

银耳红外辐射干燥特性研究及动力学模型构建

吴振¹, 李红², 罗杨¹, 谭红军^{1,3*}, 陈岗¹, 师萱¹, 杨勇¹, 石文娟³

¹重庆市中药研究院, 重庆 400065;

²重庆市食品药品检验所, 重庆 401121; ³重庆市银耳营养食品企业工程技术研究中心, 重庆 409003

摘要: 利用红外辐射干燥技术, 对银耳红外辐射干燥特性及其动力学模型进行研究, 探讨不同干燥温度(60~140 °C)、辐射强度(1~5 W/cm²)、空气流速(0.5~1.5 m/s)等因素对银耳失水特性的影响。结果发现, 干燥温度和辐射强度对银耳失水特性影响显著, 而空气流速对其影响较小。根据试验数据建立银耳红外辐射干燥的水分比与干燥时间关系的动力学模型, 并对模型进行拟合检验, 结果发现 Midilli 模型能准确的描述银耳红外辐射干燥过程, 该模型预测值与实测值拟合良好。该模型可以准确预测银耳在红外辐射干燥过程中的失水特性。

关键词: 银耳; 红外辐射; 干燥特性; 模型

中图分类号: R93; S567.3+4

文献标识码: A

Drying Characteristics of *Tremella fuciformis* under Infrared Ray and Its Kinetic Model

WU Zhen¹, LI Hong², LUO Yang¹, TAN Hong-jun^{1,3*}, CHEN Gang¹, SHI Xuan¹, YANG Yong¹, SHI Wen-juan³

¹Chongqing Academy of Chinese Materia Medica, Chongqing 400065, China; ²Chongqing Institute for

Food and Drug Control Chongqing 401121, China; ³Chongqing

Engineering Research Center for Tremella Nutrition Food Enterprises, Chongqing 409003, China

Abstract: Infrared ray (IR) drying technique was used to dry *Tremella fuciformis* to research its drying properties and kinetic model. The effects of temperature of 60-140 °C, infrared intensities of 1-5 W/cm² and air velocities of 0.5-1.5 m/s on dehydrating properties of *T. fuciformis* were investigated. The results showed that the moisture ratio was significantly influenced by IR intensity and temperature but not significantly influenced by air velocity. The suitable kinetic model which can be used to describe the relationship of moisture ratio and drying time was established on the basis of experimental data and the validation test was performed. The statistically analyses from the present study indicated that Midilli's form gave a better fit over the other form and the experimental value was well in close agreement with value predicted by the model. The dehydrating properties of *T. fuciformis* during the IR drying procedure can be exactly estimated by the model.

Key words: *Tremella fuciformis*; infrared ray; drying characteristics; model

银耳 (*Tremella fuciformis*), 在分类学上隶属于真菌门 (*Eumycota*), 担子菌纲 (*Basidiomycetes*), 异隔担子菌亚纲 (*Heterobasidiales*), 银耳目 (*Tremellales*), 银耳科 (*Tremellaceae*), 银耳属 (*Tremella*), 学名 *Tremella fuciformis* Berk., 广泛分布于温带和亚热带地区, 被誉为“食用菌之王”。银耳药性平和, 服用安全; 中医认为, 银耳味甘淡性平, 归肺、胃经, 具有滋阴润肺、养胃生津的功效。

脱水干制是银耳加工贮藏的一个重要方法。鲜银耳富含蛋白质、糖类、维生素及多种酶类, 并且鲜银耳含水率高 (75%~80%), 不仅难于贮存, 而且加工过程中极易褐变, 造成颜色、营养和风味的劣变, 严重影响产品的质量^[1]。传统的热风干燥能耗大, 而且加工后的产品质量不高。近年来, 红外辐射干燥技术得到了较快的发展, 实践证明它具有高效、节能、环保等优点, 已经成为果蔬、食用菌和中草药等天然物料干燥领域的研究热点^[2]。红外光谱可加速分子振动, 降低传热阻力, 促进组织细胞中的水分向外迁移, 增强干燥过程的有效能利用, 因此该干燥技术日益受到重视。为了更精确预测和控制银耳

收稿日期: 2013-08-05 接受日期: 2013-12-12

基金项目: 重庆市科委资助项目 (cstc2012gg-yyjs0188, cstc2013yykfA80004, cstc2012pt-kyys10001, cstc2012pt-kyys10004)

