

# 基于 BP 神经网络的葡萄气体射流冲击干燥含水率预测

白峻文, 田潇瑜, 马海乐

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 为实现葡萄气体射流冲击干燥过程中含水率的预测, 本文探究了不同烫漂前处理时间 (30、60、90 和 120 s) 和干燥温度 (55、60、65 和 70 °C) 对葡萄干燥时间和干燥速率的影响, 建立了输入层为烫漂时间、干燥温度和干燥时间, 隐藏层节点数为 7, 输出层为葡萄含水率, 结构为“3-7-1”的 BP 神经网络模型。结果表明: 烫漂预处理时间和干燥温度均对葡萄干燥速率有影响, 增加烫漂时间和提高干燥温度能够有效的缩短葡萄干燥时间, 提高干燥效率。采用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法为训练函数, 选择 tansig-purelin 为网络传递函数, 经过有限次训练得到的 BP 神经网络模型, 其预测值与实测值之间的决定系数  $R^2$  为 0.9915, 均方根误差 RMSE 为 0.03376, 预测快速且准确, 为葡萄在干燥过程中的含水率在线预测提供理论依据和技术支持。

**关键词:** 气体射流冲击干燥; 含水率; 烫漂预处理; BP 神经网络; 模型

文章编号: 1673-9078(2016)12-198-203

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.12.031

## BP Neural Network Modeling to Predict Moisture Content of Grapes after Air Impingement Drying

BAI Jun-wen, TIAN Xiao-yu, MA Hai-le

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The effect of different blanching pretreatment times (30, 60, 90 and 120 s) and drying temperatures (55 °C, 60 °C, 65 °C, and 70 °C) on the drying rate and drying time of grapes was investigated, and a BP neural network model was established. This network used an architecture of '3-7-1', which includes input layers of blanching time, drying temperature and drying time, seven hidden layer variables, and a single output layer of moisture content. The results provided a mechanism to predict the moisture content of grapes under air impingement drying. The results demonstrated that blanching pretreatment time and drying temperature showed a significant impact on drying rate and longer blanching time and higher drying temperature resulted in a higher drying rate. The BP neural network model was configured for finite iteration calculation with Levenberg-Marquardt (LM) algorithm as the training function and tansig-purelin as the network transfer function. The correlation coefficient ( $R^2$ ) and root mean squared error (RMSE) between the predicted and measured values were 0.9915 and 0.03376, respectively.

**Key words:** air impingement drying; moisture content; blanching pretreatment; BP neural network; modeling

葡萄是葡萄属 (*Vitis*) 的一种常见落叶木质藤本植物, 其产量排在香蕉、苹果和柑橘之后位列第四位, 是名副其实的世界性水果<sup>[1]</sup>。在我国, 葡萄成熟及收获集中在 7~9 月, 是一种季节性水果。新鲜葡萄收获

收稿日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31201436); 江苏大学高级人才科研启动基金 (15JDG060); 江苏省博士后科研资助计划 (1501068C); 江苏省农产品物理加工重点实验室开放基金 (JAPP2014-4)

作者简介: 白峻文 (1987-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品 (食品) 干燥技术与装备

通讯作者: 田潇瑜 (1987-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品 (食品) 加工过程品质检测和控制

之后, 具有较强的呼吸强度并且容易受到霉菌等微生物侵染, 从而发生腐烂变质<sup>[2]</sup>。因此, 如何在短时间内消费、加工大批量的葡萄是一个重要问题。在葡萄主要种植和生产国, 将其干燥加工为葡萄干是重要的方式之一<sup>[3]</sup>。

葡萄属于浆果类物料, 其表皮由表皮层和厚壁细胞组成。表皮层属于非生物层, 其蜡质可占到 25% 之多<sup>[4]</sup>, 是葡萄天然的保护屏障, 也因此成为了干燥加工的最大障碍。为了加快干燥速率, 葡萄在干燥加工前要进行促干剂浸泡处理。促干剂一般是呈碱性的乳化液, 能够破坏其表皮结构使之形成细小裂纹, 从而能够加快干燥速率<sup>[5]</sup>。然而, 经过浸泡处理的葡萄,

