

# 杏鲍菇的热风干燥特性与动力学模型

陈健凯<sup>1,2</sup>, 林河通<sup>1,3</sup>, 李辉<sup>1,4</sup>, 谭慧君<sup>1,3</sup>, 林艺芬<sup>1,3</sup>

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

**摘要:** 研究了杏鲍菇在不同热风温度、风速、物料尺寸、物料堆积层数等条件下的热风干燥特性, 并建立热风干燥数学模型。试验表明: 热风温度、风速、物料尺寸和物料堆积层数均显著影响杏鲍菇的热风干燥特性。热风温度越高、风速越快, 杏鲍菇的干燥速率越快, 干燥时间越短。当物料尺寸较小或物料单层干燥时, 也能加快干燥速率, 缩短干燥时间。杏鲍菇热风温度为 80℃ 时干燥速率较快; 风速为 1.5 m/s 时, 杏鲍菇干燥速率较快, 干燥时间较短; 物料尺寸 1 cm×1 cm, 物料堆积层数为单层进行干燥时, 干燥速率均较快。应用 Matlab 7.0 软件, 采用高斯-牛顿运算法对 5 种干燥模型进行非线性回归拟合求解, 并确定模型系数。结果发现 Two-term 模型具有较高的决定系数  $R^2$ , 较低的残差平方和 SSE 及均方根误差 RMSE, 该模型能准确地表达和预测杏鲍菇热风干燥过程的水分变化规律。

**关键词:** 杏鲍菇; 热风干燥; 干燥特性; 干燥模型

文章编号: 1673-9078(2013)11-2692-2699

## Hot-air Drying Characteristics and Kinetics Model of *Pleurotus eryngii*

CHEN Jian-kai<sup>1,2</sup>, LIN He-tong<sup>1,3</sup>, LI Hui<sup>1,4</sup>, TAN Hui-jun<sup>1,3</sup>, LIN Yi-fen<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:** The hot-air drying characteristics of *Pleurotus eryngii* were studied in terms of different hot-air temperatures, air velocities, material size and accumulation layers of material, meanwhile a hot-air drying mathematical model was established. The test showed that these factors significantly affected the hot-air drying characteristics. Increasing the air temperature and velocity, or lowering size material, single accumulation layer could fasten the drying speed and shorten drying time of *Pleurotus eryngii*. The speed of a hot-air drying would be faster at air temperature of 80 °C with the material size of 1 cm × 1 cm, or single accumulation layer. When air velocity was 1.5 m/s, the drying speed increased as the drying time was shorted. The experimental drying data of *Pleurotus eryngii* was used to fit five available drying models by applying Matlab 7.0 and using Gauss-Newton algorithm, and the coefficients of models were determined by non-linear regression analysis. It was showed that Two-term model had higher correction coefficient ( $R^2$ ), lower square sum of error value (SSE) and root mean square error value (RMSE), which could exactly describe and predict the moisture dynamics of *Pleurotus eryngii* during hot-air drying process.

**Key words:** *Pleurotus eryngii*; hot-air drying; drying characteristic; drying model

杏鲍菇 (*Pleurotus eryngii*) 又名刺芹侧耳, 别名雪茸、鲍鱼菇或干贝菇, 属真菌门担, 子菌亚门真担

收稿日期: 2013-07-18

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2007BAD07B06); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目 (闽教科〔2007〕20 号); 福建省教育厅科技计划资助项目 (JB10236); 福建漳州市自然科学基金资助项目 (ZZ2012J07)

作者简介: 陈健凯 (1969-), 女, 副教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程

通讯作者: 林河通 (196-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程

子菌纲层菌亚纲伞菌目侧耳科侧耳属, 是一种珍贵的药食皆宜真菌。杏鲍菇原产于欧洲南部、非洲北部及中亚地区的高山、草原、沙漠地区, 我国四川、青海、

新疆也有少量分布, 目前国内栽培的杏鲍菇多数是上世纪 90 年代后从欧洲引进的。杏鲍菇肉质肥厚, 味道鲜美, 兼有鲍鱼和杏仁的香味, 是一种深受消费者欢迎的食用菌。其营养丰富, 蛋白质含量高达 21.92%, 多糖 4.9%, 膳食纤维 30.14%, 灰分 6.34%<sup>[1]</sup>。近年来, 随着杏鲍菇种植方式形成工厂化生产模式, 产量急剧上升, 日产量从数百斤到 10 t 的企业在全国已有 100

多家。产量上去了,但销售渠道单一,主要是鲜销。由于杏鲍菇湿基含水率高达88~92%,采摘后保存时间短,给鲜销和出口造成极大的压力,增加了种植和经营的风险,而深加工是解决这种增产不增收局面的最好方法。将杏鲍菇进行干制是缓解鲜销压力,延长其货架供应期的重要措施之一。热风干燥具有适用范围广、物料处理量大、设备成本及操作费用低等优点,是干燥食用菌最常见的方法。国内外学者对荔枝果肉、银杏、南瓜粉、鲜块菌片、蘑菇片、香菇、平菇等果蔬、食用菌的热风干燥工艺进行了研究<sup>[2-8]</sup>,但目前尚未见杏鲍菇热风干燥方面的研究报道。因此,本文以杏鲍菇为原料,研究不同热风温度、风速、物料尺寸和物料堆积层数对杏鲍菇热风干燥特性的影响,并建立杏鲍菇热风干燥的动力学模型,旨在阐明杏鲍菇热风干燥规律,同时为开发新型杏鲍菇干制产品提供科学依据和生产实践指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

