

# 香菇分段变温红外喷动床干燥工艺参数优化

段续<sup>1,2</sup>, 徐一铭<sup>1</sup>, 任广跃<sup>1,2</sup>, 李琳琳<sup>1</sup>, 侯志昀<sup>1</sup>, 赵梦月<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023; 2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 郑州 450001)

**摘要:** 为获得节能低耗和品质较优的干香菇, 利用红外喷动床干燥设备, 对香菇分段变温干燥工艺进行试验研究。在单因素试验基础上运用 Box-Behnken Design 优化试验, 研究前期风温、转换点含水率和后期风温对单位能耗、粗多糖含量、亮度  $L^*$  值和收缩率的影响, 通过加权综合评分法推导多项式回归模型, 优化红外喷动床干燥工艺参数。经响应面优化的干燥参数为: 前期风温 56.00 °C、转换点含水率 53.00%、后期风温 72.00 °C, 该工艺下单位能耗为 143.52 kJ/g、粗多糖含量 9.98 mg/g、亮度  $L^*$  值 68.11、收缩率 83.15%, 综合评分值为 35.37, 与预测值拟合度高达 99.27%, 表明应用红外喷动床干燥取得的香菇制品能满足当前香菇干燥的发展趋势及需求, 为香菇干制品的综合应用及生产加工提供参考。

**关键词:** 干燥; 品质控制; 工艺优化; 香菇; 红外喷动床干燥; 单位能耗

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.034

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-19-0293-10

段续, 徐一铭, 任广跃, 等. 香菇分段变温红外喷动床干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 293-302.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.034 <http://www.tcsae.org>

Duan Xu, Xu Yiming, Ren Guangyue, et al. Optimization of the drying process parameters for lentinus edodes in segment variable temperature infrared assisted spouted bed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 293-302. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.034 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

香菇, 富含蛋白质、维生素、多糖和多酚类等物质, 味道鲜美且香气独特, 深受广大消费者喜爱, 是著名的食药兼用菌<sup>[1-2]</sup>。大量研究证明香菇多糖具有抗肿瘤、调节免疫、抗衰老、抗氧化和防辐射等功效<sup>[2]</sup>。鲜香菇初始含水率高达 80% (湿基) 以上, 采收后新鲜度下降快, 易引起菌褶褐变、菇体萎缩和霉变等问题, 进而影响香菇的风味和商品价值。故鲜香菇不易贮存, 干燥能延长香菇的货架期。目前, 香菇常用的干燥方法主要有热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、红外干燥、热泵干燥以及联合干燥技术等<sup>[3]</sup>。

其中红外辐射加热干燥技术被广泛应用于食品加工中, 如油菜蜂花粉<sup>[4]</sup>、胡萝卜<sup>[5]</sup>、桑葚<sup>[6]</sup>等, 具有干燥效率高、产品质量佳等优点<sup>[7]</sup>。但该技术存在一定的局限性, 如红外辐射能耗大、成本高<sup>[8]</sup>、穿透度低、多层干燥物料时导致干燥不均匀等<sup>[9]</sup>。物料内部结构的含水率大于外部结构, 采用红外干燥时水分由内向外进行扩散, 物料内部温度比表面温度高, 因此易造成物料受热不够均匀。为改善这一问题, 合理地将红外辐射干燥与其他干燥技术相结合, 如喷动床干燥技术。喷动床干燥的设备结构简单易操作<sup>[10]</sup>、干燥均匀性好、传热传质速率高<sup>[11]</sup>。相

关研究证明, 红外联合喷动床干燥设备干燥时间短, 能降低干燥能耗<sup>[12]</sup>。将红外干燥与喷动床干燥相结合, 不仅改善红外干燥设备存在的高耗能, 红外喷动床热损失大等问题, 也可利用喷动床干燥的优点提高红外加热的均匀性, 保持产品品质<sup>[13]</sup>。

相关研究表明, 当前虽存在多种香菇干燥技术, 但传统的干燥设备难以满足能耗及品质方面的优质高效, 此外, 对干燥工艺及技术方法进行优化也是目前香菇干燥的需求之一<sup>[14]</sup>。开发利用节能环保且低投入高产出的新型联合干燥装备是香菇干燥的发展趋势, 联合干燥既能提高干燥效率, 又能提高物料的品质, 促进相关产业的发展<sup>[15]</sup>。本试验采取红外与喷动床联合的新型干燥技术, 对香菇干燥工艺及技术方法进行优化, 以期得到节能低耗和优质的干香菇。通过在单因素试验基础上运用 Box-Behnken Design 优化试验<sup>[16]</sup>, 研究前期风温、转换点含水率和后期风温对香菇干燥的单位能耗、粗多糖含量、亮度  $L^*$  值和收缩率的影响, 在节能保质前提下以期得到香菇优化干燥工艺参数, 提高香菇的商用价值, 为相关研究提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜香菇购于洛阳市大张超市。硫酸、无水乙醇、苯酚、葡萄糖 (均为分析纯), 洛阳奥龙化玻公司。

### 1.2 仪器与设备

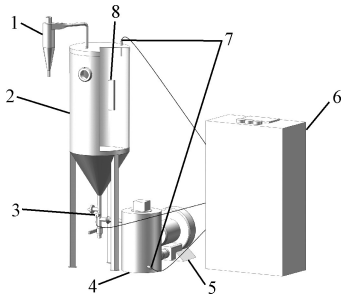
本研究所用的红外喷动床由实验室自制, 设备结构如图 1 所示。

收稿日期: 2021-06-24 修订日期: 2021-08-20

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“现代食品加工及粮食储运技术与装备”(2017YFD0400901)。

作者简介: 段续, 博士, 教授, 研究方向为农产品加工。

Email: duanxu\_dx@163.com



1.旋风分离器 2.喷动床干燥箱 3.风速传感器 4.加热罐 5.鼓风机 6.控制柜 7.温度传感器 8.红外辐射板  
1.Cyclone separator 2.Spray bed drying oven 3.Wind speed sensor 4.Heating tank 5.Blower 6.Control cabinet 7.Temperature sensor 8.Infrared radiation plate

图 1 红外喷动床结构图  
Fig.1 Structure diagram of infrared spouted bed

其他仪器与设备：X-rite Color I5 色差仪，美国爱色丽公司；101 型电热恒温鼓风干燥箱、HH-S4 型电热恒温水浴锅，北京科伟永兴仪器有限公司；JA-2003N 型电子天平，上海佑科仪器仪表有限公司；BCD-565WT/B 型电冰箱，北京海信电器有限公司；FA1004 型分析天平，上海上平仪器公司；UV2006A 型紫外可见分光光度计，尤尼柯（上海）仪器有限公司；KQ-500DE 型数控超声波清洗器，昆山市超声仪器有限公司；H1850R 型高速冷冻离心机，湖南湘仪离心机有限公司；FLIR I7 红外热像仪，深圳市仪达智能科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 工艺流程

新鲜香菇→清洗→去柄→切丁→红外喷动床干燥→粉碎过筛→指标测定。具体如下：挑选无霉变、虫蛀，菌盖大小均匀、表面无皱痕的香菇样品用于干燥试验。将香菇去柄，采用 12 mm×12 mm×12 mm（长×宽×高）的切丁器处理。干燥开始前，将红外功率设置为 1 000 W，波长设置为 10 μm<sup>[13]</sup>。每组取 200 g 投放到红外喷动床内，以含水率低于 13%为干燥终点<sup>[17-18]</sup>。经粉碎过筛，放置密封袋中备用。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。

