

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.023

# 双孢蘑菇远红外干燥神经网络预测模型建立\*

林喜娜 王相友 丁莹

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

**【摘要】** 分析了双孢蘑菇在远红外干燥过程中,辐射强度、辐射距离、物料温度、物料厚度、干燥时间等因素对干燥速率的影响。基于BP神经网络建立了含水率与各因素之间的网络模型结构,输入层、隐含层和输出层的神经元数分别为5、11、1。以干燥试验数据作为训练和测试的样本值,利用Matlab中的神经网络工具箱,经过有限次迭代计算获得一个反映试验数据内在联系的数学模型,并实现对该模型的训练和系统的模拟。结果表明:在试验范围内,BP神经网络可以高效、准确、快速地建立模型,且模型的预测值与实测值拟合较好,能够准确而可靠地实现含水率在线预测。

**关键词:** 双孢蘑菇 远红外 干燥 含水率 预测模型 BP神经网络

中图分类号: TS201; TQ028.6<sup>+</sup>76; S646.1<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)05-0110-05

## Experiment on Neural Network Prediction Modeling of Far Infrared Radiation Drying for *Agaricus bisporus*

Lin Xi'na Wang Xiangyou Ding Ying

(School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

### Abstract

The factors influenced infrared radiation drying rates for *Agaricus bisporus*, such as radiation intensity, radiation distance, material temperature, material thickness and drying time were analyzed. The network model structure between moisture content and all the controlling factors was built based on feed-forward neural network, the selected structure of the applied neural network, with its five inputs, single output and 11 hidden neurons were used. All data series obtained from different drying runs were used for training and test, mathematical model responding to inner relationship of the experimental data was obtained by finite iteration calculation, and it was trained and simulated systemically by using Matlab neural network toolbox. It was concluded that the model could be built by the BP neural network, cost-effectively, accurately and rapidly during far infrared drying of *Agaricus bisporus* within the trial stretch. It was found that the predictions of the artificial neural network model fit the experimental data preferably, and the applications of the artificial neural networks could be used for the online state estimation moisture content with more suitable and accuracy.

**Key words** *Agaricus bisporus*, Far-infrared, Drying, Moisture content, Prediction model, BP neural network

### 引言

双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 属担子菌类、伞菌

目、伞菌科。它是世界性栽培的重要食用真菌之一<sup>[1]</sup>,富含蛋白质(约为3.5%)以及十几种人体所必需的氨基酸。干燥是对果蔬深加工的一种重要手

收稿日期: 2009-07-05 修回日期: 2009-08-15

\* 山东省科技攻关计划资助项目(2008GG10009008)

作者简介: 林喜娜, 硕士生, 主要从事果蔬远红外干燥技术研究, E-mail: ytdxjy6@sina.com

通讯作者: 王相友, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工与贮藏工程研究, E-mail: wxy@sdut.edu.cn

段,它有助于果蔬的贮藏、口味增加和附加值提高,有助于解决果蔬季节性和地域性过于集中,果蔬保鲜贮藏能力不足等问题。

随着经济的发展,能源短缺日益严重,传统的加热干燥能耗大,而且加工后的产品质量不高,污染环境。近年来,远红外加热干燥技术得到了较快发展,通过大量试验验证其具有高效、节能、环保的特点<sup>[2-4]</sup>。但是由于双孢蘑菇远红外干燥具有显著的非线性和时变性,很难构造一个数学模型来描述其含水率的变化规律,因此传统的预测方法(如时间序列和回归分析)通常选定某种函数建立其数学模型,并通过一定计算修正模型,然后以此模型进行预测。这类方法由于其收敛性、适应性和预测精度均受到不同程度的局限,且对于各种复杂的、随机变化因素缺乏内部平衡机理,因此影响应用效果。

本文通过试验探讨远红外干燥双孢蘑菇过程中含水率与辐射强度、辐射距离、物料厚度、物料温度等各种因素之间的关系,基于神经网络建立远红外干燥双孢蘑菇的数学模型,并运用 Matlab<sup>[5]</sup>神经网络工具箱实现对该模型的训练和系统的模拟,在线预测其含水率。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验用双孢蘑菇采购于淄博市农贸菜市场,试验之前将双孢蘑菇切成一定厚度的片状作为样品,并依次编号,然后将双孢蘑菇浸渍于温度为4℃的0.1%柠檬酸溶液中,浸泡30 min取出,晾干以备试验。

