热泵干燥风速为  $1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 湿度为 10%, 真空干燥冷阱温度为  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下, 分别进行试验, 记录各组的 4 项指标。试验分为 3 组, 共计 12 次联合干燥试验:

1) 先进行热泵干燥, 将热泵温度设置为 30、40、50、60  $^{\circ}\text{C}$ , 待含水率降至 55%, 停止热泵干燥, 转为真空干燥, 设置真空度为 100 Pa;

2) 先进行热泵干燥, 设置热泵温度为 50  $^{\circ}\text{C}$ , 待含水率降至 55%, 停止热泵干燥, 转为真空干燥, 将真空度设置为 50、75、100、125 Pa;

3) 先进行热泵干燥, 设置热泵温度为 50  $^{\circ}\text{C}$ , 待含水率降至 25、40、55、70%, 转为真空干燥, 真空度设置为 100 Pa。

1.2.4 响应面优化试验设计 采用 Box-Behnken Design (BBD) 试验设计方法, 以热泵温度 ( $A$ )、真空度 ( $B$ )、转换点含水率 ( $C$ ) 为自变量, 进一步研究这 3 个因素与联合干燥香菇产品单位能耗、感官评分、复水比和硬度的关系。试验因素水平见表 1。

1.2.5 对比试验 分别进行 3 次单独的热泵干燥 (温度 49  $^{\circ}\text{C}$ ) 和真空干燥试验 (真空度 110 Pa), 取均值得出单位能耗、感官评分、复水比和硬度, 并与联合干燥进行对比。

表 1 试验因素水平表

Table 1 Factor levels of the test

水平 Level	$\theta_{\text{热泵}}/^{\circ}\text{C}$ Heat pump temperature (A)	真空度/Pa Vacuum degree (B)	转换点含水率( $w$ )/% Conversion point moisture content (C)
-1	45	90	45
0	50	100	55
1	55	110	65

### 1.3 指标测定方法

1.3.1 含水率 含水率根据 GB 5009.3—2016<sup>[18]</sup>测得, 所用仪器为电热鼓风干燥箱 (101-A 型, 上海锦昱科学仪器有限公司)。

1.3.2 单位能耗 单位能耗为香菇每损失 1 个单位质量水分所消耗的电能。从经济效益出发, 单位能耗越小越好。根据电表读数来计算, 计算公式<sup>[19]</sup>为:

$$C = 3600(W_2 - W_1)/M, \quad (1)$$

式中,  $C$  为单位能耗,  $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $W_1$  和  $W_2$  分别为试验开始时和结束后的电表读数,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $M$  为干燥去除水

分总质量,  $\text{g}$ 。

1.3.3 复水比 复水比用质量的增加程度表示, 其值越大越好。将装有蒸馏水的烧杯放入  $40\text{ }^\circ\text{C}$  的恒温水浴锅 (HH-1 型, 金坛市城东超韵实验仪器厂) 中, 10 min 后将联合干燥后的香菇样品浸入蒸馏水 30 min(料液质量比为 1:30), 快速沥干, 测质量, 复水比 ( $R$ ) 计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$R = m_f/m_g, \quad (2)$$

式中,  $m_g$ 、 $m_f$  分别为香菇复水前、后的质量,  $\text{g}$ 。

1.3.4 感官评分 感官评分依据<sup>[19-21]</sup>见表 2。

表 2 香菇感官品质评价标准

Table 2 Evaluation standard of *Lentinus edodes* sensory quality

评分 Score	厚薄 Thickness	色泽 Color	肉质 Quality	香气 Aroma
8~10	内外均一	淡黄色, 色泽均匀	肉质紧密, 有脆感, 软硬适中	菇香浓郁, 气味怡人
4~8	内外基本均一	黄褐色, 色泽均匀	肉质紧密, 略有脆感	菇香一般, 气味不足
0~4	内外严重不均, 有薄有厚	深褐色, 色泽不均	肉质较软, 无脆感, 或口感较硬	菇香不明显, 有炭化味