1.3.2 确定试验因素

香菇红外喷动床干燥与诸多因素有关，如出风温度、出风风速等。具体操作如下，将 200 g 切丁后的新鲜香菇投放至红外喷动床内，在预试验中设置风温为 60 ℃<sup>[14-19]</sup>，分别在出风风速为 7.0、7.5、8.0、8.5 m/s 下进行试验，得到当出风风速为 8.0 m/s 时，样品的综合评分值较高，因此固定出风风速为 8.0 m/s。在预试验干燥过程中，样品处于含水率 50%~60%时形态变化明显，因此设定转换点含水率为 45%、50%、55%、60%、65%进行试验。本试验以前期风温、转换点含水率和后期风温为因素，分别分析其对香菇单位能耗、粗多糖含量、亮度  $L^*$  值和收缩率的影响。干燥过程中的物料温度由红外热像仪进行测定。

1.3.3 单因素试验设计

用单因素试验<sup>[16]</sup>来分析前期风温、转换点含水率和

后期风温对香菇品质的综合影响。在出风风速为 8.0 m/s 条件下分别进行试验，试验分为 3 组，每组 3 次平行，记录各组的 4 项指标。

前期风温设置：40、45、50、55、60 ℃，待含水率降至 55%，转至后期风温 60 ℃进行干燥。

后期风温设定：前期风温为 50 ℃，待含水率降至 55%，设置后期风温为 60、65、70、75、80 ℃。

转换点含水率设定：设置前期风温为 50 ℃，待含水率降至 40%、45%、50%、55%、60%、65%，转为后期风温 60 ℃。为和单因素前期风温保持一致，设置后期风温为 60 ℃。

1.3.4 响应面优化设计

根据单因素试验数据分析结果，在单因素试验基础上，根据 Box-Behnken 试验设计原理，以前期风温（A）、转换点含水率（B）、后期风温（C）3 个影响香菇红外喷动床干燥的主要因素为自变量，研究其与单位能耗、粗多糖含量、亮度  $L^*$  值和收缩率的关系。根据单因素试验，确定了各个试验因素，试验因素水平见表 1。

表 1 试验因素水平表  
Table 1 Factors and levels of the test

| 水平<br>Levels | 前期风温<br>Early wind temperature<br>A/℃ | 转换点含水率<br>Water content at<br>conversion point B/% | 后期风温<br>Late wind temperature<br>C/℃ |
|--------------|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| -1           | 40                                    | 45   | 60                                   |
| 0            | 50                                    | 55   | 70                                   |
| 1            | 60                                    | 65   | 80                                   |

1.4 指标测定

1.4.1 含水率的测定

依据 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》<sup>[20]</sup>测定香菇的初始含水率为 89.06%。

1.4.2 单位能耗的测定

干燥能耗为干燥 1 g 水分的能耗（kJ），干燥过程的总脱水量和干燥能耗参考张迎敏等<sup>[16]</sup>的方法。

按公式（1）、（2）进行计算。

$$m_1 = m \frac{C_1 - C_2}{1 - C_1} \tag{1}$$

$$W = \frac{3600P_0t}{m_1} \tag{2}$$

式中  $m_1$  为脱水量，g； $m$  为干燥终点样品质量，g； $C_1$  为初始湿基含水率，%； $C_2$  为最终湿基含水率，%； $W$  为干燥能耗，kJ/g； $P_0$  为功率，kW； $t$  为时间，h。

1.4.3 粗多糖含量的测定

粗多糖含量的测定参考参照 NY/T 1676-2008《食用菌中粗多糖含量的测定》<sup>[21]</sup>，单位为 mg/g，结果均以干质量计<sup>[22]</sup>。

1.4.4 色泽的测定

采用 XT-I5 型色差仪测定各试验组的亮度值  $L^*$ 、红绿值  $a^*$ 、黄蓝值  $b^*$ ，按公式计算彩度（ $C^*$ ）<sup>[22]</sup>。每组样品测量 3 次，取平均值。

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

#### 1.4.5 收缩率的测定

尺寸收缩率<sup>[23]</sup>采用游标卡尺分别测定干燥前后香菇丁的厚度。干燥前随机选 5 个香菇样品, 分别从 3 个不同的方向进行测量并标记, 干燥结束后再次测量相应位置的尺寸, 按照公式 (4) 计算。

$$\text{收缩率} = \frac{d_0 - d_t}{d_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $d_0$  和  $d_t$  分别为干燥前后香菇的厚度, mm。

#### 1.4.6 加权综合评分法

本研究主要是探究一种节能保质的香菇干燥方式, 故将单位能耗、粗多糖含量、亮度  $L^*$  值、收缩率这 4 个指标的重要性比例设为 4:3:2:1 进行工艺优化, 根据公式计 (5) 和 (6) 计算综合评分, 其中  $\sum w_j = 1$ , 设  $y_{j\max}$  对应 100 分,  $y_{j\min}$  对应 0 分, 越小越好的指标前应为负号, 综合指标越大越好<sup>[24]</sup>, 单位能耗和收缩率都是越小越好, 因此在计算综合指标时应在单位能耗和收缩率指标前加负号。

$$y_{ij} = \frac{y_{ij} - y_{j\min}}{y_{j\max} - y_{j\min}} \times 100 \quad (5)$$

$$y'_i = \sum w_j y'_{ij} \quad (6)$$

式中  $y_{ij}$  为实际指标值;  $w_j$  为指标的加权系数;  $y'_{ij}$  为单个指标评分值;  $y'_i$  为综合评分值。

#### 1.4.7 数据分析

运用 Origin 8.5、SPSS 20.0 和 Design-Expert 8.0 软件对试验数据进行分析并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

#### 2.1.1 前期风温对香菇品质的影响

由图 2 可知, 香菇经红外喷动床干燥后粗多糖含量随前期风温的升高逐渐增大, 在 60 °C 时达到最大值 9.33 mg/g, 与戈永慧等<sup>[25]</sup>、王娅等<sup>[26]</sup>研究相比, 经红外喷动床干燥的香菇中粗多糖保留率有所提升。香菇粗多糖含量与加热温度<sup>[16]</sup>和干燥时间<sup>[27]</sup>有密切关系, 高温易引发美拉德和焦糖化反应, 使得多糖降解为低聚糖和部分焦糖, 造成含量下降。图 3 显示在前期风温条件下的温度曲线, 物料在 60 °C 时, 粗多糖保留率较高, 说明在该温度条件下对物料的营养成分损失影响不大。红外喷动床干燥不存在明显的恒速干燥阶段<sup>[13]</sup>, 与 Szadziska 等<sup>[28]</sup>研究一致, 表明在干燥过程中水分子的主要运动机制是扩散。因红外辐射的能量渗透到物料中转化的热量, 减少了由外向内扩散的过程, 加快水由内向外扩散的速度<sup>[29]</sup>, 且喷动床具有干燥均匀性较好的优势, 使得物料受热均匀, 从而缩短了干燥时间。单位能耗在 60 °C 时达到最小值 160.95 kJ/g, 干燥时间也随温度的升高而缩短, 耗电量减少, 因此单位能耗随温度的升高而下降。在前期风温 40~60 °C 范围内, 随着温度升高, 干燥时间由 260 min 缩短至 180 min, 粗多糖损耗量较小, 香菇物料干物质的