### 1.2 试验装置

使用自制的远红外干燥试验台,如图1所示,该试验台由石英加热管、干燥室、电子天平、温度传感器、调压器、控制系统等组成。通过调节控制面板旋钮调节电压,从而达到调节辐射功率的目的;通过调节升降螺旋按钮调节辐射器与物料之间的距离;试验中用远红外测温仪测量辐射源表面的温度;用热电偶测量物料表面温度,每次在物料表面取5个不同的位置点分别测量,然后取5组数据的平均值。

### 1.3 试验方法

(1) 远红外干燥双孢蘑菇的干燥速率一般可用含水率来表征,含水率用于表示一定干燥条件下物料未被干燥除去的水分。其计算公式为

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G} \times 100\%$$

式中  $G_1$ ——干燥中某时刻试样的质量

$G_2$ ——试样绝干质量

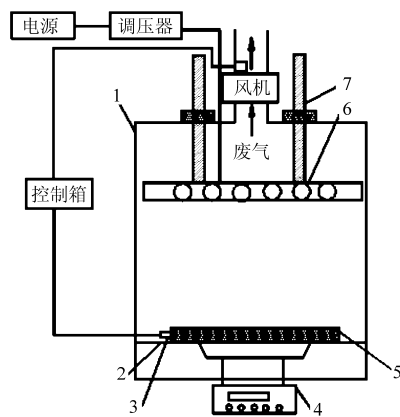


图1 远红外干燥试验台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of far-infrared radiation drying

1. 干燥箱 2. 承料盒 3. 温度传感器 4. 电子天平 5. 物料  
6. 红外辐射器 7. 升降螺杆

$G$ ——试样初始质量

(2) 干燥方法:取双孢蘑菇若干份,放入自制的远红外干燥试验台,分别在不同的辐射强度、辐射距离、物料温度、物料厚度、干燥时间下进行远红外干燥,探讨辐射强度、辐射距离、物料温度、物料厚度、干燥时间对干燥速率的影响。

(3) 各因素及水平的变化范围如表1所示。

表1 试验因素及水平变化范围

Tab. 1 Range of factors and levels for the experiments

水平	因素			
	辐射强度 $I/W \cdot \text{cm}^{-2}$	辐射距离 $d/\text{cm}$	物料温度 $T/^\circ\text{C}$	物料厚度 $h/\text{mm}$
1	2	10	45	2
2	3	14	60	4
3	4	18	75	6

## 2 结果分析

### 2.1 辐射强度

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为双孢蘑菇在辐射强度分别为2、3、4  $\text{W}/\text{cm}^2$ ,物料厚度为4 mm,辐射距离为14 cm条件下,辐射强度与含水率之间干燥动力学曲线图。

如图2所示,随着辐射强度的提高,双孢蘑菇的降水幅度明显增大,辐射强度是影响双孢蘑菇干燥脱水的重要因素。当辐射强度由2  $\text{W}/\text{cm}^2$  提高到3  $\text{W}/\text{cm}^2$ 时,干燥时间可以缩短为原来的3/4;而当辐射强度由3  $\text{W}/\text{cm}^2$  提高到4  $\text{W}/\text{cm}^2$ 时,干燥时间和降水幅度均变化较小,表明此时辐射强度的增加并不能提高干燥速率,因为辐射强度的变化对物料温度的变化有显著影响,当物料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。

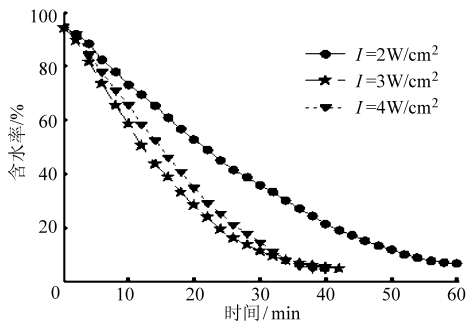


图2 辐射强度与含水率之间的关系曲线

Fig.2 Relationships between radiation intensity and moisture content

## 2.2 物料温度

通过上述分析,辐射器的辐射强度的增大,必将引起温度的升高。本试验通过热电偶测量物料表面温度。每次在双孢蘑菇表面取5个不同的位置点分别测量,然后取五组数据的平均值。图3为双孢蘑菇的表面温度分别为45、60、75℃,物料厚度为4 mm,辐射距离为14 cm条件下,物料温度与含水率之间干燥动力学曲线图。