* 通讯作者 Tel: 86-23-89029055; E-mail: thj-1973@163.com

红外辐射干燥过程,本文通过试验探讨红外干燥银耳过程中水分比与干燥温度($T, 60 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$)、辐射强度($I, 1 \sim 5 \text{ W/cm}^2$)、空气流速($v, 0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}$)等因素之间的关系,确定各参数对干燥水分比的影响,选择建立银耳红外辐射干燥模型,并进行试验验证,可为红外辐射干燥技术在银耳干制生产应用及设备开发等方面提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜银耳:采于重庆市黔江区,子实体呈乳白色,胶质半透明,直径 $10 \sim 12 \text{ cm}$,鲜样平均含水率为 $75\% \sim 80\%$ (湿基),采后在冷藏并保湿的条件下贮运。

红外干燥设备,泰州圣泰科红外科技有限公司;FA2004A 型分析天平,上海精天科贸有限公司。

1.2 方法

1.2.1 试验原料的预处理方法

试验原料的预处理:鲜银耳→挑选→剔除银耳基部培养基→清洗→擦拭表面水分→沥干→低温通风存放。

1.2.2 水分比(M_R)的测定

鲜银耳预处理好后,按一定的辅料密度均匀平铺在红外干燥机的平底托盘(不带边沿, $30 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$)中,平底托盘与加热管的距离为 15 cm ,每次干燥试验用 5 盒,定时测定水分含量,含水率采用 AACC 105 $^\circ\text{C}$ 烘箱法测定^[3]。采用水分比(M_R)描述影响因素对银耳红外干燥特性的影响,水分比(M_R)的计算如公式(1)所示,由于 M_e 相对于 M_t 和 M_0 很小,特别是针对红外干燥,通常在工程应用中常忽略不计^[2],因此,物料水分比的计算采用简化式 $M_R = M_t/M_0$ 。

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{(M_0 - M_e)} = \frac{M_t}{M_0} \quad (1)$$

式中: M_R 为水分比; M_t 为物料在 t 时刻的含水率,%; M_0 为物料的初始含水率,%; M_e 为物料的平衡含水率,%。

1.2.3 银耳干燥动力学模型

物料干燥是一个复杂的非稳态传热、传质过程,它不仅受干燥条件的影响,且随物料种类、内部结构、物理化学性质及外部形状不同存在明显差异。国内外研究者通过对不同物料的试验研究数据,总结拟合了几种干燥数学模型来定量地描述干燥规

律^[4-7]。本试验采用指数模型 Lewis、Page、Henderson-Pabis 和 Midilli 方程。

1.2.3.1 指数模型 Lewis

Lewis 基于 Newton 冷却定律建立的描述水分运动的模型,亦被称为牛顿模型。指数模数主要考虑物料表面边界层对水分扩散运动的阻力,忽略了内部水分运动的阻力^[4]。

$$M_R = \exp(-kt) \quad (2)$$

式中: M_R 为水分比; t 为干燥时间; k 为干燥常数。

1.2.3.2 Page 方程

Page 等对时间增加了一个指数,由于指数的引入使理论模型变成了纯经验模型,与方程(2)相比,在一批料的薄层干燥中能改善其精确度^[5]。

$$M_R = \exp(-kt^n) \quad (3)$$

式中: M_R 为水分比; t 为干燥时间; k 为干燥常数; n 为指数。

1.2.3.3 Henderson-Pabis 方程

Henderson-Pabis 干燥模型用了两个常数来反映物料的薄层干燥特性^[6],如下所示:

$$M_R = a^* \exp(-kt) \quad (4)$$

式中: M_R 为水分比; t 为干燥时间; a^* 、 k 为干燥常数。

1.2.3.4 Midilli 方程

Midilli 模型是在扩散理论的基础上,认为不同物料干燥速率在不同范围内与含水率和平衡含水率之差成正比,在不同单位内比例系数不同,并引入特定修正系数进行修正^[7],如下所示:

$$M_R = a^* \exp(-kt^n) + bt \quad (5)$$

式中: M_R 为水分比; t 为干燥时间; a^* 、 k 、 b 为干燥常数; n 为干燥指数。

1.2.4 数据统计分析和评价方法

将各个试验数据分别代入动力学模型方程式(2)~(5)中,作 M_R-t 图,采用 Origin 8.0 (Systat Software Inc.) 数据处理软件进行拟合,得银耳干燥的动力学模型方程及其评价参数。评价模型的指标包括决定系数(R^2)、卡方值(χ^2)和均方根误差(RMSE), R^2 越大, χ^2 和 RMSE 越小,模型拟合效果越好^[8]。其中 χ^2 和 RMSE 计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{pre},i} - Y_{\text{exp},i})^2}{N}}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{pre},i} - Y_{\text{exp},i})^2}{N-n}$$

式中: $Y_{pre,i}$ 和 $Y_{exp,i}$ 分别表示预测值和测定值; N 为观测值个数; n 为模型中待定常数个数。

2 结果与分析

2.1 银耳的红外辐射干燥特性研究

2.1.1 温度(T)对水分比(M_R)影响

从图1中看出,随温度提高,水分比明显减少,说明温度提高,干燥速率增大。当温度为140℃时,在试验时观察到银耳的表面出现轻微炭化现象,可能是银耳出现了氧化降解,所以,选择80~120℃作为银耳的干燥温度。