质量逐渐增加, 干物质中粗多糖的含量增加。在较高的空气温度下能迅速降低物料的含水率, 干燥速率也随之提高, 而低温则需要消耗更多的热能, 导致干燥时间增加, 单位能耗增加<sup>[30]</sup>, 加工成本也随之增高。选择合适的前期温度可有效降低能耗, 保持良好的营养成分, 增加产品经济效益。

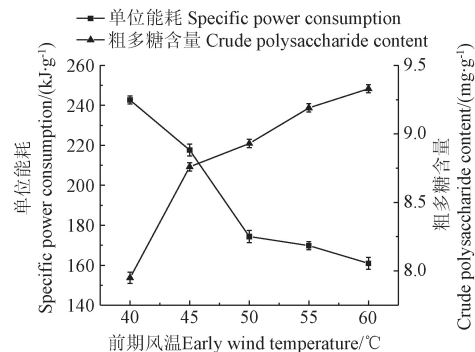


图 2 前期风温对香菇单位能耗和粗多糖含量的影响

Fig.2 Effects of early wind temperature on specific power consumption and crude polysaccharide content of lentinus edodes

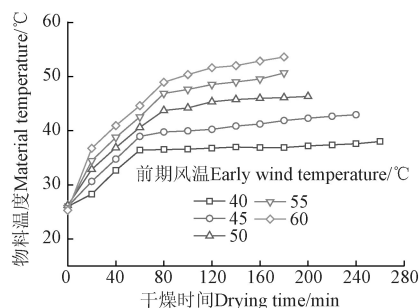


图 3 前期风温条件下的温度曲线

Fig.3 Temperature curve under the condition of early wind temperature

图 4 和表 2 表明, 随着前期风温的增加, 干燥后的香菇亮度  $L^*$  值和收缩率呈现先上升后下降的趋势, 均在 55 °C 呈现最大值, 分别为 69.70 和 91.43%。香菇亮度  $L^*$  值呈现此趋势与郭玲玲<sup>[31]</sup>研究中结果一致。  $L^*$  值间接反映样品的受热程度<sup>[32]</sup>, 本试验中  $L^*$  值差异显著 ( $P < 0.05$ )。采用红外喷动床进行干燥时, 干燥箱内物料处于规律流动<sup>[12]</sup>, 能有效改善单一红外干燥方式引起的物料加热不均匀, 避免美拉德反应造成褐变的发生。与红外热空气对流干燥方法相比, 干燥后的香菇样品亮度有所提升<sup>[29]</sup>。前期风温为 60 °C 时, 样品的亮度  $L^*$  值较 55 °C 时有所下降, 但高于 40 °C 条件下的亮度值, 50 °C 较 55 °C 条件下亮度低, 原因是在干燥过程中红外辐射及喷动床干燥对酶活性的影响和干燥时间较短, 较高温度下达到转换点含水率较快, 在一定程度上有效抑制了香菇的酶促褐变和氧化反应。样品亮度的增加, 有助于保持样品的色泽, 在低温下会延长干燥时间, 进而易发生美拉德反应, 亮度较低。  $b^*$  值随温度的升高整体呈现降低趋势, 说明香菇在此干燥方式下, 由美拉德反应产生的焦糊现象不明显, 褐变程度较小。皱缩率值越大, 表明皱缩程度越明显, 与干燥过程中水分扩散速率有一定关联。新鲜香菇初始

含水率高达 86.06%，在较高温内部水分大量扩散蒸发，且红外辐射使水从样品内部迅速转移到表面，导致细胞膨胀，内外压差大<sup>[29]</sup>，物料结构发生剧烈变化，随着温度的升高，出现皱缩。收缩率在 60℃条件下较 55℃有所下降，干燥时间随温度的升高而缩短，在较高温条件下，物料受热均匀，内外结构压差减小，因此出现下降。低温会造成单位能耗增加，且产品品质较差，本试验旨在寻求低能耗、高品质的干燥条件，能耗作为重要指标，综合考虑将 50℃作为前期风温的较优水平。

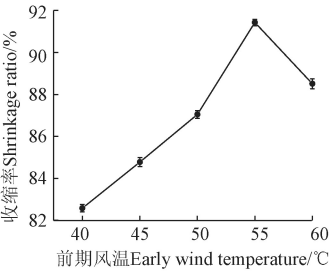


图 4 前期风温对香菇收缩率的影响  
Fig.4 Effects of early wind temperature on shrinkage ratio of lentinus edodes

表 2 前期风温对香菇色泽的影响  
Table 2 Effects of early wind temperature on color of lentinus edodes

| 前期风温<br>Early wind<br>temperature/℃ | 亮度 $L^*$<br>Brightness $L^*$ | 红绿值 $a^*$<br>Red/Green<br>value $a^*$ | 蓝黄值 $b^*$<br>Yellow/Blue<br>value $b^*$ | 彩度 $C^*$<br>Colorfulness $C^*$ |
|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
| 40                                  | 66.45±0.08 <sup>c</sup>      | 5.55±0.84 <sup>a</sup>                | 18.40±0.79 <sup>a</sup>                 | 19.22±0.99 <sup>a</sup>        |
| 45                                  | 67.78±0.02 <sup>d</sup>      | 4.63±0.03 <sup>cd</sup>               | 18.16±0.07 <sup>a</sup>                 | 18.74±0.07 <sup>b</sup>        |
| 50                                  | 69.44±0.02 <sup>b</sup>      | 5.30±0.03 <sup>ab</sup>               | 18.20±0.05 <sup>a</sup>                 | 18.96±0.05 <sup>b</sup>        |
| 55                                  | 69.70±0.02 <sup>a</sup>      | 4.93±0.31 <sup>bc</sup>               | 18.27±1.05 <sup>a</sup>                 | 18.93±1.08 <sup>b</sup>        |
| 60                                  | 68.12±0.11 <sup>c</sup>      | 4.49±0.01 <sup>d</sup>                | 16.91±0.06 <sup>b</sup>                 | 17.49±0.06 <sup>c</sup>        |

注：同列字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ )，下同。  
Note: Different letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ ). The same below.

2.1.2 后期风温对香菇品质的影响

高温促进美拉德反应和焦糖化反应的发生，导致粗多糖含量下降<sup>[33]</sup>。图 5 中表明，60~70℃时，粗多糖含量随温度的升高而有所增加，后期风温 70℃达到最大值 10.44 mg/g，高于前期风温 60℃时的最大值 9.33 mg/g。温度逐渐升高，达到 80℃时，粗多糖含量降至 9.10 mg/g，低于后期风温 60℃时的含量，且下降趋势明显。温度过高，不利于干燥过程中营养成分的保留，多糖降解产生低聚糖和部分焦糖，使多糖含量有所损失，导致产品营养品质降低，不利于生产加工。单位能耗与前期风温结果趋势保持一致，随着温度的升高，物料温度也不断上升，干燥速率加快，能耗降低，自由水与弱结合水易被蒸发，且速度较快，因此干燥时间缩短，图 6 显示了不同后期风温下的干燥时间。由于强结合水需在高热量的条件下才会被蒸出，所以综合考虑应选取后期风温在较高条件下以使得产品营养成分保留率较高及干燥能耗较低，所以选取 70℃为较优水平进行工艺优化试验。