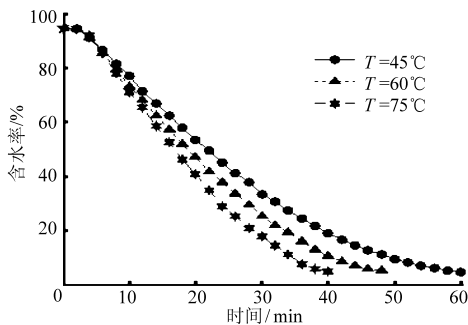


图3 物料温度与含水率之间的关系曲线

Fig.3 Relationships between material temperature and moisture content

从图3可以看出,双孢蘑菇表面温度从45℃升到75℃时,双孢蘑菇的降水幅度增加,且干燥时间减少,表明物料的表面温度对干燥速率有显著影响。

## 2.3 物料厚度

图4为双孢蘑菇切片厚度分别为2、4、6 mm,辐

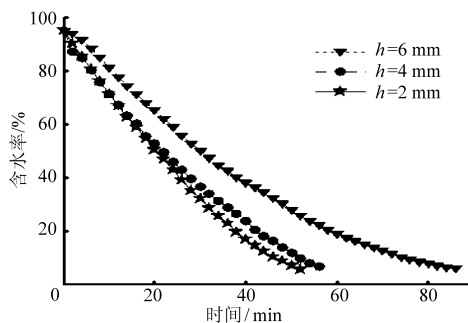


图4 物料厚度与含水率之间的关系

Fig.4 Relationships between material thickness and moisture content

射距离为14 cm,辐射强度为3 W/cm<sup>2</sup>条件下,物料厚度与含水率之间干燥动力学曲线图。

从图中可以看出,当物料厚度为2 mm和4 mm时,降水幅度大;当物料厚度增大到6 mm时,干燥时间延长了30%,降水幅度明显降低,表明物料厚度对远红外干燥速率有显著影响。因为辐射器的辐射深度有限,适宜于薄层物料的干燥<sup>[6]</sup>,但对于厚物料的干燥效果较差。

## 2.4 辐射距离

通过调节辐射器吊杆上的螺栓调节辐射器与物料之间的距离,图5为双孢蘑菇切片与辐射器之间的距离分别为10、14、18 cm,辐射强度为3 W/cm<sup>2</sup>,物料厚度为4 mm条件下,辐射距离与含水率之间干燥动力学曲线图。

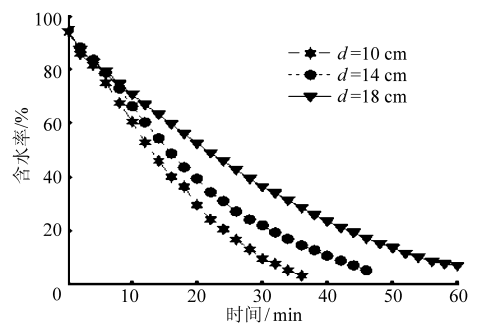


图5 辐射距离与含水率之间的关系曲线

Fig.5 Relationships between the infrared radiation distance and moisture content

从图中可以看出,辐射距离从10 cm增大到18 cm,其干燥时间增加,降水幅度降低,表明辐射距离也是影响双孢蘑菇远红外干燥的重要因素。距离越近,物料所吸收的热流密度越大,物料内部温度升高,此时温度梯度与水分梯度一致,从而加速水分的扩散。但是由于双孢蘑菇属于毛细多孔胶体物料,如果距离太近,双孢蘑菇吸收的辐射能增加,易使毛细管堵塞,产生表面硬化,从而降低干燥品质。因此还应进一步对其进行干燥工艺的研究。

## 3 人工神经网络模型

人工神经网络 (artificial neural networks, 简称ANN) 又称神经网络,人工神经网络是人工智能方法,它不像回归方程那样需预先给定基本函数,而是以试验数据为基础,经过有限次的迭代计算而获得的一个反映试验数据内在联系的数学模型,具有极强的非线性处理、自组织调整、自适应学习及容错抗噪能力,适用于研究复杂的非线性系统<sup>[7-10]</sup>。

