

何方健, 李静, 刘明宝, 等. 山楂微波干燥特性及含水率预测 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 32–38. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090098

HE Fangjian, LI Jing, LIU Mingbao, et al. Microwave Drying Characteristics and Moisture Content Prediction of Hawthorn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 32–38. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090098

· 研究与探讨 ·

山楂微波干燥特性及含水率预测

何方健¹, 李 静^{1,2}, 刘明宝¹, 付文杰¹, 李臻峰^{1,2,*}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘 要: 为探索山楂微波干燥特性, 并实现干燥过程中含水率预测, 研究了干燥温度 (50、60、70 ℃)、相对湿度 (5%、15%、30%、50%、70%) 对山楂干燥特性及品质影响; 建立了极限学习机 (ELM) 神经网络, 实现对山楂含水率预测。结果表明: 干燥温度 60 ℃、相对湿度为 30% 为最佳干燥条件, 山楂色泽变化最小, V_C 含量最高, 总黄酮含量较高。建立了结构为“3-8-1”的 ELM 含水率模型, 其预测值与实验值之间的决定系数 R^2 为 0.996, 均方根误差 RMSE 为 0.00952, 能够有效地预测山楂微波干燥过程中的含水率。研究结果为山楂微波干燥应用及含水率在线预测提供理论依据。

关键词: 山楂, 微波干燥, 相对湿度, 极限学习机, 含水率预测

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)12-0032-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090098

Microwave Drying Characteristics and Moisture Content Prediction of Hawthorn

HE Fangjian¹, LI Jing^{1,2}, LIU Mingbao¹, FU Wenjie¹, LI Zhenfeng^{1,2,*}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: This study aimed to explore microwave drying characteristics and realize moisture content prediction of hawthorn during drying process. The effects of drying temperature (50, 60, 70 ℃) and relative humidity (5%, 15%, 30%, 50%, 70%) on the drying characteristics and quality of hawthorn were studied. Extreme Learning Machine (ELM) was established to predict hawthorn moisture content. The results showed that the optimum drying conditions were 60 ℃ and 30% relative humidity. The color changed the least, the content of V_C was the highest, and the content of total flavonoids was higher for hawthorn. The model of ELM with the structure of “3-8-1” was established to predict moisture content. The determination coefficient R^2 value was 0.996 and root mean square error RMSE was 0.00952 between predicted value and experimental, which could effectively predict the moisture content of hawthorn during microwave drying. The results would provide a theoretical basis for microwave drying application and on-line moisture content prediction of hawthorn.

Key words: hawthorn; microwave drying; relative humidity; extreme learning machine; moisture content prediction

山楂又称山里红, 蔷薇科山楂属植物, 是药食同源中药材^[1]。功效成分以黄酮类、有机酸、维生素为主, 有改善心肌、调节血压、降低血液胆固醇等功效^[2], 在保健、医疗等领域得到广泛应用。新鲜山楂水分含量高, 易腐烂变质, 不易贮藏, 因此, 干燥处理可有效延长储存期, 减少经济损失。微波干燥是一种

节能、绿色干燥技术, 传热效率高、易实现自动化控制等优点^[3-4], 在农产品加工中得到广泛应用。

大多学者研究了物料厚度、微波功率、干燥温度和装载量等干燥参数对微波干燥特性和干燥品质的影响^[5-7], 没有考虑环境湿度(以下简称相对湿度)对干燥过程影响。惠菊^[8]、李静^[9-10]等在微波干燥过程

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (21606109)。

作者简介: 何方健 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工过程控制, E-mail: hfj061937@sina.com。

* 通信作者: 李臻峰 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工装备与控制, E-mail: 1736691239@qq.com。