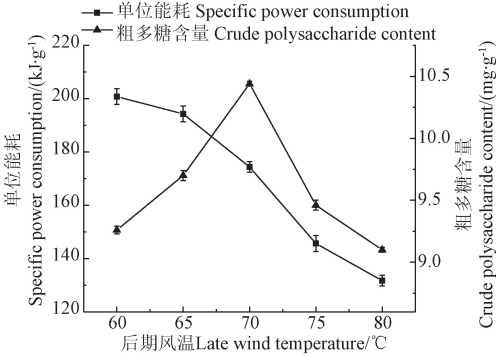


图 5 后期风温对香菇单位能耗和粗多糖含量的影响  
Fig.5 Effects of late wind temperature on specific power consumption and crude polysaccharide content of lentinus edodes

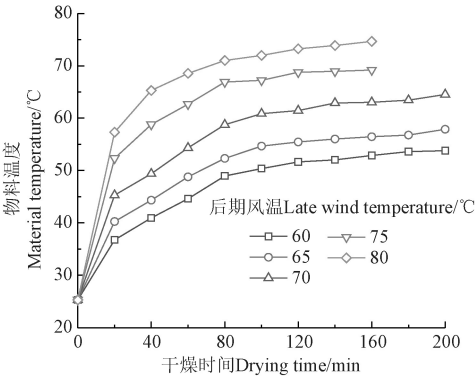


图 6 后期风温条件下的温度曲线  
Fig.6 Temperature curve under the condition of late wind temperature

图 7 和表 3 显示了后期风温对香菇亮度  $L^*$  值和收缩率的影响， $L^*$  值随温度的升高持续下降，收缩率呈现先上升后下降的趋势。温度为 75℃时，香菇收缩最为明显，高达 88.89%，此时  $b^*$  值处于最大值 19.93，说明香菇发生一定程度的褐变反应，粗多糖含量的下降也表明了香菇发生糖降解，进而出现焦化现象，导致色泽偏黄，且差异显著 ( $P<0.05$ )。虽然高温有助于加快干燥速率，降低能耗，但温度过高则无法保持香菇色泽处于良好状态。随着温度升高，结构中的细胞失水速率加快，细胞的孔隙也紧密皱缩<sup>[17]</sup>，收缩率不断增大。香菇在干燥箱内呈现规律喷动的状态，温度促进干燥速率加快，干燥至一定程度的香菇丁易因喷动发生轻微破碎，也使得收缩率较大。因本试验注重绿色低碳的干燥工艺，单位能耗占比较大，综合考虑选取 70℃作为较优水平进行试验。在单因素试验中，70℃时收缩率为 86.57%， $L^*$  值为 68.42。

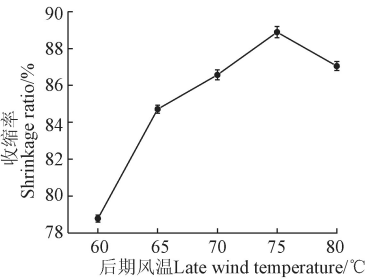


图 7 后期风温对香菇收缩率的影响  
Fig.7 Effects of late wind temperature on shrinkage ratio of lentinus edodes

表 3 后期风温对香菇色泽的影响  
Table 3 Effects of late wind temperature on color of  
lentinus edodes

| 后期风温<br>Late wind<br>temperature/℃ | 亮度 $L^*$<br>Brightness $L^*$ | 红绿值 $a^*$<br>Red/Green<br>value $a^*$ | 蓝黄值 $b^*$<br>Yellow/Blue<br>value $b^*$ | 彩度 $C^*$<br>Colorfulness $C^*$ |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
| 60                                 | 71.83±0.02 <sup>a</sup>      | 4.81±0.05 <sup>c</sup>                | 16.01±0.07 <sup>d</sup>                 | 16.72±0.06 <sup>d</sup>        |
| 65                                 | 70.46±0.02 <sup>b</sup>      | 5.24±0.08 <sup>b</sup>                | 17.70±0.04 <sup>b</sup>                 | 18.46±0.01 <sup>b</sup>        |
| 70                                 | 68.42±0.23 <sup>c</sup>      | 4.56±0.03 <sup>d</sup>                | 16.65±0.05 <sup>c</sup>                 | 17.27±0.05 <sup>c</sup>        |
| 75                                 | 66.69±0.01 <sup>d</sup>      | 5.44±0.41 <sup>a</sup>                | 19.93±0.56 <sup>a</sup>                 | 20.66±0.54 <sup>a</sup>        |
| 80                                 | 65.45±0.02 <sup>c</sup>      | 5.19±0.03 <sup>b</sup>                | 17.93±0.03 <sup>b</sup>                 | 18.66±0.03 <sup>b</sup>        |

2.1.3 转换点含水率对香菇品质的影响

由图 8 可知,单位能耗随转换点含水率的增大而逐渐下降,粗多糖含量呈现先增加后降低的趋势。设定前期风温为 50℃,后期风温为 60℃。经试验得转换点含水率越高,风温便越快转换为后期风温 60℃,转换后的温度升高使得反应速率加快,单位能耗随之呈现逐渐降低趋势,干燥时间随之缩短。物料的水分在干燥过程中同时进行外扩散和内扩散,扩散的速度差及物料内部的水分不均匀现象影响着能耗和干燥品质<sup>[24]</sup>。转换点含水率越高,香菇在后期风温条件下干燥的时间占比越长,较高温度下干燥易使多糖发生降解,部分多糖转化为小分子低聚糖,而低聚糖吸收热能发生融化<sup>[34]</sup>,多糖含量下降。在转换点含水率 55%时,粗多糖含量处于最大值 10.26 mg/g,此后随着转换点含水率增大,粗多糖含量降低。在转换点含水率为 55%时,与 60%及 65%的转换点含水率相比,在较低的前期风温下干燥时间占比较长,多糖在低温下不易发生降解,在此状况下可能粗多糖含量所占比重增多,因此含量有所上升。红外喷动床干燥的香菇样品在转换点 55%时营养成分保留较好。对比程慧等<sup>[24]</sup>采用热泵-真空联合干燥香菇得到最佳工艺条件下的单位能耗为 345.01 kJ/g 及超声波-微波-红外辅助对流干燥物料所得单位能耗<sup>[35]</sup>均高于本试验得到的单位能耗最大值 261.05 kJ/g,红外喷动床的干燥速率较快,香菇经红外喷动床干燥至含水率为 13%以下时,用时最长为 260 min,比三段式微波真空冷冻干燥、冷冻干燥<sup>[17]</sup>、太阳能干燥、热风干燥及真空冷冻干燥<sup>[26]</sup>等香菇干燥技术所用时间短,有利于节约生产加工成本。

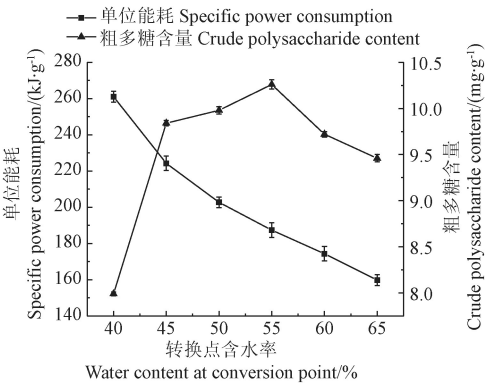


图 8 转换点含水率对香菇单位能耗和粗多糖含量的影响  
Fig.8 Effects of water content at conversion point on specific  
power consumption and crude polysaccharide content of  
lentinus edodes