### 3.1 网络设计

#### 3.1.1 确定网络结构

本文采用含有单隐层的三层BP网络。考虑辐

射强度、辐射距离、物料温度、物料厚度、干燥时间等 5 个重要因素的影响, 确定 BP 网络的输入层神经元个数  $n$  为 5 (即影响因素), 输出层的神经元个数  $m$  为 1 (即含水率); 其隐含层神经元个数  $n_1$  可根据隐含层设计经验公式<sup>[11]</sup>:  $n_1 = \sqrt{nm}$ ,  $n_1 = \sqrt{n+m} + a$ ,  $n_1 = \ln n$ ,  $n_1 = n + 0.618(n - m)$  及 Kolmogorov 定理  $n_1 = 2n + 1$  近似确定, 但隐含层的神经元个数并不是固定的, 需要经过实际训练的检验来不断调整, 因此, 本文中选取了 3 ~ 12 个隐含层分别进行实际训练, 其均方误差分别为 0.009 590 55、0.009 770 38、0.009 919 05、0.009 737 08、0.009 673 49、0.008 691 13、0.009 666 66、0.009 541 21、0.008 060 5、0.008 374 16, 通过误差对比可知, 当隐含层个数为 11 时的均方误差 (MSE) 最小。根据上述研究的因素和指标的个数, 本网络采用 5-11-1 的神经元分布, 即输入层、隐含层和输出层的神经元数分别为 5、11、1。远红外干燥双孢蘑菇模型的总体结构图如图 6 所示。

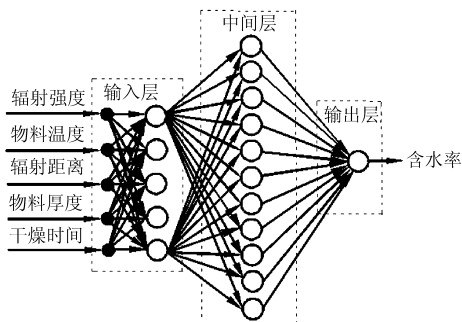


图 6 远红外干燥双孢蘑菇模型的总体结构图

Fig. 6 Overall structure of the model of far-infrared drying for *Agaricus bisporus*

### 3.1.2 确定样本数据及预处理

根据上面确定的网络输入和输出因子, 从双孢蘑菇动力学试验中任意取 32 组试验数据作为训练样本, 取温度为 60℃, 辐射强度为 3 W/cm<sup>2</sup>、辐射距离为 14 cm, 物料厚度为 4 mm 工况下双孢蘑菇动力学试验的数据 (16 组) 作为测试样本。

在网络学习过程中, 为便于训练, 更好地反映各因素之间的相互关系, 使较大的输入落在神经元激励函数梯度大的区域, 训练网络之前, 将输入输出样本进行归一化处理。

创建上文所设计的网络, 隐含层神经元的传递函数采用 S 型正切函数 tansig, 输出层神经元传递函数采用 S 型对数函数 logsig。

### 3.2 网络训练

网络训练过程是一个不断修正权值和阈值的过程, 对于上述所设计的网络, 利用前 32 组数据进行训练, 使网络的输出误差达到最小, 以满足实际应用

的需求。

可见, 经过 5 次训练后, 网络的目标误差达到要求, 如图 7 所示。

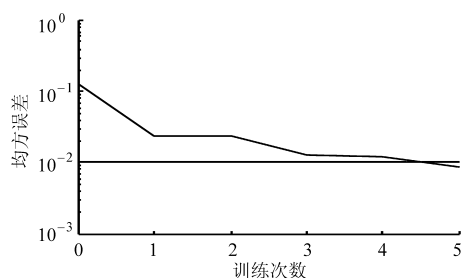


图 7 训练结果

Fig. 7 Training results

### 3.3 网络测试

网络训练结束后, 取样本中的 26 组测试数据进行网络测试。

图 8 为 BP 神经网络模型测试样本网络输出回归直线, 双孢蘑菇含水率预测值与实测值之间的相关系数  $R^2$  为 0.981 3, 均方误差为 0.162 2, 表明 BP 神经网络模型预测双孢蘑菇远红外干燥过程中的含水率与实测值拟合较好, 预测的结果比较可靠。