促干剂会在表面残留,大量摄入后会影 响人们的消化系统<sup>[6]</sup>,带来食品安全问题。因此,如何安全有效的提高葡萄干燥效率,是研究的热点内容。

气体射流冲击干燥是一种高效的热风干燥技术,即将高速气体直接冲击物料表面,使物料与气流之间有非常薄的边界层,具有较高的对流换热系数和干燥速率<sup>[7]</sup>。在此基础上发展的高湿气体射流冲击烫漂技术,可实现果蔬快速软化和灭酶,并且已在杏子<sup>[7]</sup>、苹果<sup>[8]</sup>和枸杞<sup>[9]</sup>等物料上取得了有较好的应用效果。因此,联合高湿气体射流冲击烫漂技术和气体射流冲击干燥技术来加工葡萄,以期获得较高的干燥效率和产品品质。

物料含水率是干燥中的重要参数,为干燥过程的预测和调控提供重要依据。干燥过程中物料含水率具有显著的非线性和时变性,并且物料经过不同程度的处理以后,仅利用单一固定模型进行拟合,不可避免的存在适应性和预测精确性的局限<sup>[10]</sup>。近些年,神经网络在处理食品在加工中物理、化学特性与处理参数之间的复杂关系时,具有很强的适应性和良好的模拟效果<sup>[11]</sup>。BP神经网络是一种按误差逆向传播算法训练的多层前馈网络,是目前应用最广泛的神经网络模型之一。

本文通过试验探讨葡萄在干燥过程中含水率与烫漂前处理时间,干燥温度和干燥时间等因素之间的关系,建立基于BP神经网络的葡萄含水率预测模型,为葡萄含水率的在线预测提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验原料

试验所用原料为汤姆普森无核白葡萄,购买自北京当地农贸市场,直径为 $1.2\pm 0.15$  cm,质量 $3.20\pm 0.17$  g,湿基含水率为 $83.78\pm 0.5\%$ (按照GB 5009.3-2010中“直接干燥法”方法测定)。试验前将葡萄置于 $4\pm 1$  °C的冰箱中保存。

### 1.2 主要仪器设备

高湿气体射流冲击烫漂及干燥装备如图1所示。此设备主要由气体射流冲击主体装置(射流冲击回风管道、离心风机、电加热管、进风管道、气流分配室和干燥室等)、蒸汽发生装置以及温湿度控制和采集系统3部分组成。该装置能够实现蒸汽烫漂和干燥一体操作。此设备可以调节烫漂过程中的主要参数:烫漂温度,气体湿度和气体流速。在进行漂烫试验时,通过温度控制器设定漂烫温度,开启蒸汽发生器(额定

发气量 $10$  kg/h),待其压力达到 $0.15\sim 0.25$  MPa,手动调节常闭阀5,待烫漂室内的温度和湿度达到预设值并稳定后,进行漂烫试验。做干燥试验时关闭蒸汽发生器并使常闭阀处于关闭状态,然后通过控制器设定干燥温度和风速,在风速和温度达到设定值并处于稳定状态时开始试验。烫漂和干燥的气流风速由变频器调节离心风机7转速的方式控制,本试验中所有风速均保持在 $15$  m/s。

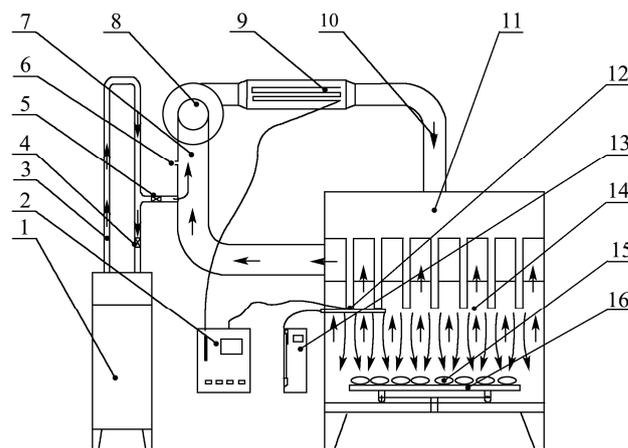


图1 气体射流冲击烫漂-干燥试验装置

Fig.1 Schematic diagram of equipment used for impingement blanching and drying

注:1, 过热蒸汽发生器;2, 温度风速控制器;3, 蒸汽导管;4, 常开阀;5, 常闭阀;6, 排湿孔;7, 射流冲击回风管道;8, 离心风机;9, 电加热管;10, 进风管道;11, 气流分配室;12, 温度传感器;13, 湿度传感器;14, 干燥室;15, 物料;16, 物料托盘。