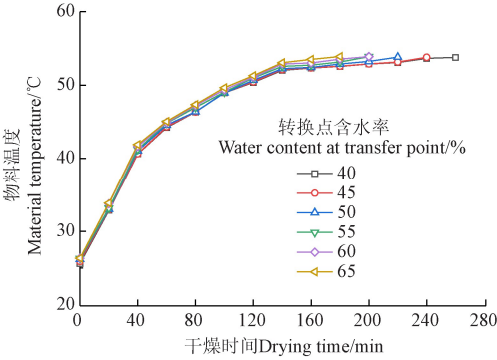


图 9 转换点含水率条件下的温度曲线  
Fig.9 Temperature curve under the condition of water content at  
conversion point

图 10 和表 4 显示收缩率与亮度  $L^*$  值随转换点含水率的增加呈现先增大后减小的趋势。本试验中  $L^*$  值差异显著 ( $P<0.05$ ),  $L^*$  值在转换点含水率为 55% 时, 达到最大值 71.75。从  $L^*$  极差值得出, 红外喷动床干燥条件下物料受热较为均匀, 与图 9 所示的温度曲线结果一致。

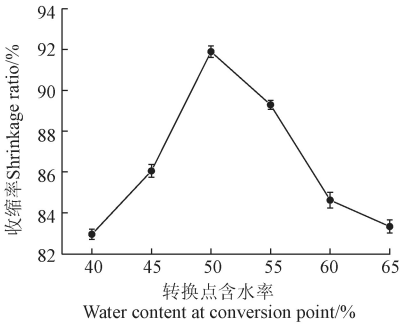


图 10 转换点含水率对香菇收缩率的影响  
Fig.10 Effects of water content at conversion point on shrinkage  
ratio of lentinus edodes

表 4 转换点含水率对香菇色泽的影响  
Table 4 Effects of water content at conversion point on color of  
lentinus edodes

| 转换点含水率<br>Water content<br>at conversion<br>point/% | 亮度 $L^*$<br>Brightness $L^*$ | 红绿值 $a^*$<br>Red/Green<br>value $a^*$ | 蓝黄值 $b^*$<br>Yellow/Blue<br>value $b^*$ | 彩度 $C^*$<br>Colorfulness $C^*$ |
|---|------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
| 40  | 69.25±0.02 <sup>f</sup>      | 5.11±0.03 <sup>d</sup>                | 17.42±0.03 <sup>d</sup>                 | 18.16±0.04 <sup>d</sup>        |
| 45  | 69.64±0.03 <sup>d</sup>      | 5.40±0.03 <sup>b</sup>                | 18.58±0.03 <sup>b</sup>                 | 19.35±0.02 <sup>b</sup>        |
| 50  | 70.68±0.01 <sup>b</sup>      | 5.43±0.03 <sup>a</sup>                | 18.93±0.03 <sup>a</sup>                 | 19.70±0.03 <sup>a</sup>        |
| 55  | 71.75±0.12 <sup>a</sup>      | 4.50±0.04 <sup>e</sup>                | 16.73±0.01 <sup>e</sup>                 | 17.33±0.01 <sup>e</sup>        |
| 60  | 69.89±0.02 <sup>c</sup>      | 5.40±0.03 <sup>b</sup>                | 18.58±0.03 <sup>b</sup>                 | 19.35±0.02 <sup>b</sup>        |
| 65  | 69.52±0.02 <sup>e</sup>      | 5.30±0.03 <sup>c</sup>                | 18.21±0.04 <sup>c</sup>                 | 18.97±0.03 <sup>c</sup>        |

转换点含水率过高或过低都将对亮度造成影响, 高转换点含水率能加快干燥速率, 但在后期风温下干燥时间比前期风温干燥时间长, 易发生美拉德反应、焦化现象等,  $b^*$  在转换点含水率为 55% 时呈现最小值 16.73, 此条件下色泽较好。本试验中  $L^*$  值均优于中短波红外干燥<sup>[31-32]</sup> 及热风-微波分段联合干燥<sup>[27]</sup> 香菇的亮度值, 红外与喷动床相结合的干燥方式有助于改善物料的色泽。收缩率在转换点含水率 50% 时达到最大值。合适的转换点含水率能维持样品较好的形态, 过高的转换点含水率会导致后

期风温干燥时间过长,使样品结构的收缩加快,降低物料复水的能力。综合考虑,选取 55%转换点含水率为较佳,作为较优水平进行试验。

2.2 响应面优化设计

2.2.1 响应面试验设计和回归方程显著性分析

通过响应面法分析前期风温(A)、转换点含水率(B)和后期风温(C)3个因素对单位能耗、粗多糖含量、亮度L\*值和收缩率的综合评分值,并进行优化设计,结果见表5。

由表6可知,单位能耗回归方程的显著性F值为

2 618.35,对应的P值<0.000 1,表明该模型是极显著的<sup>[36]</sup>;失拟项 $F_{L_f}$ 为0.34,对应的 $P_{L_f}$ 值为0.799 8( $P_{L_f}>0.05$ ),失拟项不显著,表明试验误差较小;单位能耗回归方程 $R^2$ 为0.998 9,说明拟合度达到99.89%,能较好地预测单位能耗;粗多糖含量、L\*值及收缩率的 $R^2$ 均高达0.993以上。此外,由表6得到3个试验因素对单位能耗的影响主次为:前期风温(A)、转换点含水率(B)、热风干燥温度(C)且 $C^2>B^2>A^2$ ;对粗多糖含量影响的主次为A、C、B且 $A^2>C^2>B^2$ ;对色泽亮度L\*值的影响主次为B、C、A且 $A^2>B^2$ ;对收缩率的影响主次为C、A、B。

表5 响应面试验设计与结果

Table 5 Design and results of response surface test

| 试验号<br>Test No. | 前期风温<br>Early wind<br>temperature A | 转换点含水率<br>Water content at<br>conversion point B | 后期风温<br>Late wind<br>temperature C | 单位能耗<br>Specific power<br>consumption/(kJ·g <sup>-1</sup> ) | 粗多糖含量<br>Crude polysaccharide<br>content/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 亮度 L*<br>Brightness L* | 收缩率<br>Shrinkage<br>ratio/% | 综合评分值<br>Comprehensive<br>score |
|-----------------|-------------------------------------|--|------------------------------------|---|--|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1               | 0                                   | -1   | -1                                 | 223.28  | 9.53   | 68.7                   | 86.25                       | -0.32                           |
| 2               | 0                                   | 0  | 0                                  | 152.71  | 10.24  | 67.22                  | 86.28                       | 32.36                           |
| 3               | 0                                   | 1  | -1                                 | 185.88  | 9.09   | 64.02                  | 92.24                       | -13.53                          |
| 4               | -1                                  | 0  | -1                                 | 236.67  | 8.05   | 67.35                  | 86.57                       | -34.92                          |
| 5               | 1                                   | 0  | -1                                 | 141.95  | 9.1  | 65.69                  | 90.76                       | 10.72                           |
| 6               | 0                                   | 0  | 0                                  | 152.36  | 10.22  | 67.01                  | 86.32                       | 24.28                           |
| 7               | 0                                   | -1   | 1                                  | 185.17  | 9.43   | 68.12                  | 85.21                       | 7.92                            |
| 8               | 0                                   | 0  | 0                                  | 153.71  | 10.33  | 67.19                  | 86.26                       | 33.37                           |
| 9               | 0                                   | 0  | 0                                  | 151.71  | 10.36  | 67.25                  | 87.31                       | 33.34                           |
| 10              | 1                                   | 0  | 1                                  | 177.9   | 9.12   | 69.44                  | 78.3                        | 24.21                           |
| 11              | 0                                   | 0  | 0                                  | 151.71  | 10.2   | 67.23                  | 87.33                       | 28.52                           |
| 12              | -1                                  | -1   | 0                                  | 210.55  | 8.98   | 67.46                  | 82.58                       | -6.4                            |
| 13              | 1                                   | 1  | 0                                  | 151.18  | 9.43   | 65.4                   | 82.22                       | 17.44                           |
| 14              | -1                                  | 1  | 0                                  | 142.65  | 8.5  | 67.74                  | 91.23                       | 9.98                            |
| 15              | -1                                  | 0  | 1                                  | 147.56  | 8.93   | 67.58                  | 88.33                       | 15.53                           |
| 16              | 1                                   | -1   | 0                                  | 135.28  | 9.18   | 69.87                  | 86.51                       | 31.07                           |
| 17              | 0                                   | 1  | 1                                  | 170.73  | 9.87   | 68.56                  | 82.69                       | 22.78                           |