1.3.5 硬度 将质构仪 (TMS—PRO 型, 美国食品特性研究开发机构 FTC) 设置为 TPA 测量模式, 测前和测后速度为  $8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 测试最大距离为 20 mm, 测试速度为  $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 每组测 10 次, 每次间隔时间为 5 s, 求平均值, 得硬度指标<sup>[22]</sup>。

### 1.4 数据处理

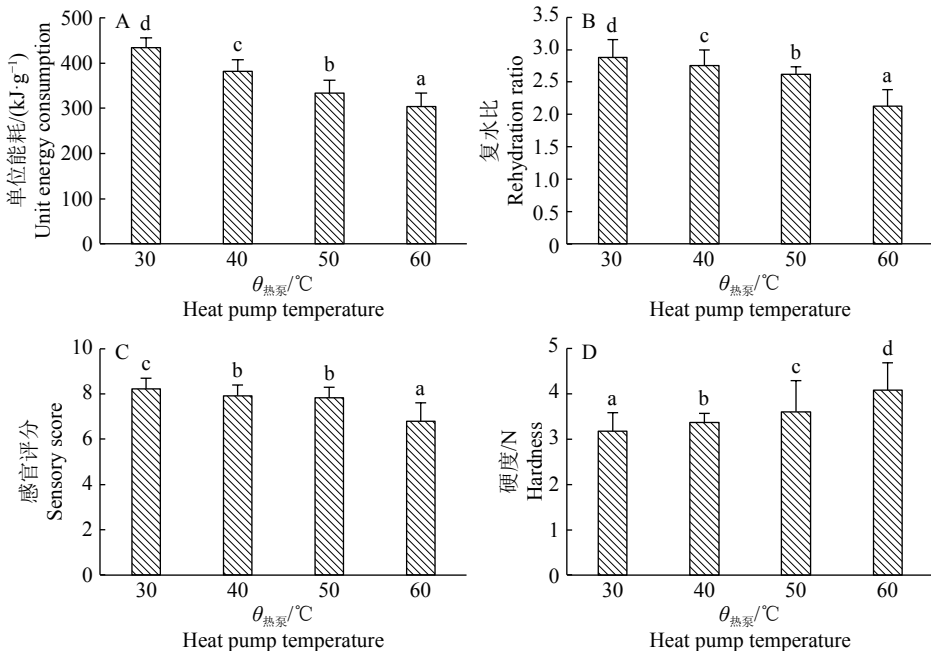
运用 Excel、Spss 和 Design-Expert.8.05b 软件

对香菇热泵-真空干燥试验数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

2.1.1 不同热泵温度对香菇干燥效果的影响 单因素第 1 组试验结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 热泵温度从  $30\text{ }^\circ\text{C}$  增加到  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , 单位能耗和复



各图中, 柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ , Duncan's 法)