其他仪器设备:鼓风干燥箱(DHG-9030A,上海精宏实验设备有限公司,中国);风速仪(KA23, Kanomax公司,日本);电子天平(ME2002E,梅特勒-托利多国际有限公司,美国)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 葡萄烫漂处理方法

葡萄从冰箱中取出后,将葡萄剪成单粒,保留约 $1$  mm梗。单粒葡萄除去杂质等后,用清水清洗干净,然后用面纸擦净残留的清水,最后将其平铺于不锈钢网上,待葡萄温度达到室温以后可进行实验。

取葡萄样品 $250.0\pm 0.5$  g,作为每次烫漂、干燥实验的用量,置于物料托盘上。根据前期试验结论<sup>[1]</sup>,选择烫漂温度 $110$  °C,气体相对湿度 $40\%$  RH,将物料托盘放入烫漂室中进行烫漂实验,烫漂时间分别为 $30$ 、 $60$ 、 $90$ 和 $120$  s,烫漂过程中样品会有少量水分蒸发。烫漂完成后样品立刻置于风扇下迅速冷却到室温大约 $25$  °C。

### 1.3.2 葡萄干燥方法

将烫漂后的葡萄单层均匀的排列在物料托盘上,物料托盘带有网孔。葡萄干燥介质温度和相对湿度的初始值分别为: 55 °C, 约 10.1% RH; 60 °C, 约 7.4% RH; 65 °C, 约 5.6% RH; 70 °C, 约 4.3% RH。干燥过程中, 每间隔 1 h, 称量物料的重量, 电子天平的称量精度为±0.01 g。干燥的终了含水率控制在 0.25 g/g (干基) [12]。

### 1.3.3 干燥动力学曲线

在干燥过程中葡萄中水含量用水分比 (MR, moisture ratio) 来表示, 葡萄中不同时间 t 水分比由公式 (1) 表示 [2,7,9]:

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

其中:  $M_0$ 、 $M_e$  和  $M_t$  分别表示葡萄初始、平衡时和任意干燥 t 时刻的干基含水率, g/g。

由于葡萄的平衡含水率  $M_e$  远远的小于  $M_0$  和  $M_t$ , 所以公式 (1) 可简化为公式 (2) [7,12]:

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

干燥速率 (DR, drying rate) 的计算采用如下公式 [7,9]:

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

其中:  $M_{t_1}$  和  $M_{t_2}$  分别表示干燥过程中时间为  $t_1$  和  $t_2$  时葡萄的干基含水率。

### 1.3.4 数据统计分析

采用 MATLAB (版本 7.80, R2009a) 中 NEWFF 神经网络工具箱对数据进行处理。采用决定系数  $R^2$  和均方根误差 RMSE 作为拟合评价指标 [12],  $R^2$  越大、RMSE 值越小, 则拟合越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中,  $MR_{exp,i}$  为干燥试验实测的第 i 个水分比;  $MR_{pre,i}$  为利用模型预测的第 i 个水分比; N 为试验测得数据的个数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同烫漂时间和干燥温度下葡萄干燥曲线

#### 2.1.1 烫漂时间对葡萄干燥影响

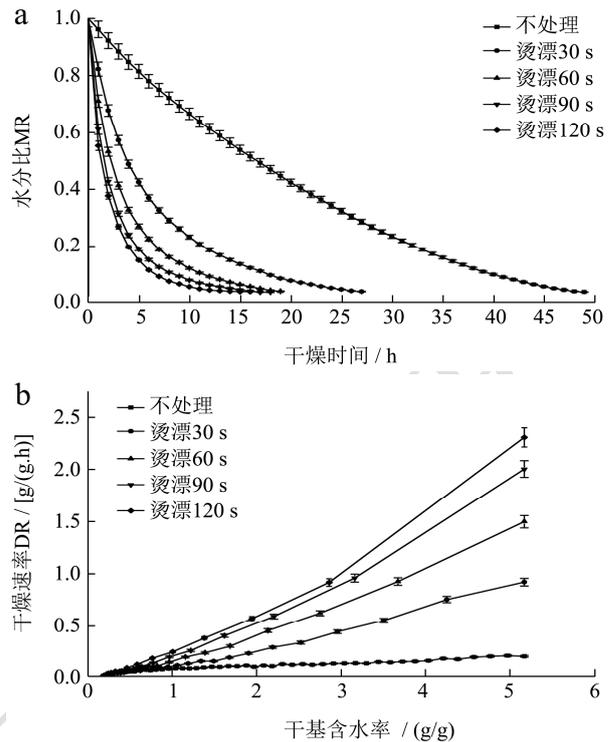


图2 不同烫漂时间下葡萄干燥曲线 (干燥温度 60 °C)