表6 单指标回归方程

Table 6 Single index regression equation

| 指标<br>Index                                 | 模拟方程<br>Simulation equation  | F 值<br>F value | P 值<br>P value | 失拟项<br>Lack of fit             |                                | 校正决定系数<br>R <sup>2</sup><br>Correction<br>coefficient of<br>determination R <sup>2</sup> |
|---|--|----------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
|   |  |                |                | $F_{L_f}$ 值<br>$F_{L_f}$ value | $P_{L_f}$ 值<br>$P_{L_f}$ value |  |
| 单位能耗<br>Specific power<br>consumption       | $Y_1=152.44-16.39A-12.98B-13.30C+20.95AB+31.27AC+5.74BC-3.89A^2+11.36B^2+27.46C^2$ | 2 618.35       | <0.000 1       | 0.34                           | 0.799 8                        | 0.998 9  |
| 粗多糖含量<br>Crude<br>polysaccharide<br>content | $Y_2=10.27+0.30A+0.20C+0.18AB-0.21AC+0.22BC-0.96A^2-0.28B^2-0.51C^2$               | 40.01          | <0.001         | 2.70                           | 0.180 4                        | 0.995 4  |
| 亮度 L*<br>Brightness L*                      | $Y_3=67.18-1.05B+0.99C-1.19AB+0.88AC+1.28BC+0.30A^2+0.14B^2$                       | 28.48          | 0.000 3        | 1.49                           | 0.365 1                        | 0.993 8  |
| 收缩率<br>Shrinkage ratio                      | $Y_4=86.70-1.36A+0.98B-2.66C-3.24AB-3.56AC-2.13BC-0.84A^2$                         | 9.58           | <0.000 1       | 4.01                           | 0.106 5                        | 0.996 6  |

由表7知,以综合评分值为响应值,经过拟合得到回归方程: $Y=30.37+12.41A+0.55B+13.56C-7.50AB-9.24AC+7.02BC-8.84A^2-8.51B^2-17.65C^2$ 。该模型中F值为36.19, $P<0.000 1$ ,表明模型极显著。模型的决定系数 $R^2=0.984 5$ ,表明经试验得到的综合评分值与预测值一致性较高;模型调整决定系数为

$R^2_{Adj}=0.964 7$ ,试验值有96.47%能完全解释预测值,只有3.53%不能该模型的预测值解释<sup>[37]</sup>。由模型均值F检验可得前期风温(A)、转换点含水率(B)和后期风温(C)对香菇综合品质的影响主次为C、A、B且 $C^2>A^2>B^2$ ,各个交互作用影响的主次为AC、AB、BC。

表 7  综合评分值回归方程方差分析表  
Table 7  ANOVA table of comprehensive score regression equation

| 方差来源<br>Source of variance | 平方和<br>Sum of squares   | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square | F 值<br>F value | P 值<br>P value |
|----------------------------|---|--------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| 模型 Model                   | 5 605.28  | 9                        | 622.81            | 36.19          | <0.000 1       |
| A                          | 1 231.32  | 1                        | 1 231.32          | 71.55          | <0.000 1       |
| B                          | 2.42  | 1                        | 2.42              | 0.14           | 0.018 8        |
| C                          | 1471.26   | 1                        | 1 471.26          | 85.50          | <0.000 1       |
| AB                         | 225.15  | 1                        | 225.15            | 13.08          | 0.008 5        |
| AC                         | 341.51  | 1                        | 341.51            | 19.85          | 0.003 0        |
| BC                         | 196.98  | 1                        | 196.98            | 11.45          | 0.011 7        |
| A <sup>2</sup>             | 329.00  | 1                        | 329.00            | 19.12          | 0.003 3        |
| B <sup>2</sup>             | 305.07  | 1                        | 305.07            | 17.73          | 0.004 0        |
| C <sup>2</sup>             | 1 311.60  | 1                        | 1 311.60          | 76.22          | <0.000 1       |
| 残差 Residual                | 120.46  | 7                        | 17.21             |                |                |
| 失拟项 Lack of fit            | 58.17   | 3                        | 19.39             | 1.25           | 0.404 2        |
| 纯误差 Pure error             | 62.29   | 4                        | 15.57             |                |                |
| 总离差 Total dispersion       | 5 725.74  | 16                       |                   |                |                |
| 系数 Coefficient             | R <sup>2</sup> =0.984 5  R <sup>2</sup> <sub>Adj</sub> =0.964 7 |                          |                   |                |                |

注：P<0.01 表示差异极显著。  
Note: P<0.01 indicates extremely significant difference.

表 8  指标回归方程优化结果  
Table 8  Index regression equation optimization results

| 指标类别<br>Indexes category       | 工艺参数优化组合<br>Optimum combination of process parameters |  |                                    | 优化结果<br>The optimization results                            |  |                           |                             |                                 |
|--------------------------------|---|--|------------------------------------|---|--|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
|                                | 前期风温<br>Early wind<br>temperature/℃                   | 转换点含水率<br>Water content at<br>conversion point/% | 后期风温<br>Late wind<br>temperature/℃ | 单位能耗<br>Specific power<br>consumption/(kJ·g <sup>-1</sup> ) | 粗多糖含量<br>Crude polysaccharide<br>content/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 亮度 L*<br>Brightness<br>L* | 收缩率<br>Shrinkage<br>ratio/% | 综合评分值<br>Comprehensive<br>score |
|                                |   |  |                                    |   |  |                           |                             |                                 |
| 单指标<br>Single index            | 40.39   | 62.76  | 79.59                              | 133.72  | 10.31  | 69.94                     | 73.80                       | 35.63                           |
|                                | 51.39   | 55.64  | 71.79                              |   |  |                           |                             |                                 |
|                                | 59.94   | 45.02  | 71.02                              |   |  |                           |                             |                                 |
|                                | 58.72   | 64.36  | 79.79                              |   |  |                           |                             |                                 |
| 综合指标<br>Comprehensive<br>index | 56.37   | 52.52  | 72.36                              | 143.79  | 10.00  | 68.08                     | 84.71                       | 35.63                           |

3 结 论

本试验以单位能耗、粗多糖含量、亮度  $L^*$  值和收缩率为品质指标综合分析前期风温、转换点含水率和后期风温对香菇红外喷动床干燥的影响。在单因素试验中得出红外喷动床干燥方式在单位能耗、干燥时间及物料营养成分保留率等方面，与香菇单一干燥方式及其他联合干燥方式相比，具有一定的干燥优势。经优化得到干燥工艺为前期风温 56.00 ℃、转换点含水率 53.00%、后期风温 72.00 ℃，该工艺下单位能耗为 143.52 kJ/g、粗多糖含量 9.98 mg/g、亮度  $L^*$  值 68.11、收缩率 83.15%，综合评分值为 35.37，与预测值拟合度高达 99.27%。采用新型联合干燥装备—红外喷动床对香菇进行干燥，在一定程度上达到了能耗及品质方面的优质高效，解决香菇干燥中对干燥工艺及技术方法进行优化的需求，顺应香菇干制品的发展趋势，为香菇干制品的综合利用提供理论基础。