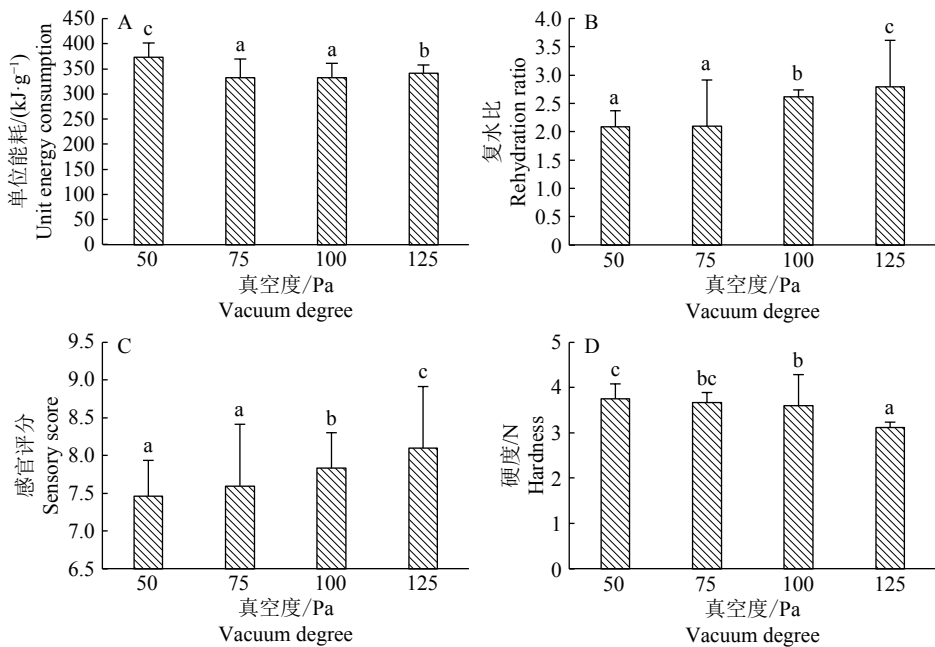
In each figure, different lowercase letters on the bars indicated significant difference ( $P < 0.05$ , Duncan's test)

图 1 热泵温度对香菇单位能耗、感官评分、复水比和硬度的影响

Fig. 1 The influences of heat pump temperature on unit energy consumption, sensory score, rehydration ratio and hardness of *Lentinus edodes*

水比显著降低, 感官评分下降, 硬度显著提高。温度过高, 香菇的内部结构受到破坏, 出现干燥不均匀现象, 故在 60 °C 时, 香菇的感官评分和复水比下降, 并且部分产品会因酶促和非酶促反应而出现褐变, 产生褐色硬荚, 导致硬度上升, 质量变差。这与 Jayaraman 等<sup>[23]</sup>的结论相符, 其研究发现在干燥过程中, 果蔬因内部结构遭到破坏而吸水性能减弱, 复水比下降。50 °C 时的单位能耗与 60 °C 时相近, 而且其他 3 项指标明显优于后者, 因此选择 50 °C 作为热泵温度的 0 水平。

2.1.2 不同真空度对香菇干燥效果的影响 单因素第 2 组试验结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,



各图中, 柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ , Duncan's 法)

In each figure, different lowercase letters on the bars indicated significant difference ( $P < 0.05$ , Duncan's test)

图 2 真空度对香菇单位能耗、感官评分、复水比和硬度的影响

Fig. 2 The influences of vacuum degree on unit energy consumption, sensory score, rehydration ratio and hardness of *Lentinus edodes*

2.1.3 不同转换点含水率对香菇干燥效果的影响

单因素第 3 组试验结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 随着转换点含水率的增加, 单位能耗显著增大。这是因为热泵干燥的能耗远小于真空干燥, 真空干燥时间越长, 其单位能耗也越大; 其次, 转换点含水率越大, 说明香菇由热泵转为真空干燥的水分比例就越大, 这对感官评分、复水比和硬度都有积极的影响 (各自组内都具有显著差异性)。虽然转换点含水率为 70% 时的复水比和感官评分都达到最高值, 表面无明显硬荚, 硬度小, 但其单位能耗也最大, 然而转换点含水率为 55% 时的感官评分、复水比和硬度与 70% 时相近且单位能耗低, 因此选择