杏鲍菇,由福建省漳州市九湖食用菌研究所提供,鲜菇湿基含水率约为88~92%。

### 1.2 试验装置

热风干燥试验装置为福建农林大学食品科学学院和福建省安溪佳友机械有限公司联合研制的6LH-7型果蔬烘干机,结构如图1所示。加热原件为电阻丝,加热介质为循环热空气。控制面板装有温控器、计时器、风速调节器和转速调节器等,可以实现热风温度、时间、风速和物料盘转速的控制。干燥室尺寸为73 cm×60 cm×112 cm,物料盘分为12层,位于转轴的支架上。

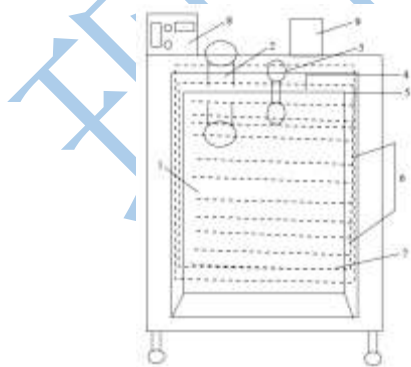


图1 热风干燥试验装置结构图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental hot air drying apparatus

注:1:温度传感器,2:水分蒸发口,3:进气口,4:风

轮,5:电炉丝,6:热风循环均衡装置,7:物料盘,8:控制面板,9:风机。

### 1.3 试验设计

筛选长度约为15 cm的杏鲍菇,沿菇长方向取材,切成截面为正方形的条柱状。选取热风温度、风速、物料截面尺寸和物料堆积层数为试验因素,分别进行干燥试验,研究这些因素对杏鲍菇热风干燥特性的影响。试验设计如表1。

表1 杏鲍菇热风干燥试验方案设计

Table 1 Arrangement of hot-air drying experiment for *Pleurotus*

<i>eryngii</i>				
分组	序号	试验因素	试验水平	固定条件
第一组	1		60℃	风速 1.2 m/s
	2	热风温度	70℃	截面尺寸 1.5 cm×1.5 cm
	3		80℃	单层 (500 g)
第二组	4		0.8 m/s	热风温度 70℃
	5	风速	1.2 m/s	截面尺寸 1.5 cm×1.5 cm
	6		1.5 m/s	单层 (500 g)
第三组	7	截面尺寸	1.0 cm×1.0 cm	风速 1.2 m/s
	8	(柱状)	1.5 cm×1.5 cm	热风温度 70℃
	9		2.0 cm×2.0 cm	单层 (500 g)
第四组	10	物料堆积层数	单层(500 g)	风速 1.2 m/s
	11		双层(1000 g)	热风温度 70℃
	12		三层(1500 g)	截面尺寸 1.5 cm×1.5 cm

试验因素及水平的选择是建立在大量预试验的基础上。果蔬烘干机的最高风速是1.5 m/s,温度可以达90℃以上,加热功率与所设定的温度和风速有关。在预试验中,温度取80℃以上时,虽然干燥速率大,干燥时间短,但干制品褐变严重,外形皱缩严重,品相很差,而且当温度取80℃以上,若风速较小时(如取1.2 m/s风速以下),很容易导致散热不及时,烧坏电阻丝,所以本试验最高温度取80℃;温度低于60℃以下时,如预试验中55℃与60℃比较,其它条件如表1第一组,结果显示55℃条件的干燥时间比60℃条件的干燥时间延长了近1/2,而且由于干燥时间长,色泽、形状均很差。当风速低于0.8 m/s时,如预试验中的0.5 m/s和0.8 m/s比较,其它条件如表1第二组,0.5 m/s的干燥时间比0.8 m/s的干燥时间延长了近一倍。第三组的截面尺寸是取材时沿菇长方向切成长条柱状,截面均为正方形。物料盘的面积刚好够1.5 cm×1.5 cm截面尺寸柱状物料500 g时铺满一层,所以第四组物料量为1000 g时,铺满双层,物料量为1500 g时铺满三层。

以上各组试验,每隔10 min测一次质量,直到干

燥至安全含水率(湿基)10~13%终止(国标规定的安全含水率)。每组试验平行重复3次,取其平均值。

### 1.4 水分含量的测定

杏鲍菇物料含水量的测定参照 GB/T 5009.3-2003。

### 1.5 干燥曲线的数学模型

本文在参阅相关文献<sup>[9~17]</sup>的基础上,采用以下5种经验或半经验的数学模型对杏鲍菇热风干燥试验数据进行拟合,见表2。

表2 选择的薄层干燥数学模型

Table 2 The selected thin layer-drying mathematical models

模型方程式	模型名称
$M_R = \exp(-kt)$	Lewis/Newton
$M_R = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis
$M_R = \exp(-ktn)$	Page
$M_R = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic
$M_R = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1 t)$	Two-term