【参 考 文 献】

[1] 苏畅, 李小江, 贾英杰, 等. 香菇多糖的抗肿瘤作用机制研究进展[J]. 中草药, 2019, 50(6): 1499-1504.  
Su Chang, Li Xiaojiang, Jia Yingjie, et al. Research progress on antitumor activity of lentinan[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(6): 1499-1504. (in Chinese with English abstract)

2.2.2 工艺参数优化与验证

通过软件分析单指标和综合指标的优化结果如表 8 所示。香菇红外喷动床干燥的综合指标优化工艺为：前期风温 56.37 ℃、转换点含水率 52.52%、后期风温 72.36 ℃，此时综合评分值为 35.63。为考虑试验的可行性，将优化工艺参数调整为：前期风温 56.00 ℃、转换点含水率 53.00%、后期风温 72.00 ℃，在此条件下进行验证试验，得到单位能耗为 143.52 kJ/g、粗多糖含量 9.98 mg/g、亮度  $L^*$  值 68.11、收缩率 83.15%，综合评分值为 35.37，与预测值拟合度达 99.27%，相对误差约为 0.73%，表明经该多元二次回归模型<sup>[38-39]</sup>得到的工艺参数可靠系数高，较适合香菇红外喷动床干燥工艺。

[2] 周伟, 凌亮, 郭尚. 香菇食药价值综述[J]. 食药菌, 2020, 28(6): 461-465, 469.  
Zhou Wei, Ling Liang, Guo Shang. Overview of the edible and medicinal value of lentinula edodes[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2020, 28(6): 461-465, 469. (in Chinese with English abstract)

[3] 侯会, 陈鑫, 方东路, 等. 干燥方式对食用菌风味物质影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4877-4883.  
Hou Hui, Chen Xin, Fang Donglu, et al. Research progress on influence of drying methods on flavor compounds of edible fungus[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(15): 4877-4883. (in Chinese with English abstract)

[4] 周子丹, 彭文君, 倪家宝, 等. 不同干燥方式对油菜蜂花粉色泽、酚酸含量和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 76-83.  
Zhou Zidan, Peng Wenjun, Ni Jiabao, et al. Effect of different drying methods on color, phenolic acids and antioxidant activity of rape bee pollen[J]. Food Science, 2021, 42(17): 76-83.

[5] 刘玉辉, 李腾训, 王相友, 等. 胡萝卜薄片红外干燥光学特性研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 342-350.  
Liu Yuhui, Li Tengxun, Wang Xiangyou, et al. Optical



- properties of carrot slices during infrared drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 342-350. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘启玲, 王庆卫. 中短波红外干燥对桑葚干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 39-45.
- Liu Qiling, Wang Qingwei. Effects of short- and medium-wave infrared radiation drying on drying characteristics, nutritional quality and antioxidant activity of mulberry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 39-45. (in Chinese with English abstract)
- [7] Fakhreddin S. Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review[J]. International Journal of Fruit Science, 2019, 20(3): 1-17.
- [8] 赵旭博, 孙正宏, 田阳, 等. 不同干燥方式对香菇品质的影响[J]. 农产品加工, 2017, 423(1): 115-117.
- Zhao Xubo, Sun Zhenghong, Tian Yang, et al. Effect of different drying methods on the quality of nushroom[J]. Farm Products Processing, 2017, 423(1): 115-117. (in Chinese with English abstract)
- [9] 朱凯阳, 任广跃, 段续, 等. 红外辐射技术在农产品干燥中的应用[J/OL]. 食品与发酵工业, 2021, 1-11 [2021-06-20]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026575>.
- Zhu Kaiyang, Ren Guangyue, Duan Xu, et al. Application of infrared radiation technology in drying of agricultural products[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2021, 1-11 [2021-06-20]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026575>.
- [10] 侯志昀, 段续, 任广跃, 等. 喷动床在农产品干燥中的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 275-283.
- Hou Zhiyun, Duan Xu, Ren Guangyue, et al. The progress of the utilization of spouted bed in drying of agricultural products[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(4): 275-283. (in Chinese with English abstract)
- [11] Thanthong P, Mustafa Y, Ngamrunroj D. Production of dried shrimp mixed with turmeric and salt by spouted bed technique enter the rectangular chamber[J]. Journal of Physics Conference Series, 2017, 901(1): 1-4.
- [12] 马立, 段续, 任广跃, 等. 红外—喷动床联合干燥设备研制与分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 119-124, 129.
- Ma Li, Duan Xu, Ren Guangyue, et al. Development and analysis of infrared-spouted bed combined drying equipment[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 119-124, 129. (in Chinese with English abstract)
- [13] 段续, 张萌, 任广跃, 等. 玫瑰花瓣红外喷动床干燥模型及品质变化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 238-245.
- Duan Xu, Zhang Meng, Ren Guangyue, et al. Drying models and quality changes of rose subjected to infrared assisted spouted bed drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(8): 238-245. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王教领, 宋卫东, 任彩虹, 等. 我国香菇干燥技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(7): 76-83.
- Wang Jiaoling, Song Weidong, Ren Caihong, et al. Research on the drying progress of lentinus edodes in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 76-83. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘静, 翁小祥, 奚小波, 等. 香菇干燥技术研究进展[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(2): 37-44.
- Liu Jing, Weng Xiaoxiang, Xi Xiaobo, et al. Research progress in technology of drying lentinus edodes[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(2): 37-44. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张迎敏, 任广跃, 段续, 等. 红薯叶粉热泵—热风联合干燥工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 198-205.
- Zhang Yingmin, Ren Guangyue, Duan Xu, et al. Optimization of heat pump-hot air combined drying on sweet potato leaf powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(1): 198-205. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张海伟, 鲁加惠, 张雨露, 等. 干燥方式对香菇品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 150-156.
- Zhang Haiwei, Lu Jiahui, Zhang Yulu, et al. Effects of drying methods on the quality characteristics and microstructure of shiitake mushrooms (lentinus edodes)[J]. Food Science, 2020, 41(11): 150-156. (in Chinese with English abstract)
- [18] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食用菌及其制品: GB 7096-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 3-4.
- [19] 高雪. 中短波红外联合热风干燥工艺对香菇干燥特性和品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020, 53-54.
- Gao Xue. Effects of Drying Characteristics and Quality of Shiitake Mushrooms Using MIRD Combined HAD Drying Processes[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020, 53-54. (in Chinese with English abstract)
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 农业部. 食用菌中粗多糖含量的测定: NY/T 1676-2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [22] 张莉会, 廖李, 汪超, 等. 超声和渗透预处理对干燥草莓片品质及抗氧化活性影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(12): 196-203.
- Zhang Lihui, Liao li, Wang Chao, et al. Effects of ultrasonic