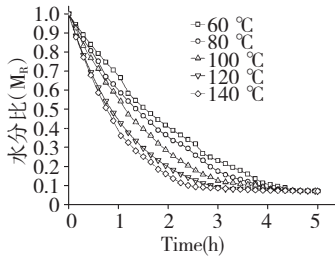


图1 银耳在不同温度下的干燥曲线

Fig. 1 M_R for *T. fuciformis* drying at different temperatures

注:试验条件为 $I = 2 \text{ W/cm}^2$, $v = 1 \text{ m/s}$ 。

Note: the experimental conditions were: $I = 2 \text{ W/cm}^2$, $v = 1 \text{ m/s}$ 。

2.1.2 辐射强度(I)对水分比影响

红外辐射强度的改变是通过调节辐射器的输入功率来实现的,图2表示辐射强度与水分比之间干燥动力学曲线图。随着 I 的提高,银耳水分比下降幅度明显增大,辐射强度是影响银耳干燥脱水的重要因素。当 $I \leq 4 \text{ W/cm}^2$ 时, I 每增加 1 W/cm^2 ,干燥时间可以缩短40~50 min;而当 I 由 4 W/cm^2 提高到 5 W/cm^2 时,干燥时间和 M_R 幅度均变化较小,表明此时辐射强度的增加并不能提高干燥速率,因为

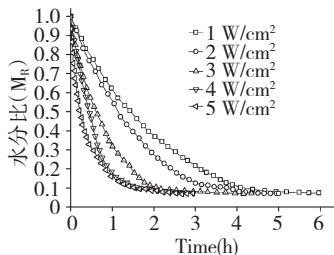


图2 银耳在不同辐射强度下的干燥曲线

Fig. 2 M_R for *T. fuciformis* drying at different infrared intensities

注:试验条件为 $v = 1 \text{ m/s}$, $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

Note: the experimental conditions were: $v = 1 \text{ m/s}$, $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

当银耳的表面温度达到一定数值时,将会产生表面硬化现象,阻碍水分的扩散^[9]。

2.1.3 空气流速(v)对水分比影响

空气流速(v)对银耳红外辐射干燥水分比的影响如图3所示,随着 v 增加,水分比略微下降,其原因在于,一方面,热空气带走了银耳干燥过程中产生的水蒸气,加快了水分的扩散;另一方面也使热量扩散,降低了干燥效率^[10]。尽管如此, v 对水分比的影响并不显著。

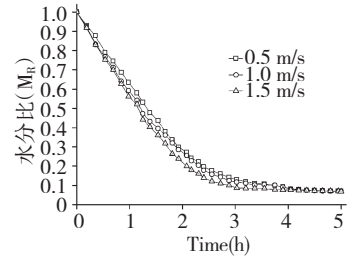


图3 银耳在不同空气流速下的干燥曲线

Fig. 3 M_R for *T. fuciformis* drying at different air velocities

注:试验条件为 $I = 2 \text{ W/cm}^2$, $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

Note: the experimental conditions were: $I = 2 \text{ W/cm}^2$, $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 银耳的红外辐射干燥模型

对式(2)~(5)列出的4个比较常用的干燥数学模型进行拟合,结果表明,与其它3个模型相比,Midilli模型的 R^2 均大于0.9983, χ^2 介于 3.16×10^{-5} 和 1.51×10^{-4} 之间, RMSE介于0.0053和0.0115之间(表1),说明Midilli模型较其它模型能更为准确地描述银耳红外辐射干燥过程。从表1还可以看出,在不同的温度下, Midilli动力学模型的参数值不同,将它们分别进行多元回归数据拟合,建立Midilli动力学模型的参数值与温度 T 的回归方程,得下式:

$$M_R = 0.94622 \exp(0.00056T) \times \exp(-0.67884 + 0.00819T - 7.74483 \times 10^{-5} T^2) t^{(1.0940 + 0.00107T - 7.4724 \times 10^{-6} T^2)} + [0.01443 - 0.01506 / (1 + 4.6239 \times 10^{-5} \exp(0.1T))] t \quad (6)$$

式(6)准确表明了红外辐射干燥过程中不同温度 T 和干燥时间 t 对 M_R 的影响,利用式(6),不同温度下模型预测值 M_R 与真实试验值 M_R 比较如图4所示。由图4可以看出,不同温度下试验值与Midilli模型预测值基本吻合($R_{ave}^2 = 0.9857$)。因此,说明Midilli模型能较好地反映不同红外辐射温度下银耳的干燥规律。