注:  $M_R$ 表示水分比;  $t$ 表示干燥时间;  $k$ 表示干燥速度常数;  $a, b, c, n$ 表示干燥常数

水分比( $M_R$ )和干燥速率分别由公式2、3计算。

水分比计算公式为

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

因为  $M_e$  相对于  $M_t, M_0$  来说非常小,可忽略不计。

故上式可以简化为:

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

$$\text{干燥速率} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3)$$

注:  $M$ -物料在任意时刻的含水量, kg/kg (干基);  $M_0$ -物料的初始含水量, kg/kg (干基);  $M_e$ -物料的平衡含水量, kg/kg (干基);  $M_t$ -物料在  $t$  时刻的含水量, kg/kg (干基);  $M_{t+dt}$ -物料在  $t+dt$  时刻的含水量, kg/kg (干基)。

### 1.6 数据分析

以表1中12组不同热风干燥条件得出的试验数据做为实测值样本,应用 Matlab 7.0 软件,采用高斯-牛顿运算法,对5种干燥模型进行非线性最小二乘法数据拟合求解。模型的拟合精确度分析采用评价指标  $R^2$  (决定系数)、SSE (平均偏差) 及 RMSE (均方误差)。 $R^2$  越高, SSE、RMSE 越低,说明模型拟合度越高,以此选出最合适的干燥模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 杏鲍菇热风干燥特性分析

#### 2.1.1 热风温度对杏鲍菇干燥特性的影响

不同热风温度下杏鲍菇的干燥曲线和干燥速率曲线见图2、图3。

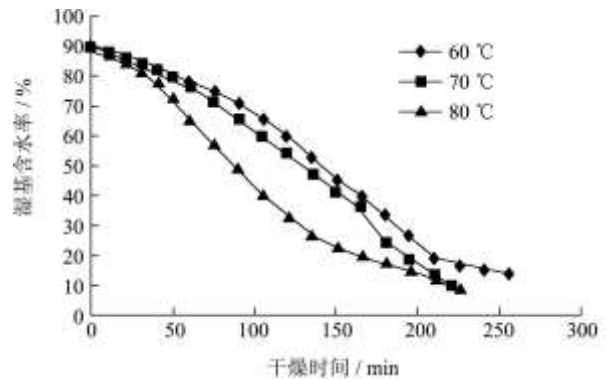


图2 不同热风温度下杏鲍菇的热风干燥曲线

Fig.2 Hot-air drying curves of *Pleurotus eryngii* at different hot-air temperatures

由图2可看出,在风速、物料尺寸和物料堆积层数固定的条件下,杏鲍菇的干燥时间随着热风温度的升高而缩短。在60 °C、70 °C和80 °C的热风温度下,将杏鲍菇干燥至目标含水率所需时间分别为260 min、225 min和195 min,说明提高热风温度可以加快传热速率,缩短干燥时间。

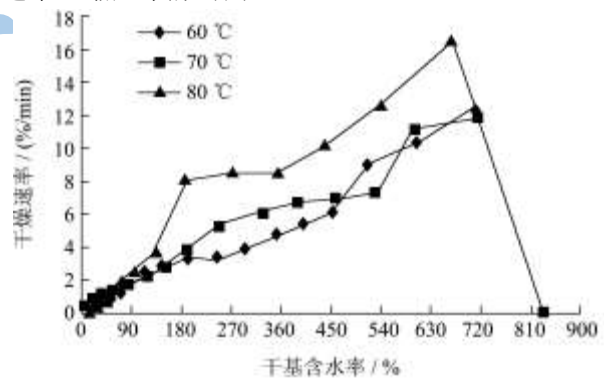


图3 不同热风温度下杏鲍菇的热风干燥速率曲线

Fig.3 Hot-air drying rate of *Pleurotus eryngii* at different hot-air temperatures

由图3可知,杏鲍菇的干燥速率随热风温度的升高而加快。热风干燥的最初10 min,60 °C、70 °C、80 °C条件下的失水量分别为6.6 g/min、8.0 g/min、8.8 g/min。在整个干燥过程中,温度为80 °C时的干燥速率最快,平均干燥速率为3.9%/min,其次为70 °C,平均干燥速率为3.3%/min,60 °C时的干燥速率最慢,为3.2%/min。干燥过程中发现,60 °C干燥的杏鲍菇褐

变较严重,这可能是由于温度较低时,物料表面水分蒸发慢,内部扩散迁移动力小,造成杏鲍菇的干燥速率低,干燥时间长,杏鲍菇中的多酚氧化酶与空气中的氧气长时间接触,发生酶促褐变导致的。