- and osmotic pretreatment on quality and antioxidant activity of dried strawberry slices[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(12): 196-203. (in Chinese with English abstract)
- [23] Luo D, Wu J, Ma Z, et al. Production of high sensory quality shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) by pulsed air-impingement jet drying (AID) technique[J]. *Food Chemistry*, 2020, 341(2): 128290.
- [24] 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. (in Chinese with English abstract)
- [25] 戈永慧, 张慧, 彭菁, 等. 热蒸汽烫漂联合热风微波耦合干燥香菇的工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(13): 59-64, 71.
- Ge Yonghui, Zhang Hui, Peng Jing, et al. Optimization of the technology of hot steam blanching coupled with hot air-microwave combined drying process of shiitakes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(13): 59-64, 71. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王娅, 姚利利, 王颖, 等. 不同干燥方式对香菇品质影响的研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(19): 38-41, 58.
- Wang Ya, Yao Lili, Wang Jie, et al. Study on the effect of different drying methods on the quality of dried mushrooms[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(19): 38-41, 58. (in Chinese with English abstract)
- [27] 许洋, 徐茂, 蒋和体. 不同干燥方法对香菇片品质及微观结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 189-197.
- Xu Yang, Xu Mao, Jiang Heti. Effects of different drying methods on the quality and microstructure of shiitake slices[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(14): 189-197. (in Chinese with English abstract)
- [28] Szadziska J, Mierzwa D. The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2021, 167(1): 108532.
- [29] Zhang J, Yagoub E, Sun Y, et al. Role of thermal and non-thermal drying techniques on drying kinetics and the physicochemical properties of shiitake mushroom[J/OL]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, [2021-06-20]. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11348>
- [30] Lu X F, Zhou Y, Ren Y P, et al. Improved sample treatment for the determination of flavonoids and polyphenols in sweet potato leaves by ultra performance convergence chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2019, 901(169): 245-253.
- [31] 郭玲玲. 香菇中短波红外干燥工艺及应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016, 21-29.
- Guo lingling. Research on Technology and Application of Medium and Short Wave Infrared Radiation Drying for Shiitake Mushrooms[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016, 21-29. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王洪彩. 香菇中短波红外干燥及其联合干燥研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014, 26-30.
- Wang Hongcai. Mid-infrared Drying Shiitake Mushrooms and Its Hybrid Drying Study[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014, 26-30. (in Chinese with English abstract)
- [33] Tian Y, Zhao Y, Huang J, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197(A): 714-722.
- [34] 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.
- Nie Linlin, Zhang Guozhi, Wang Anjian, et al. Effect of heat-pump drying on the quality characteristics of *Lentinula edodes*[J]. *Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition*, 2015, 36(6): 59-63. (in Chinese with English abstract)
- [35] Abbaspour-Gilandeh Y, Kaveh M, Aziz M. Ultrasonic-Microwave and infrared assisted convective drying of carrot: Drying kinetic, quality and energy consumption[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6309.
- [36] Machado J C B, Ferreira M R A, Soares L A L. Optimization of the drying process of standardized extracts from leaves of *Spondias mombin* L. using Box-Behnken design and response surface methodology[J/OL]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, [2021-06-20]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15595>.
- [37] 靳力为, 任广跃, 段续, 等. 超声波协同作用对真空冻干杏脱水及其品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(6): 133-139.
- Jin Liwei, Ren Guangyue, Duan Xu, et al. Effect of ultrasonic synergy on the dehydration and quality of vacuum freeze-dried apricots[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(6): 133-139. (in Chinese with English abstract)
- [38] Obajemihi O I, Olaoye J O, Ojediran J O, et al. Model development and optimization of process conditions for color properties of tomato in a hot-air convective dryer using Box-Behnken design[J/OL]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(10): e14771. [2021-06-20]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14771>.
- [39] Rahmawati L, Saputra D, Sahim K, et al. Optimization of infrared drying condition for whole duku fruit using response surface methodology[J]. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2019, 13(1): 462-469.

## Optimization of the drying process parameters for lentinus edodes in segment variable temperature infrared assisted spouted bed

Duan Xu<sup>1,2</sup>, Xu Yiming<sup>1</sup>, Ren Guangyue<sup>1,2</sup>, Li Linlin<sup>1</sup>, Hou Zhiyun<sup>1</sup>, Zhao Mengyue<sup>1</sup>

(1. College of Food and Biological Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Henan Province, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Lentinus edodes are favored by consumers, due mainly to the antitumor, immunoregulation, anti-aging, antioxidation, and anti-radiation. However, the drying process can be used to extend the shelf life, because the fresh lentinus edodes are not easy to store. In this experiment, a new infrared-assisted spouted bed drying equipment was used to investigate the drying process of lentinus edodes under the segment variable temperature. An infrared-assisted spouted bed was utilized to improve the high energy consumption and heat loss of infrared drying with uniform distribution. A single factor Box-Behnken Design was used to optimize the response surface experiment. The parameters included the early wind temperature, water content at conversion point, and late wind temperature on specific power consumption, crude polysaccharide content, brightness value  $L^*$  and shrinkage ratio. The polynomial regression was derived by a weighted comprehensive score to optimize the drying process parameters of an infrared-assisted spouted bed. The results showed that the crude polysaccharide content of lentinus edodes dried by infrared spouted assisted bed gradually increased, with the increase of early wind temperature ( $A$ ), where the retention rate increased to a maximum of 9.33 mg/g at 60°C. The materials were also heated evenly during drying. The specific power consumption decreased to reach the minimum of 160.95 kJ/g, while the drying time was shortened, with the increase of temperature, when the early wind temperature was 60°C. Brightness value  $L^*$  and shrinkage ratio showed a trend of first increased and then decreased, with the increase of early wind temperature at the maximum of 55°C. Appropriate early wind temperature could effectively reduce the specific power consumption, thereby maintaining high nutrients for better economic benefits. The content of crude polysaccharide increased significantly, where the maximum was 10.44 mg/g at 70°C, particularly when the late wind temperature ( $C$ ) was 60°C-70°C. Furthermore, there was an obvious downward trend, when the temperature continued to rise. Excessive temperature could damage the retention of nutrients during drying, due mainly to polysaccharide degradation produced oligosaccharides and partial caramel. The drying rate accelerated, but the specific power consumption decreased, with the increase of temperature. In addition, there was the most obvious shrinkage ratio at 75°C, with the maximum yellow/blue value  $b^*$  of 19.93, while the brightness value  $L^*$  value continued to decrease, with the increase of late wind temperature. Correspondingly, there was a significant difference ( $P<0.05$ ), particularly slightly browning, and yellow color of *Lentinula edodes*. The specific power consumption decreased gradually, with the increase of water content at conversion point ( $B$ ). There was also a trend of first increasing and then decreasing in the crude polysaccharide content. The shrinkage ratio and brightness value  $L^*$  increased first and then decreased, with the increase of water content at the conversion point. The single factor interaction was ranked in the order of  $AC>AB>BC$ . The optimal drying parameters were achieved using the response surface method, where the early wind temperature was 56.00°C, the water content at the conversion point was 53.00%, and the late wind temperature was 72.00°C. In this case, the specific power consumption was 143.52 kJ/g, the crude polysaccharide content was 9.98 mg/g, the brightness value  $L^*$  value was 68.11, the shrinkage ratio was 83.15%, the comprehensive score value was 35.37, and the fitting degree with the predicted value was 99.27%. Consequently, the infrared-assisted spouted bed drying can widely be expected to fully meet the development trend and demand of lentinus edodes products. The finding can also provide a theoretical foundation for the production and processing of dried lentinus edodes products.

**Keywords:** drying; quality control; process optimization; lentinus edodes; infrared assisted spouted bed drying; specific power consumption