表1 银耳红外辐射干燥动力学模型拟合

Table 1 Curve fitting criteria for the infrared drying models of *T. fuciformis*

模型 Model	温度 Temperature(°C)	参数 Parameter	R^2	χ^2	RMSE
Lewis	60	k = 0. 47449	0. 9894	$8. 77 \times 10^{-4}$	0. 0292
	80	k = 0. 45664	0. 9877	$3. 61 \times 10^{-4}$	0. 0187
	100	k = 0. 62575	0. 9966	$2. 63 \times 10^{-4}$	0. 0160
	120	k = 0. 72865	0. 9755	$5. 77 \times 10^{-4}$	0. 0237
	140	k = 0. 88926	0. 9844	0. 0010	0. 0316
Page	60	k = 0. 4091 , n = 1. 1750	0. 9983	$1. 50 \times 10^{-4}$	0. 0119
	80	k = 0. 5018 , n = 1. 0932	0. 9819	$1. 48 \times 10^{-4}$	0. 0118
	100	k = 0. 6127 , n = 1. 0405	0. 9790	$2. 30 \times 10^{-4}$	0. 0147
	120	k = 0. 8158 , n = 0. 9245	0. 9935	$4. 57 \times 10^{-4}$	0. 0208
	140	k = 0. 9100 , n = 0. 9163	0. 9865	$9. 16 \times 10^{-4}$	0. 0294
Henderson-Pabis	60	a = 1. 0502 , k = 0. 4994	0. 9928	$6. 09 \times 10^{-4}$	0. 0240
	80	a = 1. 0278 , k = 0. 5542	0. 9764	$2. 89 \times 10^{-4}$	0. 0165
	100	a = 1. 0187 , k = 0. 6405	0. 9919	$2. 39 \times 10^{-4}$	0. 0150
	120	a = 0. 9838 , k = 0. 7772	0. 9917	$5. 74 \times 10^{-4}$	0. 0233
	140	a = 0. 9839 , k = 0. 7773	0. 9918	0. 0011	0. 0315
Midilli	60	a = 0. 9811 , k = 0. 4799 , n = 1. 1256 , b = 0. 0001	0. 9983	$1. 16 \times 10^{-4}$	0. 0102
	80	a = 0. 9893 , k = 0. 4878 , n = 1. 1182 , b = 0. 0005	0. 9983	$1. 51 \times 10^{-4}$	0. 0115
	100	a = 0. 9973 , k = 0. 6233 , n = 1. 1142 , b = 0. 0077	0. 9993	$6. 86 \times 10^{-5}$	0. 0078
	120	a = 1. 0097 , k = 0. 8399 , n = 1. 0700 , b = 0. 0119	0. 9996	$3. 16 \times 10^{-5}$	0. 0053
	140	a = 1. 0269 , k = 0. 9635 , n = 1. 1067 , b = 0. 0147	0. 9994	$4. 68 \times 10^{-5}$	0. 0064

注: R^2 , χ^2 和 RMSE 分别表示相关系数、卡方值和均方根误差。

Note: R^2 , χ^2 and RMSE represents correlation coefficient, Chi-square value and root-mean-square error, respectively.

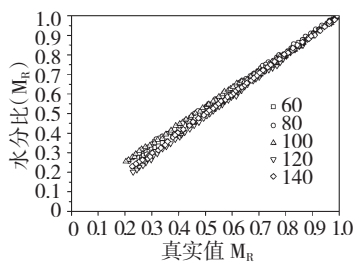


图4 Midilli 动力学模型的试验值和预测值比较

Fig. 4 Experimental and predicted moisture ratio values for the selected Midilli model

3 结论

在一定试验条件下,红外辐射干燥温度和辐射强度对银耳红外薄层干燥失水率的影响较大。在所研究范围内,银耳的红外辐射干燥规律可以用 Midilli 模型较准确的描述,运用该模型能够较准确地预测银耳红外辐射干燥过程的含水率及失水速率变

化,解决银耳在干燥生产过程中含水率在线检测难的难题,为银耳红外辐射干燥过程的优化和控制提供理论依据。

参考文献

- Huang Y (黄艳), Huang JL (黄建立), Zheng BD (郑宝东). Microwave vacuum drying properties and kinetics model of white fungus. *Transactions CSAE*(农业工程学报), 2010, 26:362-367.
- Liu YH(刘云宏), Zhu WX(朱文学), Ma HL(马海乐). Model of vacuum infrared radiation drying on Rehmanniae. *Transactions CSAM*(农业机械学报), 2010, 1:122-126.
- AACC. Approved method of the American Association of Cereal Chemists, 1995, 9th ed. St. Paul, MN.
- Bruce DM. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C. *J Agric Eng Res*, 1985, 32: 337-347.