### 2.1.2 风速对杏鲍菇干燥特性的影响

不同风速下杏鲍菇的热风干燥曲线和干燥速率曲线见图4、图5。

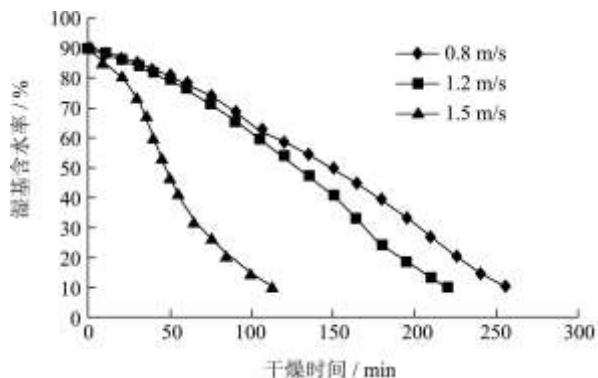


图4 不同热风风速下杏鲍菇的热风干燥曲线

Fig.4 Hot-air drying curves of *Pleurotus eryngii* at different hot-air velocities

由图4可知,杏鲍菇的干燥时间随风速的增大而缩短。风速为0.8 m/s、1.2 m/s和1.5 m/s条件下,将杏鲍菇干燥至目标含水量所需干燥时间分别为255 min、225 min和120 min,1.5 m/s风速条件的干燥时间比0.8 m/s缩短1倍以上。

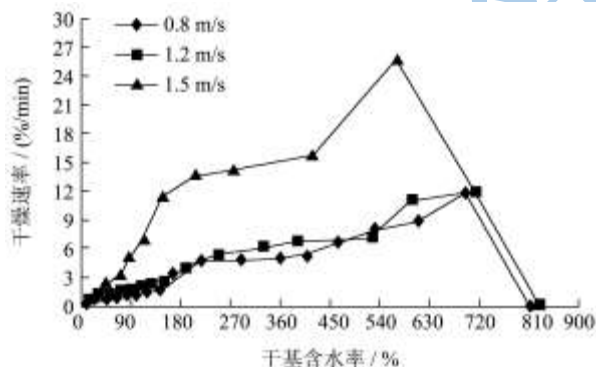


图5 不同热风风速下杏鲍菇的热风干燥速率曲线

Fig.5 Hot-air drying rate of *Pleurotus eryngii* at different hot-air velocities

由图5可知,风速越大,干燥速率越快。1.5 m/s风速时的干燥效率明显高于1.2 m/s和0.8 m/s风速时的干燥效率。在整个干燥过程中,风速为0.8 m/s、1.2 m/s和1.5 m/s条件下的平均干燥速率分别为3.2 %/min、3.7 %/min和7.3 %/min。杏鲍菇整个热风干燥过程只有开始的升速度及其后的降速干燥阶段,没有恒速阶段。这可能与热风干燥设备有很大关系,其内容积大,而物料量少,加热过程中物料表面的水分被及时带走,较难在物料表面形成饱和蒸汽状态。

南瓜片<sup>[18]</sup>、红辣椒<sup>[19]</sup>、茭白<sup>[20]</sup>热风干燥时也有类似的结果。杏鲍菇热风干燥过程中发现,由于干燥速率快,1.5 m/s条件下干燥的杏鲍菇干制产品色泽亮白、褐变程度最低,但缺点是成品质地较脆。

### 2.1.3 物料尺寸对杏鲍菇干燥特性的影响

不同物料尺寸杏鲍菇的热风干燥曲线和干燥速率曲线见图6、图7。

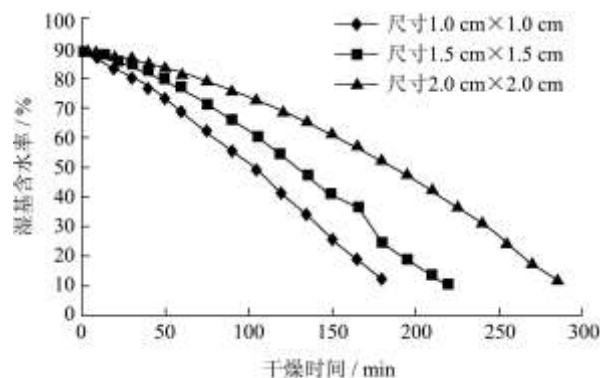


图6 不同物料尺寸下杏鲍菇的热风干燥曲线

Fig.6 Hot-air drying curves of *Pleurotus eryngii* at different material size

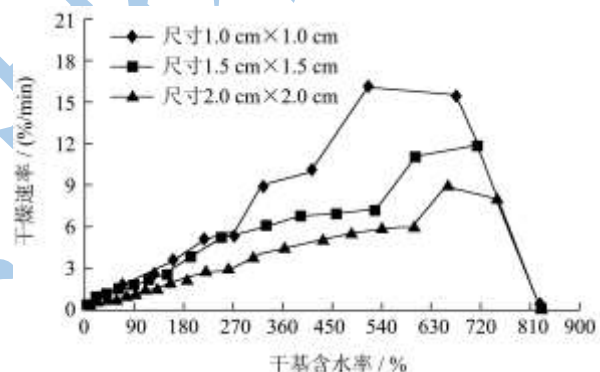


图7 不同物料尺寸下杏鲍菇的热风干燥速率曲线

Fig.7 Hot-air drying rate of *Pleurotus eryngii* at different material size

由图6、图7可知,物料尺寸越小,干燥时间越短,干燥速率越快。1 cm×1 cm、1.5 cm×1.5 cm和2 cm×2 cm截面尺寸的杏鲍菇干燥时间分别为165 min、225 min和285 min,平均干燥速率分别为4.5 %/min、3.7 %/min和2.9 %/min。尺寸较小时,干燥速率较快,这可能是由于尺寸较小时,比表面积较大,增大了表面水分与热空气的接触面积,从而提高了干燥速率。还可能是由于尺寸小时,物料内部水分往外迁移路径短,有利于物料外表面水分的蒸发,从而大大提高了干燥效率。