中采用连续排湿减小环境湿度,与没有排湿装置相比,显著提高干燥速率,但干制品出现焦糊、营养损失严重。

在干燥过程中,物料的含水率是干燥过程中控制的重要指标,建立含水率预测模型能更好地预测干燥结果。由于干燥过程中含水率变化具有非线性和时变性特点,利用单一固定模型拟合,不可避免存在适应性差和精确性低。近年来,神经网络在干燥中用于预测研究,具有很强的适应性^[11]。Tavakolipour等^[12]基于BP神经网络建立了开心果干燥过程水分动力学的在线预测模型。张丽丽等^[13]利用BP神经网络对山药在红外干燥中温度变化进行预测。以上神经网络模型大多数采用梯度下降法,存在训练速度慢、容易陷入局部极小点和学习率的选择敏感等问题。

鉴于此,本文通过控制不同干燥温度和相对湿度研究其对干燥速率和干燥品质的影响;利用极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)建立山楂微波干燥过程中的含水率预测模型,该方法学习速度快、泛化性能好,希望为山楂微波干燥中含水率在线预测和工艺优化提供依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

山楂 当地水果批发市场,物料大小基本一致且无机械损伤;采用 105 ℃ 烘干法^[14]测量并计算新鲜山楂的湿基含水率为 77.5%±0.37%。九水硝酸铝(纯度≥99.0%)、无水乙醇(纯度≥99.7%)、亚硝酸钠(纯度≥99.0%)、五水硫酸铜(纯度≥99.0%)、芦丁(纯度≥95.0%)、盐酸 国药集团;氢氧化钠 上海泰坦科技股份有限公司。

EM7KCGW3-NR 型微波炉 广东美的厨房电器制造有限公司;ES5000 型电子天平 天津德安特有限公司;Q-FTS-D160 型光纤测温传感器 西安和

其光电有限公司;HH-6 型恒温水浴锅 上海梅香仪器有限公司;UV1800 型紫外分光光度计 日本岛津公司;TG20G 型高速离心机 常州金坛良友仪器有限公司;NR110 型色差计 深圳市三恩驰科技有限公司。

1.2 实验系统

基于温湿度控制的微波干燥实验系统由微波干燥单元、温湿度检测单元和控制系统组成,结构如图 1。微波干燥单元由微波炉改制而成,磁控管的频率为 2450 MHz,微波总功率为 1.15 kW,最大输出功率为 700 W。温湿度检测单元采用光纤温度传感器和湿度传感器获取干燥温度和湿度。控制系统包括功率控制、相对湿度控制。光纤温度传感器和湿度传感器与数据采集卡连接,并将采集的温湿度模拟信号转化为数字信号传递到 PC 中 LabView 程序。通过 LabView 程序控制数据采集卡输出 0~5 V 电压调节晶闸管的输出电压,从而控制微波炉输出功率和电磁阀的开度,实现干燥温度、湿度的反馈控制。

改造后的微波炉控制电压与输出功率参数关系如表 1 所示,可实现干燥温度的控制精度为±0.5 ℃,湿度控制精度为±5%。

1.3 实验方法

将新鲜山楂去核后切成等厚度的(5±0.2) mm 片状,平放在密闭的物料罐内网状盘上干燥。试验方案如表 2 所示。每组称取(30±1) g 进行干燥,当最终湿基含水率为 10% 时停止干燥,实验重复 3 次取平均值计算。

1.4 指标测定及方法

1.4.1 干基含水率及干燥速率 不同时间山楂干基含水率按公式(1)计算^[15]:

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \quad \text{式 (1)}$$

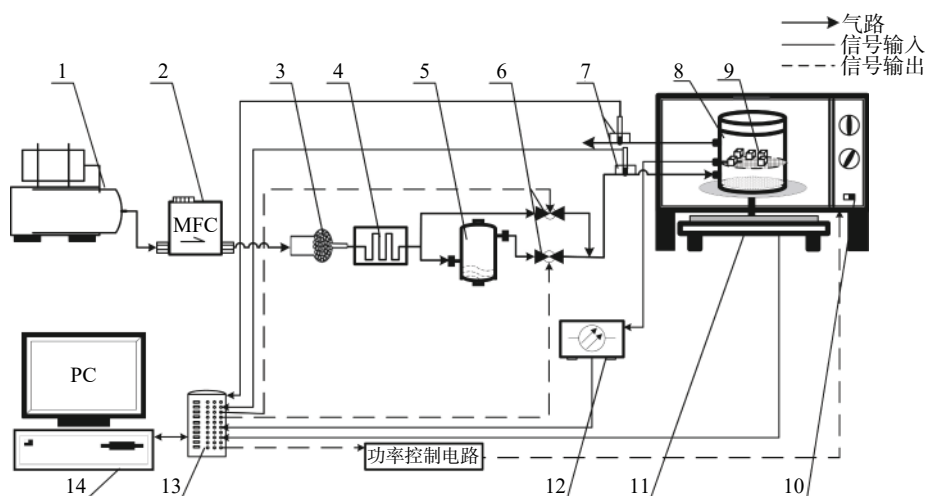


图 1 基于温湿度控制的微波干燥系统

Fig.1 Microwave drying system based on temperature and humidity control

注: 1. 空气压缩机; 2. 气体流量控制器; 3. 干燥管; 4. 恒温水浴锅; 5. 蒸汽发生器; 6. 电磁阀; 7. 湿度传感器; 8. 物料罐; 9. 物料; 10. 微波炉; 11. 电子天平; 12. 光纤温度传感器; 13. 数据采集卡; 14. PC。

表 1 微波炉控制参数

Table 1 Microwave oven control parameters

控制电压U(V)	微波炉输出功率P(W)
0	0
2.6	0
2.8	22.21
3.0	157.38
3.2	235.32
3.4	317.64
3.6	369.73
3.8	422.42
4.0	445.24
4.2	461.67
4.4	463.56
4.6	464.27
4.8	464.73

表 2 试验设计与试验参数

Table 2 Experimental design and experimental parameters

序号	干燥温度(℃)	相对湿度(%)	实验编号
1	50	5	T50-H5
2		15	T50-H15
3		30	T50-H30
4		50	T50-H50
5		70	T50-H70
6	60	5	T60-H5
7		15	T60-H15
8		30	T60-H30
9		50	T60-H50
10		70	T60-H70
11	70	5	T70-H5
12		15	T70-H15
13		30	T70-H30
14		50	T70-H50
15		70	T70-H70
16	67	42	T67-H42

注: 1~15为对比实验方案; 16为验证方案。

式中: M_t 为山楂干基含水率, g/g; W_t 为任意时刻的总重, g; G 为干重, g。

山楂片中水含量用水分比(MR, moisture ratio)表示, 水分比采用公式(2)计算^[16]:

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

式中: M_0 、 M_t 分别为山楂初始和 t 时刻的干基含水率, g/g。

干燥速率(DR, Drying rate)按公式(3)计算^[17-18]:

$$DR = \frac{MR_{t_2} - MR_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad \text{式 (3)}$$

式中: DR 为干燥速率, %·min⁻¹; MR_{t_2} 和 MR_{t_1} 分别为干燥过程中 t_2 和 t_1 时刻所对应的水分比, %。

1.4.2 有效水分扩散系数 有效水分扩散系数通常用简化的菲克第二定律得到, 其计算公式为^[19]

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t\right) \quad \text{式 (4)}$$

式中: D_{eff} 表示有效水分扩散系数, m²/s; L 为山楂厚度, m; t 为干燥时间, s。

1.4.3 色差值 ΔE 测定 采用色差仪测定新鲜和干制品山楂颜色数据, 记录 L^* 、 a^* 、 b^* , 并计算总色差 ΔE , 重复 3 次。 ΔE 计算如下^[8]:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad \text{式 (5)}$$