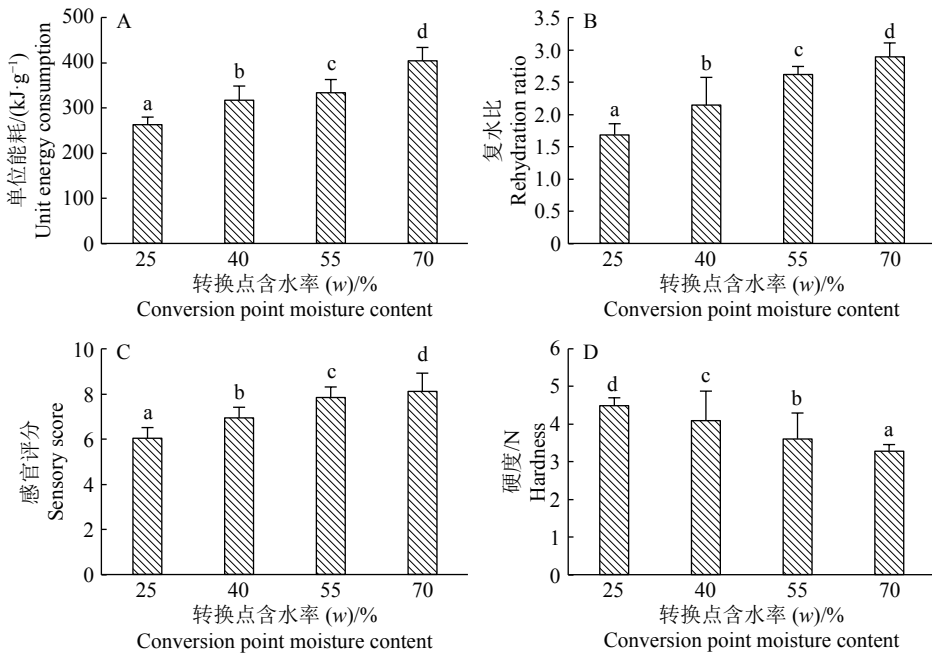
真空度从 50 Pa 增加到 100 Pa, 单位能耗下降, 但增加到 125 Pa 时, 干燥罐内的气压过小, 空气过于稀薄, 影响了水分传递进程, 导致单位能耗显著上升; 随着真空度加大, 感官评分和复水比增加, 硬度下降 (真空度为 75 Pa 时, 其硬度与 50 和 100 Pa 时无显著差异性, 但是 50 和 100 Pa 之间差异显著), 这是因为干燥罐内气压下降, 空气含量减少, 减轻了香菇的氧化程度, 香菇也较易形成疏松多孔的结构<sup>[24]</sup>。虽然真空度为 125 Pa 时的感官评分和复水比最高, 硬度小, 但是单位能耗为本研究最先考虑指标, 因此选择 100 Pa 作为真空度的 0 水平。

55% 作为转换点含水率的 0 水平。

## 2.2 香菇联合干燥工艺参数的优化

为了得到更加精确的干燥工艺条件, 使用 Design-Expert.8.05b 软件, 设计了 3 因素 3 水平响应面分析试验, 试验设计及结果如表 3 所示。由表 3 可以看出, 第 12 组试验条件下的单位能耗最低, 第 11 组试验条件下的感官评分最高, 第 3 组试验条件下的复水比最大, 第 3 组试验条件下的硬度最小。

2.2.1 单响应指标回归分析 通过 Design-Expert.8.05b 软件, 对单位能耗 ( $Y_1$ )、感官评分 ( $Y_2$ )、复水比 ( $Y_3$ ) 和硬度 ( $Y_4$ ) 进行回归分析, 得到各自的二次



各图中, 柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ , Duncan's 法)

In each figure, different lowercase letters on the bars indicated significant difference ( $P < 0.05$ , Duncan's test)

图 3 转换点含水率对香菇单位能耗、感官评分、复水比和硬度的影响

Fig. 3 The influences of conversion point moisture content on unit energy consumption, sensory score, rehydration ratio and hardness of *Lentinus edodes*