### 2.1.4 物料堆积层数对杏鲍菇热风干燥特性的影响

不同物料堆积层数杏鲍菇的热风干燥曲线和干燥速率曲线见图8、图9。

由图 8、9 可知, 在热风温度、风速、尺寸相同、物料盘大小相同的情况下, 物料堆积越厚 (装载量越大), 干燥速率越慢。物料为单层、双层和三层 (对应的装载量分别为 500 g、1000 g 和 1500 g) 时, 干燥至目标含水量分别需要 225 min、270 min 和 345 min, 平均干燥速率分别为 3.7%/min、3.0%/min 和 2.4%/min。物料堆积厚会导致干燥时间延长, 这是由于随着装载量的增加, 干燥过程所要去除的水分也相应增加, 而在热风温度和风速相同的条件下, 单位时间内蒸发排除水分的能力是一定的, 从而导致干燥时间延长; 而物料层数多, 会降低与干燥介质的接触面积, 不利于中、底层物料水分的挥发, 导致干燥速率下降。

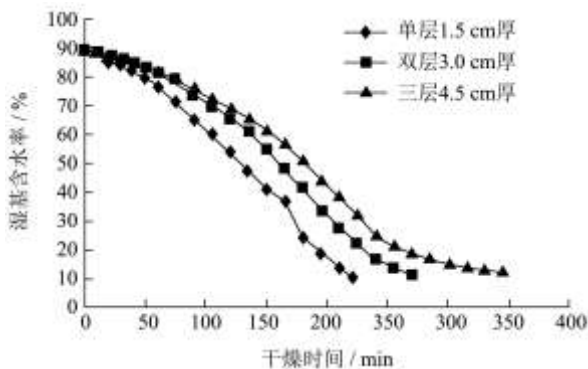


图 8 不同物料堆积层数下杏鲍菇的热风干燥曲线

Fig.8 Hot-air drying curves of *Pleurotus eryngii* at different accumulation layers of material

### 2.2.1 杏鲍菇热风干燥模型的选择

将杏鲍菇不同热风干燥条件下的试验数据用于干燥模型拟合研究。分别对表 2 的 5 种干燥模型进行拟合求解, 并通过比较拟合优度来确定最优的干燥模型。不同热风干燥条件下各数学模型的拟合结果如表 3 所示。五种模型是参阅国内外学者研究结果, 筛选出的较适用于热风干燥的模型<sup>[9-17]</sup>, 本试验拟合结果也显示, 五种模型的 R<sup>2</sup> 均大于 0.99, 表明拟合度均较高。从表 3~表 6 中四个因素的水平拟合结果进行比较, Two-term 模型的 R<sup>2</sup> 值最高, SSE 和 RMSE 最小, 拟合程度最优, 故可选用 Two-term 模型  $M_R = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$  来描述杏鲍菇热风干燥过程一定干燥条件下物料的即时含水率。

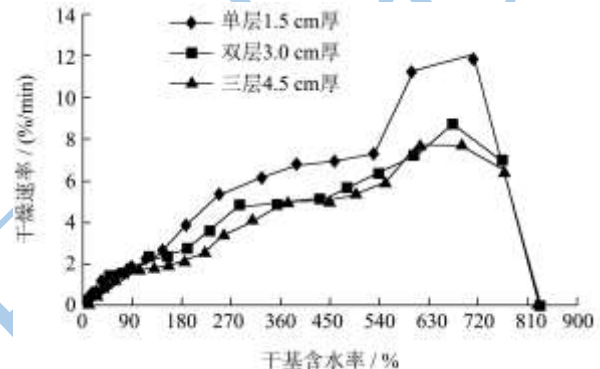


图 9 不同物料堆积层数下杏鲍菇的热风干燥速率曲线

Fig.9 Hot-air drying rate of *Pleurotus eryngii* at different accumulation layers of material

## 2.2 杏鲍菇热风干燥的数学模型

表 3 不同风速下 5 种干燥模型的常数项和回归系数

Table 3 Constants and regression coefficients of the five drying models of different air velocities