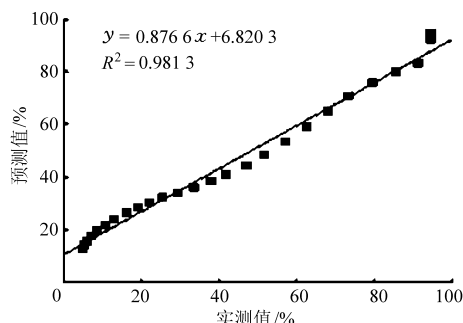


图 8 测试样本网络输出回归直线

Fig. 8 Regression line of the network output for testing samples

图 9 为 BP 神经网络模型预测双孢蘑菇含水率的预测值与实测值比较, 表明神经网络模型预测双孢蘑菇远红外干燥过程中的含水率与实测值前期拟

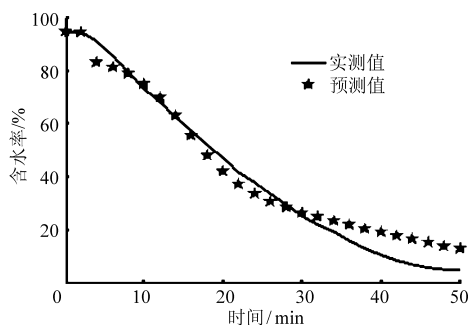


图 9 BP 网络模型含水率预测值与实测值比较曲线

Fig. 9 Comparison of the predicted moisture content values by BP neural network model with the measured moisture content values

合较好,预测的结果比较可靠,而随着干燥到了后期,实测值比预测值略低,这主要因为目标函数存在局部极小点,因此有待提出一些改善 BP 算法的方法。

#### 4 结束语

分析了双孢蘑菇远红外干燥过程中含水量与各因素之间的关系。以试验数据为基础,利用 Matlab 中的神经网络工具箱,经过有限次迭代计算获得一

个反映试验数据内在联系的数学模型,经预测结果的检验和分析证明:在试验范围内, BP 神经网络可以高效、准确、快速地建立模型,且模型的预测值与实测值拟合较好,能够准确而可靠地实现在线预测其含水率。

但由于在 BP 神经网络训练环节容易陷入局部最小的缺陷,所以有待引入其他算法来实现结构和参数的快速、全局寻优,提高寻优性能。

#### 参 考 文 献

- 1 王世东. 双孢菇、草菇、滑子菇栽培与加工新技术[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.
- 2 王相友,曹瑞兵,孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报,2007,38(7): 183~188.  
Wang Xiangyou, Cao Ruibing, Sun Chuazhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7):183~188. (in Chinese)
- 3 王相友,林喜娜. 果蔬红外辐射干燥动力学的影响因素综述[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 114~120.  
Wang Xiangyou, Lin Xi'na. Influence factors of kinetics of infrared radiation drying for fruits and vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10):114~120. (in Chinese)
- 4 王喜波. 红外辐射与对流联合干燥的理论分析及试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2003.  
Wang Xibo. Theoretical analysis and experimental study on combined convective and infrared radiation drying[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 5 张圣勤. MATLAB 7.0 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- 6 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,1998.
- 7 葛哲学,孙志强. 神经网络理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- 8 Sablani S S, Rahman M S. Using neural networks to predict thermal conductivity of food as a function of moisture content, temperature and apparent porosity[J]. Food Research International, 2003, 36(6):617~623.
- 9 Sablani S S, Kacimov A, Pret J, et al. Non-iterative estimation of heat transfer coefficients using artificial neural network models[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(3~4):665~679.
- 10 Rai P, Majumdar G C, Das Gupta S, et al. Prediction of the viscosity of clarified fruit juice using artificial neural network: a combined effect of concentration and temperature[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(4):527~533.
- 11 王冠. 桑枝屑含水率快速检测方法 & 检测设备的研究[D]. 南京:南京林业大学,2007.  
Wang Guan. The research on the rapid detection methods and equipments for the moisture content of mulberry sawdust[D]. Nanjing: Nanjing Forest University, 2007. (in Chinese)

(上接第 29 页)

- 6 侯学贵,陈勇,郭伟斌. 除草机器人田间机器视觉导航[J]. 农业机械学报,2008,39(3):106~108.  
Hou Xuegui, Chen Yong, Guo Weibin. Machine vision-based navigation for a weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):106~108. (in Chinese)
- 7 马雷,武波涛,王连东. 弯曲路径识别中感兴趣区设定方法的研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(1): 134~138.  
Ma Lei, Wu Botao, Wang Liandong. Means of setting the region of interesting in identifying bent lane[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(1): 134~138. (in Chinese)
- 8 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- 9 Ellabib Issmail, Calamai Paul, Basir Otman. Exchange strategies for multiple ant colony system[J]. Information Sciences, 2007, 17(5): 1 248~1 264.
- 10 吴波涛. 智能车辆复杂环境下前方道路与多车识别方法的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2008.  
Wu Botao. Method of detecting anterior lane and vehicles of intelligent vehicle in complex condition[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2008.