表 3 试验设计及结果

Table 3 Experimental design and result

序号 No.	$\theta_{\text{热泵}}/^\circ\text{C}$ Heat pump temperature (A)	真空度/Pa Vacuum degree (B)	转换点含水率(w)% Conversion point moisture content (C)	单位能耗/(kJ·g <sup>-1</sup> ) Unit energy consumption (Y <sub>1</sub> )	感官评分 Sensory score (Y <sub>2</sub> )	复水比 Rehydration ratio (Y <sub>3</sub> )	硬度/N Hardness (Y <sub>4</sub> )
1	50	100	55	333.54	7.7	2.59	3.62
2	50	90	60	356.09	8.1	2.70	3.34
3	45	100	60	375.56	8.3	2.84	3.27
4	50	100	55	330.68	7.7	2.62	3.63
5	50	100	55	336.35	7.8	2.58	3.62
6	55	90	55	329.19	7.3	2.50	3.74
7	55	110	55	336.17	7.5	2.54	3.70
8	45	90	55	343.52	7.6	2.65	3.69
9	50	110	50	320.37	7.1	2.57	3.79
10	50	100	55	337.21	7.9	2.61	3.64
11	50	110	60	365.84	8.5	2.76	3.31
12	55	100	50	315.88	7.0	2.41	3.86
13	45	110	55	350.33	7.9	2.67	3.63
14	45	100	50	343.81	7.5	2.56	3.75
15	50	90	50	321.55	7.3	2.42	3.82
16	50	100	55	330.62	7.8	2.60	3.65
17	55	100	60	358.85	8.0	2.61	3.39

回归方程 (表 4)。分析表 4 中的数据可知: 单位能耗 ( $Y_1$ ) 回归方程的显著性  $F$  值为 42.94, 对应的  $P_F < 0.000 1$ , 说明此模型拟合性极显著; 失拟性  $F_{L_f}$  为

1.39, 对应的  $P_{F_{L_f}}$  为 0.368 2 ( $P_{F_{L_f}} > 0.05$ ), 说明失拟性不显著, 在试验范围内误差较小, 回归模型与实际情况拟合程度很高。  $R^2$  越接近 1, 模型拟合度越好,

表 4 单指标回归方程及分析结果

Table 4 The regression equation of single index and analysis result

指标 Indicator	模型方程 <sup>1)</sup> Model equation	F	P <sub>F</sub>	失拟项 Lack of fit		R <sup>2</sup>
				F <sub>Lf</sub>	P <sub>F<sub>Lf</sub></sub>	
单位能耗 Unit energy consumption (Y <sub>1</sub> )	Y <sub>1</sub> =333.68-9.14X <sub>1</sub> +2.80X <sub>2</sub> +19.34X <sub>3</sub> +0.042X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> + 2.81X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> +2.73X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> +6.84X <sub>1</sub> <sup>2</sup> -0.72X <sub>2</sub> <sup>2</sup> +8.00X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	42.94	<0.000 1	1.39	0.368 2	0.982 2
感官评分 Sensory score(Y <sub>2</sub> )	Y <sub>2</sub> =7.71-0.19X <sub>1</sub> +0.088X <sub>2</sub> +0.50X <sub>3</sub>	38.03	<0.000 1	3.79	0.106 0	0.897 7
复水比 Rehydration ratio(Y <sub>3</sub> )	Y <sub>3</sub> =2.60-0.082X <sub>1</sub> +0.034X <sub>2</sub> +0.12X <sub>3</sub>	77.42	<0.000 1	3.94	0.099 7	0.947 0
硬度 Hardness(Y <sub>4</sub> )	Y <sub>4</sub> =3.63+0.044X <sub>1</sub> -0.020X <sub>2</sub> -0.24X <sub>3</sub> +0.005X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> + 0.002 5X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> +0.030X <sub>1</sub> <sup>2</sup> +0.028X <sub>2</sub> <sup>2</sup> -0.095X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	167.40	<0.000 1	3.38	0.134 9	0.995 4

1) X<sub>1</sub>: θ<sub>热泵</sub>/°C; X<sub>2</sub>: 真空度/Pa; X<sub>3</sub>: 转换点含水率 (w)/%

1) X<sub>1</sub>: Heat pump temperature; X<sub>2</sub>: Vacuum degree; X<sub>3</sub>: Conversion point moisture content