模型名称	风速/(m/s)	R <sup>2</sup>	SSE	RMSE	常数项
Lewis/Newton	0.8	0.9992	0.0015	0.0087	k=0.0139
	1.2	0.9962	0.0064	0.0189	k=0.0222
	1.5	0.9959	0.0051	0.0216	k=0.0391
Henderson and Pabis	0.8	0.9993	0.0014	0.0084	k=0.0138, a=0.9931
	1.2	0.9966	0.0062	0.0185	k=0.0225, a=1.0123
	1.5	0.9958	0.0048	0.0208	k=0.0397, a=1.0165
Page	0.8	0.9992	0.0015	0.0086	k=0.9913, n=0.0144
	1.2	0.9963	0.0064	0.0188	k=0.0215, n=1.0087
	1.5	0.9979	0.0024	0.0147	k=0.0250, n=1.1276
Logarithmic	0.8	0.9995	0.0009	0.0067	k=0.0132, a=1.0015, c=-0.0148
	1.2	0.9971	0.0044	0.0157	k=0.0239, a=1.0029, c=0.0182
	1.5	0.9960	0.0043	0.0198	k=0.0383, a=1.0258, c=-0.0131
Two-term	0.8	0.9997	0.0005	0.0049	k <sub>0</sub> =0.0136, k <sub>1</sub> =-0.0250, a=0.9894, b=-4.0247
	1.2	0.9971	0.0044	0.0157	k <sub>0</sub> =0.0014, k <sub>1</sub> =0.0240, a=0.0238, b=0.9978
	1.5	0.9981	0.0021	0.0139	k <sub>0</sub> =0.0596, k <sub>1</sub> =0.0603, a=46.1407, b=-45.1450

表 4 不同热风温度下 5 种干燥模型的常数项和回归系数

Table 4 Constants and regression coefficients of the five drying models of different hot-air temperatures

模型名称	热风温度/°C	R <sup>2</sup>	SSE	RMSE	常数项
Lewis/Newton	60	0.9982	0.0035	0.0131	k=0.0147
	70	0.9963	0.0064	0.0189	k=0.0222
	80	0.9975	0.0041	0.0156	k=0.0261
Henderson and Pabis	60	0.9984	0.0032	0.0126	k=0.0145, a=0.9891
	70	0.9966	0.0062	0.0185	k=0.0225, a=1.0123
	80	0.9978	0.0038	0.0149	k=0.0265, a=1.0149
Page	60	0.9982	0.0034	0.0130	k=0.0154, n=0.9890
	70	0.9964	0.0064	0.0188	k=0.0215, n=1.0087
	80	0.9979	0.0039	0.0152	k=0.0236, n=1.028
Logarithmic	60	0.9988	0.0022	0.0105	k=0.01372, a=1.00024, c=-0.0198
	70	0.9971	0.0044	0.0157	k=0.0238, a=1.0029, c=0.0182
	80	0.9982	0.0026	0.0124	k=0.0277, a=1.0068, c=0.0145
Two-term	60	0.9988	0.0022	0.0104	k <sub>0</sub> =-0.0038, k <sub>1</sub> =0.0139, a=-0.0073, b=0.9888
	70	0.9971	0.0044	0.0157	k <sub>0</sub> =0.0014, k <sub>1</sub> =0.0240, a=0.0238, b=0.9978
	80	0.9982	0.0026	0.0123	k <sub>0</sub> =-0.0025, k <sub>1</sub> =0.0275, a=0.0093, b=1.0115

表 5 不同物料尺寸下 5 种干燥模型的常数项和回归系数

Table 5 Constants and regression coefficients of the five drying models of different material sizes

模型名称	物料尺寸	R <sup>2</sup>	SSE	RMSE	常数项
Lewis/Newton	1 cm×1 cm	0.9968	0.0048	0.0185	k=0.0245
	1.5 cm×1.5 cm	0.9963	0.0064	0.0189	k=0.0222
	2 cm×2 cm	0.9992	0.0023	0.0103	k=0.0111
Henderson and Pabis	1 cm×1 cm	0.9969	0.0040	0.0169	k=0.0251, a=1.0227
	1.5 cm×1.5 cm	0.9966	0.0062	0.0185	k=0.0225, a=1.0123
	2 cm×2 cm	0.9991	0.0022	0.0100	k=0.0112, a=1.0065
Page	1 cm×1 cm	0.9978	0.0031	0.0150	k=0.0182, n=1.0787
	1.5 cm×1.5 cm	0.9963	0.0064	0.0188	k=0.0215, n=1.009
	2 cm×2 cm	0.9992	0.0016	0.0086	k=0.0096, n=1.0335
Logarithmic	1 cm×1 cm	0.9970	0.0040	0.0169	k=0.0253, a=1.0210, c=0.0027
	1.5 cm×1.5 cm	0.9971	0.0044	0.0157	k=0.0239, a=1.0029, c=0.0182
	2 cm×2 cm	0.9998	0.0004	0.0044	k=0.0103, a=1.0260, c=-0.0314
Two-term	1 cm×1 cm	0.9984	0.0023	0.0129	k <sub>0</sub> =0.0268, k <sub>1</sub> =0.1568, a=1.0934, b=-0.094
	1.5 cm×1.5 cm	0.9971	0.0044	0.0157	k <sub>0</sub> =0.0014, k <sub>1</sub> =0.0240, a=0.0238, b=0.9978
	2 cm×2 cm	0.9998	0.0003	0.0039	k <sub>0</sub> =0.0108, k <sub>1</sub> =-0.0075, a=1.0006, b=-0.0034