式中: L_0 、 a_0 、 b_0 为鲜样测定值, L^* 、 a^* 、 b^* 为干燥后测定值。

1.4.4 V_C 含量测定 根据 GB 5009.86-2016 执行^[20]。

1.4.5 总黄酮测定 采用芦丁比色法^[21]。精密称取干燥的山楂粉末 1 g, 置于 50 mL 的容量瓶中, 加入 70% 乙醇 30 mL, 超声处理 30 min。定容, 摇匀, 过滤, 取滤液 2 mL 置于 25 mL 容量瓶中, 加入 4 mL 蒸馏水和 5% 亚硝酸钠溶液 1 mL 并摇匀, 静置 5 min 后加入 10% 硝酸铝溶液 1 mL 并摇匀, 5 min 后加 10 mL 浓度为 1 mol/L 的氢氧化钠溶液, 用蒸馏水定容, 15 min 后以试剂空白为参比于 510 nm 波长处测定吸光度。山楂总黄酮含量以芦丁当量计 (g/g), 芦丁标准曲线 $y=0.4258x+0.0082$; $R^2=0.9984$ 。

1.5 数据采集与预处理

根据表 2 中方案 1~15, 得出水分比从干燥初始到结束共计 482 组数据, 随机选取 420 组数据作为网络训练数据, 剩余 62 组数据作为测试数据。由于输入和输出数据的量纲和取值范围存在差异, 进行拟合之前, 数据需进行归一化处理, 使其在 [0,1] 范围内。归一化公式如下^[22]:

$$x' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad \text{式 (6)}$$

$$y' = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad \text{式 (7)}$$

式中: x' 、 y' 分别为的输入、输出数据归一值; x_i 、 y_i 分别为输入、输出数据实际值; x_{\min} 、 x_{\max} 、 y_{\min} 、 y_{\max} 为输入和输出数据的最小值与最大值。

1.6 数据处理

采用 Origin 2017 进行数据处理, 利用 MATLAB 2016a 进行数学模型计算。选用决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 作为拟合评价指标, R^2 值越大、RMSE 值越小, 拟合效果越好^[23]。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre}} - MR_{\text{exp},i})^2} \quad \text{式 (8)}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 (9)}$$

式中: $MR_{\text{exp},i}$ 为干燥试验实测的第 i 个水分比; $MR_{\text{pre},i}$ 为利用神经网络预测的第 i 个水分比; N 为试验测得数据的个数。