单位能耗 (Y<sub>1</sub>) 回归方程的 R<sup>2</sup> 为 0.982 2, 表明此模型可以解释响应值 98.22% 的变化。综上所述, 此模型方程可以很好地分析和预测单位能耗指标。同理, 对其他 3 个模型方程进行 P<sub>F</sub>、P<sub>F<sub>Lf</sub></sub> 和 R<sup>2</sup> 分析, 可知, 这 3 个模型方程都可以对感官评分、复水比和硬度进行很好地预测和分析。

另外, 通过比较各模型方程回归系数绝对值的大小可以得出结论: 转换点含水率 (C)、热泵温度 (A)、真空度 (B) 对单位能耗 (Y<sub>1</sub>) 影响的主次顺序为 C > A > B; 对感官评分 (Y<sub>2</sub>) 影响的主次顺序为 C > A > B; 对复水比 (Y<sub>3</sub>) 影响的主次顺序为 C > A > B; 对硬度 (Y<sub>4</sub>) 影响的主次顺序为 C > A > B。

利用 Design-Expert.8.05b 软件可以对相关数据进行优化, 要求单位能耗 (Y<sub>1</sub>) 和硬度 (Y<sub>4</sub>) 在试验条件下达到最小值, 感官评分 (Y<sub>2</sub>) 和复水比 (Y<sub>3</sub>) 在试验条件下达到最大值, 各指标的单指标优化结果如表 5 所示。

由表 5 可知: 较高的热泵温度, 较低的真空度

以及较低的转换点含水率可以降低单位能耗, 当热泵温度为 54.35 °C、真空度为 90.00 Pa、转换点含水率为 50% 时, 单位能耗最低, 为 316.31 kJ·g<sup>-1</sup>; 较低的热泵温度, 较高的真空度以及较高的转换点含水率可以提高感官评分, 当热泵温度为 45 °C、真空度为 110 Pa、转换点含水率为 60% 时, 感官评分最高, 为 8.5; 较低的热泵温度, 较高的真空度以及较高的转换点含水率可以提高复水比, 当热泵温度为 45 °C、真空度为 110 Pa、转换点含水率为 60% 时, 复水比最高, 为 2.84; 较低的热泵温度, 较高的真空度以及较高的转换点含水率可以减小硬度, 当热泵温度为 46.01 °C、真空度为 104.37 Pa、转换点含水率为 60% 时, 硬度最低, 为 3.28 N。

2.2.2 综合工艺参数优化 分析表 5 可知, 较高的热泵温度虽然可以降低单位能耗, 但是不能保证高感官评分、高复水比和低硬度; 真空度和转换点含水率对这 4 个指标也有类似的影响。所以, 需对这 4 个指标函数进行综合优化分析, 寻找最佳工艺条件。

表 5 指标回归方程优化结果

Table 5 The optimization result of index regression equation

项目 Item	工艺参数优化组合 Optimized combination of technology parameters			优化结果 Optimized result			
	θ <sub>热泵</sub> /°C Heat pump temperature (A)	真空度/Pa Vacuum degree (B)	转换点含水率(w)/% Conversion point moisture content (C)	单位能耗/(kJ·g <sup>-1</sup> ) Unit energy consumption (Y <sub>1</sub> )	感官评分 Sensory score (Y <sub>2</sub> )	复水比 Rehydration ratio (Y <sub>3</sub> )	硬度/N Hardness (Y <sub>4</sub> )
单指标 Single index	54.35	90.00	50.00	316.31			
	45.00	110.00	60.00		8.5		
	45.00	110.00	60.00			2.84	
	46.01	104.37	60.00				3.28
综合指标 Comprehensive index	49.26	110.00	56.48	344.35	8.0	2.68	3.55