Fig.2 Drying curves of grapes under different blanching times (drying temperature 60 °C)

注: a, 干燥水分比曲线, b, 干燥速率曲线。

经过不同烫漂时间, 葡萄干燥水分比曲线和干燥速率曲线见图 2。由图 2a 可知, 在干燥温度 60 °C 条件下, 葡萄分别经过 30、60、90 和 120 s 时间烫漂, 其干燥时间分别约为 27、19、8 和 17 h, 比不经过烫漂处理葡萄干燥时间 (约 49 h) 分别减少约 44.90%、61.22%、63.26% 和 65.31%。因此, 烫漂处理能够有效缩短葡萄干燥时间, 提高干燥效率。葡萄在烫漂过程中, 葡萄内部部分水分气化会导致葡萄内部膨压大于外界压力而发生膨胀现象, 使其果皮上产生很多细小的裂纹, 这些裂纹可以减少葡萄果皮对水分的阻隔作用, 因而能够大幅提高干燥效率。在后续干燥操作中, 葡萄发生明显的收缩现象, 会使葡萄表皮上的细小裂纹重新闭合, 不会影响干后葡萄产品外观。此外, 烫漂处理能够起到排除物料中的气体, 增加细胞膜的通透性以及软化组织的作用 [13], 这些都有利于水分的迁移和扩散。

由图 2b 可知, 除未处理葡萄外, 经过不同烫漂时间的葡萄干燥速率随干燥的进行逐渐降低, 没有恒速干燥段, 整个干燥过程属于典型降速干燥。大多数的农产物料的干燥都属于降速干燥, 这可能是由于物料在干燥过程中无法持续的提供恒定充足的水分以供蒸发有关 [1]。从图中还可以看出, 葡萄从初始状态到干

基含水率 0.5 g/g, 烫漂预处理的时间越长, 其干燥速率越大; 当葡萄干基含水率降低到 0.5 g/g 以后, 各烫漂处理条件下干燥速率基本一致, 干燥速率均很缓慢。

### 2.1.2 干燥温度对葡萄干燥影响

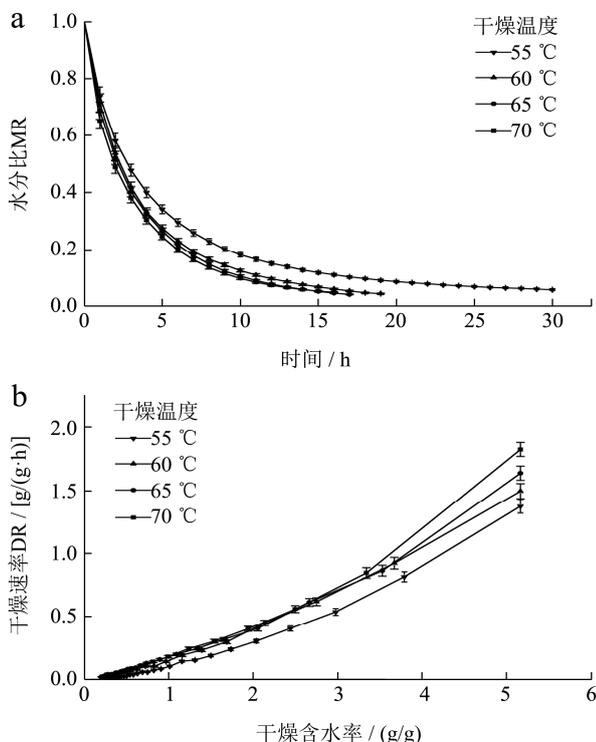


图3 不同干燥温度下葡萄干燥曲线(烫漂时间 90 s)