2 结果与分析

2.1 山楂微波干燥特性研究

2.1.1 干燥温度对干燥特性影响 不同干燥温度和

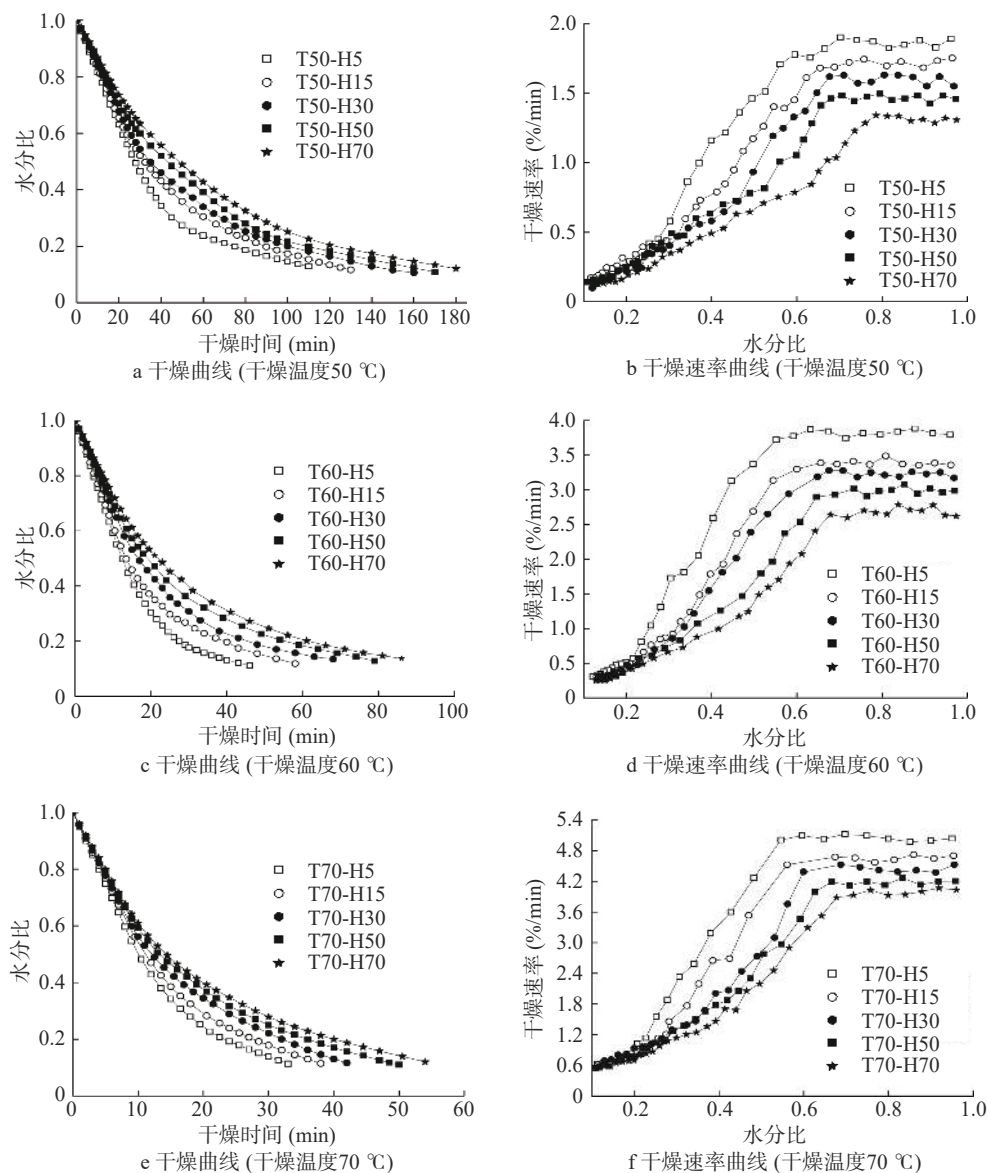


图 2 不同干燥条件下山楂干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.2 Drying curves and drying rate curves of hawthorn at different drying conditions

相对湿度下山楂干燥曲线和干燥速率曲线如图 2 所示。由图 2a、图 2c、图 2e 可知,在相对湿度 30% 且干燥温度为 50、60、70 °C 条件下,物料达到最终含水率所用干燥时间分别为 160、68 和 42 min,干燥温度 70 °C 条件下所用的干燥时间比 50 °C 缩短了 73.75%。各干燥温度下所用干燥时间有显著性差异,提高干燥温度能显著缩短干燥时间,提高干燥效率。由图 2b、图 2d、图 2f 可知,山楂的干燥速率随着干燥进行呈先恒速后降速,干燥速率从高到低依次为: 70 °C > 60 °C > 50 °C。主要原因是干燥温度越高,物料内部水分获得能量越多,水分的流动性越强^[11],干燥速率越快,干燥温度 70 °C 时,虽然干燥时间最短,但山楂会产生较严重的褐变和不良的风味。因此,综合干燥效率和营养成分,选取 60 °C 为较优干燥温度。

2.1.2 相对湿度对干燥特性影响 选取干燥温度 60 °C,相对湿度为 5%、15%、30%、50%、70% 条件下,由

图 2c 可知,物料达到最终含水率的干燥时间分别为 46、58、68、79 和 86 min,相对湿度 5% 条件下所用干燥时间比 70% 缩短 46.51%。相对湿度越低时,物料和环境之间的湿度差越大,干燥速率越高^[15]。由图 2d 可知,干燥速率随着相对湿度减小而增大,在恒速阶段,以脱去自由水为主,相对湿度 5%、15%、30%、50%、70% 条件下平均干燥速率分别为 3.825、3.389、3.232、2.985、2.682 %/min,相对湿度 5% 条件下的干燥速率是 70% 时的 1.43 倍,表明较高的相对湿度不利干燥进行。随着自由水的减少,相对湿度 50% 和 70% 的干燥速率明显较其它小。虽然相对湿度较低时,所需干燥时间越短,干燥速率越快,但是会使物料失水过快,导致表面结壳变硬,阻止内部水分迁移^[24],且对干制品质不利。综合分析,选取 30% 为较优相对湿度。