本文以降低加工成本为主要目的,其次,考虑到干制香菇在销售过程中消费者对感官品质的要求,故单位能耗最重要,感官评分次之;复水比和硬度在评价干制产品品质中也十分重要,但略次于前2个指标。所以将这4个指标的重要性设置为4:3:2:1。优化后的工艺条件为:热泵温度49.26℃,真空度110 Pa,转换点含水率56.48%。在此条件下,单位能耗为344.35 kJ·g<sup>-1</sup>,感官评分为8.0,复水比为2.68,硬度为3.55 N(表5)。

为了便于实际生产,将工艺条件修正为热泵温度49℃,真空度110 Pa和转换点含水率56%。按照优化修正后的工艺条件进行3组平行验证试验,取平均值,测得单位能耗为345.01 kJ·g<sup>-1</sup>,感官评分为8.3,复水比为2.72,硬度为3.61 N,与预测值相近,相对误差分别为0.19%、3.61%、1.47%和1.66%。

因此,上述工艺条件可行。

### 2.3 香菇的单一干燥和联合干燥比较

由表6可知,联合干燥的单位能耗比真空干燥减少37.69%,但高于热泵干燥;单一热泵干燥后的香菇皱缩,边缘出现焦化,内部结构受到破坏<sup>[25-28]</sup>,导致其感官评分低、复水比低、硬度高,而单一真空干燥和联合干燥尽可能地保证了香菇内部结构的完整,故这2种干燥方式的复水比相近且高于热泵干燥;另外,联合干燥前期为热泵干燥,热泵干燥中的美拉德反应使香菇散发出香味<sup>[29]</sup>,再经过真空干燥,颜色和硬荚变得均匀,所以联合干燥的感官评分得以提高。

综上所述,联合干燥可以得到能耗低于真空干燥,品质与真空干燥相近的干制香菇。

表6 各干燥方式比较<sup>1)</sup>

Table 6 Comparison of different drying methods

干燥方式 Drying method	单位能耗/(kJ·g <sup>-1</sup> ) Unit energy consumption (Y <sub>1</sub> )	感官评分 Sensory score (Y <sub>2</sub> )	复水比 Rehydration ratio (Y <sub>3</sub> )	硬度/N Hardness (Y <sub>4</sub> )
热泵干燥 Heat pump drying	289.22±2.92a	6.4±0.05a	1.45±0.02a	4.50±0.03c
真空干燥 Vacuum drying	553.67±2.59c	8.5±0.82c	2.62±0.03b	3.21±0.03a
联合干燥 Combined drying	345.01±1.63b	8.3±0.47b	2.72±0.02b	3.61±0.03b

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ , Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicated significant difference ( $P<0.05$ , Duncan's test)

## 3 讨论与结论

香菇在干燥过程中的水分扩散分为外扩散和内扩散,这2种扩散方式同时进行,既相辅相成,也相互制约,其扩散速度差影响着干燥品质<sup>[30]</sup>。热泵干燥后期水分分布不均,香菇内外水分扩散速度相差较大,内部水分未能及时转移到物料表面,使表面较易形成硬荚;真空干燥的单位能耗较高,排湿效果差,设备成本决定了其规模难以扩大,但在干燥过程中内外水分分布均匀,干燥后的香菇品质较好。热泵-真空联合干燥结合了2种干燥方式的优点,降低了干燥中的内外扩散速度差,不易形成硬荚,很好地保留了香菇的色、香、味,减少了单位能耗。本试验在固定的冷阱温度、热泵风速和湿度下进行,具有一定的局限性。

本研究确定最佳联合干燥工艺为热泵温度49℃,真空度110 Pa和转换点含水率56%,在此条件下实

测得单位能耗345.01 kJ·g<sup>-1</sup>,感官评分8.3,复水比2.72,硬度3.61 N,与预测值相近,相对误差分别为0.19%、3.61%、1.47%和1.66%。联合干燥的单位能耗比真空干燥减少37.69%,但高于热泵干燥;其感官评分和复水比与真空干燥相近,高于热泵干燥;其硬度略大于真空干燥,小于热泵干燥。热泵干燥和真空干燥相结合,充分利用两者的优点,得到了能耗低、质量好的干制香菇。解决了热泵干燥品质不佳、真空干燥能耗高等问题,本研究可为香菇的热泵-真空联合干燥提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 陈前江. 我国香菇产业链的经济学分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [2] 戚玉欣, 陶志国. 空气源热泵干燥技术的研究现状与发展展望[J]. 资源节约与环保, 2016(5): 69.
- [3] 聂林林, 张国治, 王安建, 等. 热泵干燥对香菇品质特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015,