表 6 不同物料堆积层数下 5 种干燥模型的常数项和回归系数

Table 6 Constants and regression coefficients of the five drying models of different accumulation layers of material

模型名称	物料堆积层数	R <sup>2</sup>	SSE	RMSE	常数项
Lewis/Newton	1	0.9963	0.0064	0.0187	k=0.0222
	2	0.9974	0.0183	0.0295	k=0.0118
	3	0.9988	0.0080	0.0175	k=0.0110
Henderson and Pabis	1	0.9966	0.0062	0.0185	k=0.0225, a=1.0123
	2	0.9958	0.0111	0.0230	k=0.0125, a=1.0530

转下页

接上页

	3	0.9983	0.0052	0.0142	k=0.0114, a=1.0321
Page	1	0.9963	0.0064	0.0188	k=0.0215, n=1.0087
	2	0.9995	0.0011	0.0071	k=0.0051, n=1.1841
	3	0.9993	0.0016	0.0079	k=0.0069, n=1.1008
Logarithmic	1	0.9971	0.0044	0.01570	k=0.0239, a=1.0029, c=0.0182
	2	0.9985	0.0031	0.0122	k=0.0106, a=1.0954, c=-0.0651
	3	0.9991	0.0023	0.0095	k=0.0105, a=1.0471, c=-0.0274
Two-term	1	0.9971	0.0044	0.0157	k <sub>0</sub> =0.0014, k <sub>1</sub> =0.0240, a=0.0238, b=0.9978
	2	0.9995	0.0010	0.0070	k <sub>0</sub> =0.0195, k <sub>1</sub> =0.0196, a=79.2612, b=-78.2592
	3	0.9994	0.0015	0.0077	k <sub>0</sub> =0.0160, k <sub>1</sub> =0.0162, a=35.6433, b=-34.6397

### 2.2.2 杏鲍菇热风干燥模型的显著性分析

应用 Matlab 7.0 软件对以上拟合结果进行显著性分析,结果如表 7, 显著性 F 检验结果显示, 四个因素

显著, 表中比较显示, Two-term 模型的 F 值同相同干燥条件的其它四个模型比较, 也是最高的, 表明拟合最显著。

表 7 五种干燥模型拟合结果显著性分析

Table 7 Significance analysis of fitting results of the five drying models

影响因素	影响因素	Lewis/Newton	Henderson and Pabis	Page	Logarithmic	Two-term
风速	0.8 m/s	22307.57	24859.3	23425.66	34807.36	67110.27
	1.2 m/s	4259.21	4632.29	4364.97	5573.11	5581.46
	1.5 m/s	2197.05	2114.98	4205.73	2239.13	4730.61
热风温度	60℃	9763.52	10884.18	10666.1	14395.48	14583.02
	70℃	4259.21	4632.29	4364.97	5573.11	5581.46
	80℃	6022.66	6899.03	6967.49	8378.15	8423.43
物料尺寸	1 cm×1 cm	3735.18	3915.72	5546.23	3928.07	7502.93
	1.5 cm×1.5 cm	4259.21	4632.29	4364.97	5573.11	5581.46
	2 cm×2 cm	25.50.73	21847.01	26132.55	93827.02	120227.09
物料堆积层数	1	4259.21	4632.29	4364.97	5573.11	5581.46
	2	7198.58	4466.72	40090.88	12924.58	42047.8
	3	20128.54	13883.45	37419.02	25517.9	39280.54

### 2.2.3 杏鲍菇热风干燥模型的验证

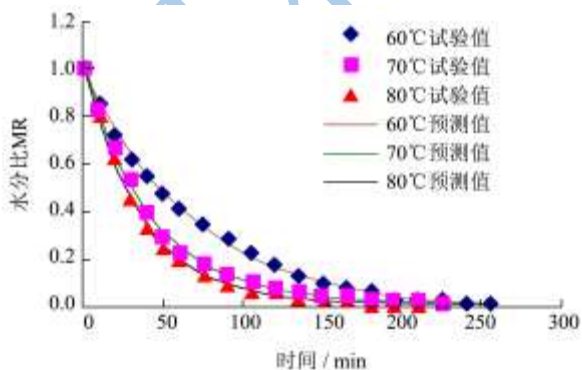


图 10 不同热风温度下杏鲍菇热风干燥的预测值和试验值的比较

Fig.10 Comparison between predicted value and experimental data of hot-air drying of *Pleurotus eryngii* at indicated air temperatures

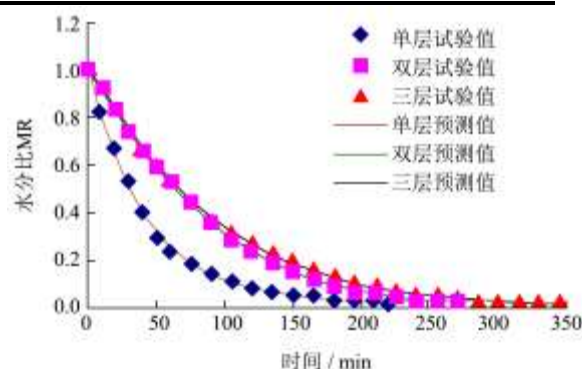


图 11 不同物料堆积层数时杏鲍菇热风干燥的预测值和试验值的比较

Fig.11 Comparison between predicted value and experimental data of hot-air drying of *Pleurotus eryngii* at indicated accumulation layers of material