Fig.3 Drying curves of grapes under different drying temperatures (blanching time 90 s)

注: a, 干燥水分比曲线; b, 干燥速率曲线。

不同干燥温度下, 葡萄干燥曲线和干燥速率曲线如图3所示。由图3a可知, 葡萄经过90s烫漂处理, 在55、60、65和70℃干燥温度下, 其干燥时间分别需要约30、19、17和16h, 干燥温度为70℃条件下所用干燥时间比55℃条件下的缩短约46.67%。因此, 提高干燥温度能够有效的缩短干燥时间, 提高干燥效率。较高的温度可以提高物料与热风之间的对流强度, 从而能够增加物料内部水分的迁移和扩散<sup>[14]</sup>。此外, 气体在高温下能够容纳更多湿份, 提高了干燥介质的脱水能力。

图3b表示不同干燥温度下葡萄干燥速率随干基含水率的变化。图中可知, 葡萄从初始状态到干基含水率3.5g/g, 干燥温度越高, 干燥速率越大; 干基含水率从3.5g/g降低到0.5g/g, 干燥温度为60、65和70℃下干燥速率非常接近, 均大于干燥温度为55℃下的干燥速率; 当葡萄的干基含水率降低到0.5g/g以后, 各温度下干燥速率趋于一致, 均十分缓慢。

## 2.2 BP神经网络拟合

### 2.2.1 数据采集

采集葡萄经不同烫漂时间(未处理, 30、60、90和120s)和不同干燥温度(55、60、65和70℃)条件下, 水分比MR从初始到干燥完成共计507组数据。从507组数据中随机选取450组数据作为网络训练数据, 57组数据作为网络测试数据。由于输入数据的量纲和范围差异, 在进行神经网络拟合之前, 要对数据进行归一化处理, 使其在[-1, 1]范围内。

### 2.2.2 神经网络结构设计

BP神经网络是一种典型的多层向前型网络, 主要由输入层、隐藏层和输出层三部分组成。在葡萄干燥过程中, 烫漂时间、干燥温度和干燥时间是干燥的重要参数, 均对物料含水率有重要影响, 因此选取上述3个参数作为输入向量层, 输入层神经元个数即为3个。输出层是葡萄的含水率, 因此输出神经元个数即为1个。

隐藏层节点数会影响到网络精度和训练过程的长短, 如果节点数太少, 会导致学习困难甚至不能学习; 节点数太多, 又会导致训练时间太长, 并且不一定能够提高精度。隐藏层的节点数一般采用经验公式和多次尝试的方式获得, 根据Kolmogorov定理<sup>[15]</sup>(隐藏层=2×输入层个数+1)和多次尝试, 隐藏层节点数为7时有最优的训练效果。综合以上分析, 采用3-7-1结构的BP神经网络模型对葡萄含水率进行预测, 网络模型结构图见图4所示。

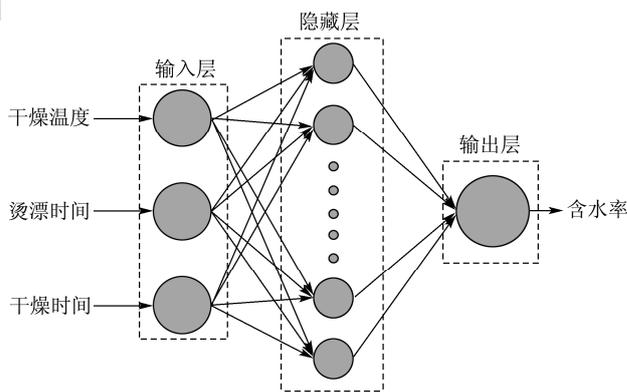


图4 预测葡萄含水率的神经网络模型结构图

Fig.4 Neural network model of grape moisture content prediction

### 2.2.3 传递函数选择

BP神经网络中常用的传递函数一般有3种, 即线性传递函数purelin, 对数S型传递函数logsig以及双曲正切S型传递函数tansig。输入层与隐含层之间的传递函数为正切S型函数, 隐含层与输出层的传递函数为线性传递函数可以进行任意精度的逼近, 因此本研究选择tansig-purelin组合作为该网络的传递函