- 36(6): 59-63.
- [4] 徐建国, 徐刚, 张森旺, 等. 热泵-热风分段式联合干燥胡萝卜片研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(12): 230-235.
- [5] 徐艳阳. 毛竹笋真空冷冻与热风联合干燥研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- [6] 高飞. 微波、远红外、真空冷冻及其与热风联合干燥对红枣品质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013.
- [7] 孙翠, 王钰, 沈小瑞, 等. 杏鲍菇热风-真空冷冻干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 189-193.
- [8] 邵平, 薛力, 陈晓晓, 等. 热风真空联合干燥对银耳品质及其微观结构影响[J]. 核农学报, 2013, 27(6): 805-810.
- [9] 孙海涛, 金昱言, 邵信儒, 等. 真空干燥对野生软枣猕猴桃果脯感官品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 82-87.
- [10] 刘文超, 段续, 任广跃, 等. 黄秋葵真空干燥行为及干燥参数的响应面试验优化 (英文)[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 29-39.
- [11] 石启龙, 赵亚, 马占强. 真空干燥雪莲果粉玻璃化转变温度与贮藏稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 215-219.
- [12] 张慧恩, 李巧珍, 黄毅. 桑葚真空干燥工艺参数的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2011(2): 57-59.
- [13] TAMAS A, JUDIT T T, ZOLTAN C, et al. Comparison of drying and quality characteristics of pear (*Pyrus communis* L.) using mid-infrared-freeze drying and single stage of freeze drying[J]. Int J Food Eng, 2017, 13(4): 322-336.
- [14] 龙成树, 刘清化, 李浩权, 等. 响应面法优化桑叶热泵干燥速率模型[J]. 现代农业装备, 2016(5): 24-32.
- [15] 关志强, 郑立静, 李敏, 等. 罗非鱼片热泵-微波联合干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 270-275.
- [16] 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.
- [17] 王安建, 刘丽娜, 魏书信, 等. 响应面法优化香菇热泵干燥工艺[J]. 食品科技, 2016, 41(3): 62-66.
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中水分的测定: GB5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [19] 陈君琛, 杨艺龙, 翁敏劫, 等. 即食杏鲍菇热风-真空联合干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 331-338.
- [20] 王冬, 邹康平. 干香菇复水性的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2014(19): 35.
- [21] 姬长英, 蒋思杰, 张波, 等. 辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 296-302.
- [22] 胡庆国. 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.
- [23] 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]. Int J Food Sci Technol, 1990, 25(1): 47-60.
- [24] 吴明晖, 余勇, 郭磊, 等. 真空与热风联合干燥香菇的研究[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(2): 29-33.
- [25] 高伦江, 曾顺德, 李晶, 等. 热风微波联合干制对香菇品质及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 80-83.
- [26] SEYFI S, MUSTAFA A, HIKMET D, et al. Mushroom drying with solar assisted heat pump system[J]. Energy Convers Manage, 2013, 72(8): 171-178.
- [27] 黎斌, 彭桂兰, 罗传伟, 等. 油菜籽真空干燥工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(12): 105-110.
- [28] 张绪坤. 热泵干燥热力学分析及典型物料干燥性能研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [29] 芮汉明, 贺丰霞, 郭凯. 香菇干燥过程中挥发性成分的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(8): 255-259.
- [30] 徐建国, 徐刚, 张绪坤, 等. 利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 271-276.

【责任编辑 李晓卉】