为验证模型拟合的准确性,对杏鲍菇在不同温度和物料堆积层数条件下的热风干燥的预测值与试验值进行比较,如图10~11所示。可知Two-term模型的预测值与试验值的拟合度很高,此模型能较准确地预测杏鲍菇在热风干燥过程中的水分变化规律,并可用于描述杏鲍菇的热风干燥过程。

### 3 结论

3.1 热风温度、风速、物料尺寸和物料堆积层数等因素均能影响杏鲍菇的热风干燥特性。热风温度越高、风速越快,杏鲍菇的干燥速率越快,干燥时间越短。当物料尺寸较小和单层干燥时,也能加快干燥速率,缩短干燥时间。

3.2 研究发现,杏鲍菇整个热风干燥过程只有开始的升速度及其后的降速干燥阶段,没有恒速阶段。这可能与热风干燥设备与物料装载量的体积比例有很大关系。

3.3 拟和结果表明,Two-term模型拟和优值最好, $R^2$ 值最高,残差平方和SSE及均方根误差RMSE最低,是描述杏鲍菇热风干燥过程最适合的数学模型,该模型能准确地表达和预测杏鲍菇在热风干燥过程中不同条件的任一时刻的水分含量和干燥速率。在实际生产中,可以利用该模型预测并控制杏鲍菇在热风干燥过程的水分变化规律,为降低能耗、保证杏鲍菇干制品质量提供技术依据,同时本次模型拟和、优选方法为实际生产中根据不同物料、不同干燥条件选择适合的预测模型提供可行的试验方法。

### 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 R F, Li H Y, Ye L, et al. Determination of Nutritive and Functional Components of *Pleurotus Eryngii* [J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2007, 5: 85-87
- [2] 张黎骅,徐中明,夏磊,等.银杏果热风干燥工艺参数响应面法优化[J].农业机械学报,2012,43(3):140-145,156  
Zhang LH, Xu ZM, Xia L, et al. Optimization of the hot-air drying technical parameters for ginkgo fruit based on response surface methodology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 140-145,156
- [3] 关志强,王秀芝,李敏,等.荔枝果肉热风干燥薄层模型[J].农业机械学报,2012,43(2): 151-158, 191  
Guan Z Q, Wang X Z, Li M, et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 151-158, 191
- [4] 周爱梅,万艳娟,李少华,等.喷雾干燥及热风干燥对南瓜粉营养特性和感官品质的影响[J].现代食品科技,2011,27(5): 528-533  
Zhou AM, Wan Y J, Li S H, et al. Effect of spray drying and hot air drying on the nutritional and sensory properties of pumpkin powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(5): 528-533
- [5] 苗玉志,张微帷,何兵.鲜块菌片热风干燥工艺参数的优化[J].现代食品科技,2013,29(1):162-166  
Miao Y Z, Zhang W W, He B. Hot-air drying technical parameters optimization of fresh Truffle slices [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(1): 162-166
- [6] Artınaseaw A, Theerakulpisut S, Benjapitaporn C. Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying [J]. Food and Bioprocess Processing, 2010, 88(2-3): 105-114
- [7] Jo W S, Park S D, Park S C, et al. Changes in quality of *Phellinus gilvus* mushroom by different drying methods [J]. Mycoscience, 2009, 50(1): 70-73
- [8] Kotwaliwale N, Bakane P, Verma A. Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78 (4): 1207-1211
- [9] Yaldiz O, Ertekin C, Uzun H I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes [J]. Energy, 2001, 26(5): 457-465
- [10] Wang J. A single-layer model for far-infrared radiation drying of onion slices [J]. Drying Technology, 2002, 20 (10): 1941-1953
- [11] Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single layer drying [J]. Drying Technology, 2002, 20(7): 1503-1513
- [12] Demir V, Gunhan L, Yagcoglu A K, et al. A mathematical modeling and determination of some quality parameters of air-dried bay leaves [J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(3): 325-335
- [13] Ertekin C, Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(3): 349-359
- [14] Toğrul İ T, Pehlivan D. Modeling of thin layer drying of some fruits under open-air sun drying process [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(3): 413-425
- [15] Akpınar E K, Bicer Cetinkaya F. Modeling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 308-315
- [16] Xanthopoulos G, Lambrinos G, Manolopoulou H. Evaluation



- of thin-layer models for mushroom (*Agaricus bisporus*) drying [J]. *Drying Technology*, 2007, 25(9): 1467-1477
- [17] 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
- [18] Doymaz I. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(1): 243-248
- [19] Vega A, Fito P, Andre's A, et al. Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(4): 1460-1466
- [20] Doymaz I. Drying characteristics and kinetics of okra [J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 69(3): 275-279

现代食品科技