数。

### 2.2.4 训练函数选择

常用的训练函数主要包括：最速梯度下降函数 `traindm`，动量反转的梯度下降函数 `traindm` 和 Levenberg-Marquardt (LM) 训练函数 `trainlm` 等。LM 算法训练函数可以避免传统 BP 神经网络训练到一定程度时出现的网络麻痹现象，可实现网络的快速收敛速度<sup>[16]</sup>。因此，本研究采用 LM 算法的 `trainlm` 作为网络训练函数。

### 2.2.5 网络训练与测试

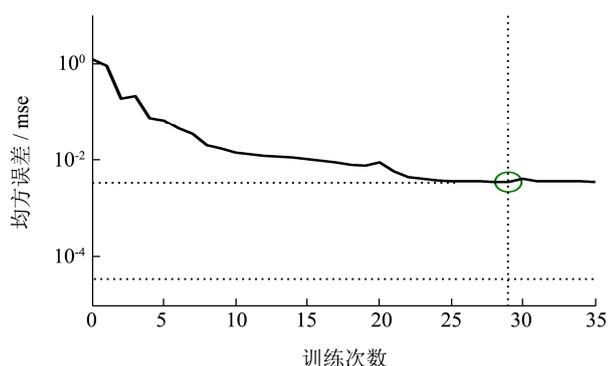


图5 均方误差曲线图

Fig.5 Mean squared error curve

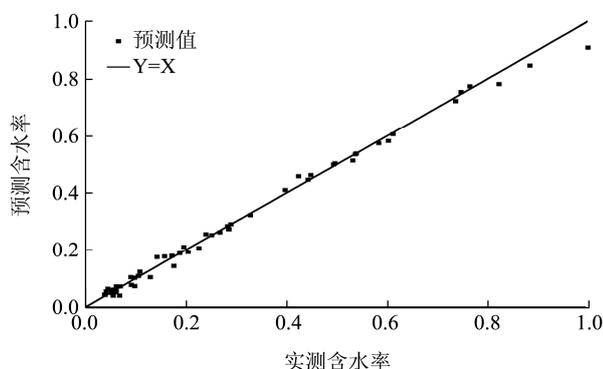


图6 葡萄含水率回归分析图

Fig.6 Regression analysis of grape moisture

按照上述神经网络结构和参数，将随机选择的 450 组数据作为训练样本，经过 29 次训练停止，均方误差值达到 0.003425，训练收敛曲线如图 5 所示。将余下的 57 组数据对所得模型进行测试，葡萄实测含水率与预测含水率回归结果见图 6。经过对比，预测含水率与实测含水率最大偏差为 0.0922，决定系数  $R^2$  为 0.9974，均方根误差  $RMSE$  为 0.0072。

### 2.2.6 模型验证

为了进一步验证模型的准确性，选取烫漂前处理时间为 70 s，干燥温度为 63 °C，获得测量葡萄从初始到干燥完成的干燥曲线，并与 BP 神经网络预测值进行对比，见图 7。从图中可以看出，除干燥前期（前 3 h 之内）预测值与实测值有稍大偏差外，其余预测值

几乎与实测值重合。经计算，预测值与实测值之间的决定系数  $R^2$  为 0.9915，均方根误差  $RMSE$  为 0.03376，可见 BP 神经网络具有很高的预测精度，能够很好的预测葡萄在干燥过程中的含水率。

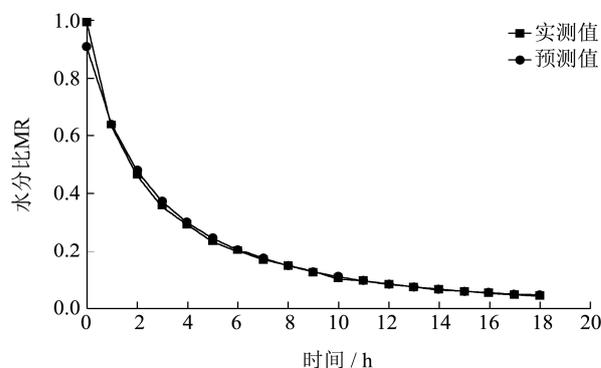


图7 葡萄含水率预测值与实测值比较

Fig.7 Contrast between the predicted values and the experimental values of the grapes

## 3 结论

3.1 探究了葡萄经不同烫漂时间和干燥温度下的干燥特性，表明烫漂时间和干燥温度均对葡萄干燥速率有影响，增加干燥时间与提高干燥温度能够有效缩短干燥时间，提高干燥效率。

3.2 建立了“3-7-1”结构的 BP 神经网络模型，选择 `tansig-purelin` 组合为网络的传递函数，采用 LM 算法为训练函数，BP 神经网络预测值与实测值拟合较好，表明 BP 神经网络能够很好的预测葡萄在气体射流冲击干燥中的含水率。BP 神经网络能够将干燥过程中所有的影响因素包含于一个网络模型中，在便捷性和准确性等方面具有优势，其过程中预测结果可应用于工业生产。

## 参考文献

- [1] 白竣文.无核白葡萄干燥动力学及防褐变机理研究[D].北京:中国农业大学,2014  
BAI Jun-wen. Drying kinetics and anti-browning mechanism of Thompson seedless grapes [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014
- [2] Xiao H W, Pang C L, Wang L, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 233-240
- [3] Pangavhane D R, Sawhney R L. Review of research and development work on solar dryers for grape drying [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(1): 45-61
- [4] Esmaili M, Rezazadeh G, Sotuddeh-Gharebagh R, et al.

- Modeling of the seedless grape drying process using the generalized differential quadrature method [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2007, 30(2): 168-175
- [5] Bingol G, Roberts J S, Balaban M O, et al. Effect of dipping temperature and dipping time on drying rate and color change of grapes [J]. *Drying Technology*, 2012, 30(6): 597-606
- [6] Pahlavanzadeh H, Basiri A, Zarrabi M. Determination of parameters and pretreatment solution for grape drying [J]. *Drying Technology*, 2001, 19(1): 217-226
- [7] 肖红伟,张世湘,白峻文,等.杏子的气体射流冲击干燥特性[J].*农业工程学报*,2010,26(7):318-323  
XIAO Hong-wei, ZHANG Shi-xiang, BAI Jun-wen, et al. Air impingement drying characteristics of apricot [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7):318-323
- [8] Bai J W, Gao Z J, Xiao H W, et al. Polyphenol oxidase inactivation and vitamin C degradation kinetics of Fuji apple quarters by high humidity air impingement blanching [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, 48(6)
- [9] 马琴,谢龙,高振江,等.气体射流冲击烫漂预处理对枸杞干燥的影响[J].*食品科技*,2013,38(10):83-88  
MA Qin, XIE Long, Gao Zhen-jiang, et al. Effects of air-impingement jet blanching pretreatment on drying lyceum [J]. *Food Science and Technology*, 2013, 38(10): 83-88
- [10] 张丽丽,王相友,张海鹏.山药切片红外干燥温度神经网络预测[J].*农业机械学报*,2014,45(11):246-249  
ZHANG Li-li, WANG Xiang-you, ZHANG Hai-peng. Temperature prediction of yam under infrared drying based on neural networks [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 45(11): 246-249
- [11] Poonnoy P, Tansakul A, Chinnan M. Artificial neural network modeling for temperature and moisture content prediction in tomato slices undergoing microwave-vacuum drying [J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(1): E42-E47
- [12] 白峻文,王吉亮,肖红伟,等.基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J].*农业工程学报*,2013,29(16): 278-285  
BAI Jun-wen, WANG Ji-liang, XIAO Hong-wei, et al. Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(16): 278-285
- [13] Mukherjee S, Chattopadhyay P K. Whirling bed blanching of potato cubes and its effects on product quality [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007,78(1): 52-60
- [14] Falade K O, Solademi O J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2010,45(2): 278-288
- [15] 林喜娜,王相友,丁莹.双孢蘑菇远红外干燥神经网络预测模型建立[J].*农业机械学报*, 2010,41(5):110-114  
LIN Xi-na, WANG Xiang-you, DING Ying. Experiment on neural network prediction modeling of far infrared radiation drying for agaricus bisporus [J]. *Transactions of the CSAM*, 2010, 41(5): 110-114
- [16] 刘振宇,郭玉明.应用 BP 神经网络预测高压脉冲电场对果蔬干燥速率的影响[J].*农业工程学报*,2009,25(2):235-239  
LIU Zhen-yu, GUO Yu-ming. BP neural network prediction on the effect of drying rate of fruits and vegetables pretreated by high-pulsed electric field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2): 235-239