2.2 山楂干燥的有效水分扩散系数 (D_{eff})

不同干燥温度和相对湿度下山楂的有效扩散系

数如图 3 所示。相对湿度一定时, D_{eff} 值随着干燥温度增加逐渐增大。相对湿度 30% 时, 干燥温度 50、60、70 °C 条件下 D_{eff} 值分别为 5.728×10^{-10} 、 1.348×10^{-9} 、 $2.12 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 升高温度能够明显增加物料内部的水分扩散能力, 提高有效水分扩散系数。

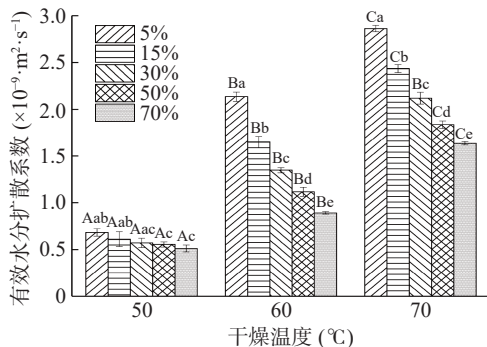


图 3 不同干燥条件下山楂的 D_{eff} 值

Fig.3 D_{eff} values of hawthorn at different drying conditions

注: 不同大写字母表示不同干燥温度条件下山楂的有效水分扩散系数具有显著性差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示不同相对湿度条件下山楂的有效水分扩散系数具有显著性差异 ($P < 0.05$); 图 4~图 6 同。

由图 3 还知, 相同干燥温度时, D_{eff} 随着相对湿度增大而减小。干燥温度 60 °C 时, 不同相对湿度条件下 D_{eff} 范围为 $8.954 \times 10^{-10} \sim 2.135 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 降低

相对湿度可显著提高有效水分扩散系数。当干燥温度为 50 °C 时, 相对湿度对 D_{eff} 影响程度较 60、70 °C 低, 可能是干燥温度 50 °C 时, 物料内部产生较少的开放结构和孔道^[25], 外部相对湿度的影响较不显著。因此, 60 °C 以上干燥对相对湿度的控制可有效影响水分扩散系数, 从而影响干燥速率。

2.3 微波干燥对山楂品质的影响

2.3.1 对色差 ΔE 的影响 由图 4a 可知, 在相对湿度为 30% 条件下, 随着干燥温度升高, 色差呈增加趋势, 干燥温度 60 °C 时, 色差最小, 为 8.04。由图 4b 可知, 在干燥温度为 60 °C 条件下, 随着相对湿度增加, 色差先减少后增加, 相对湿度为 30% 和 50% 时色差最小, 说明一定温度下, 适当增加相对湿度可以有效减少山楂色泽变化。

2.3.2 对 V_C 含量的影响 由图 5a 可知, 不同温度干燥后的山楂 V_C 含量均比鲜样低。在 50~70 °C 范围内, 随着干燥温度升高, V_C 含量先增加后减少, 温度为 60 °C 时含量最高为 46.45 mg/100 g。由图 5b 可知, V_C 含量随着相对湿度的增加先增加后减少, 相对湿度为 30% 含量最高。可能是由于相对湿度较低时物料失水速率较快, V_C 流失严重, 相对湿度较高时干燥时间长, V_C 被氧化分解。

2.3.3 对总黄酮含量的影响 由图 6a 可知, 不同温度干燥后的黄酮含量均较鲜样高, 且随着干燥温度升

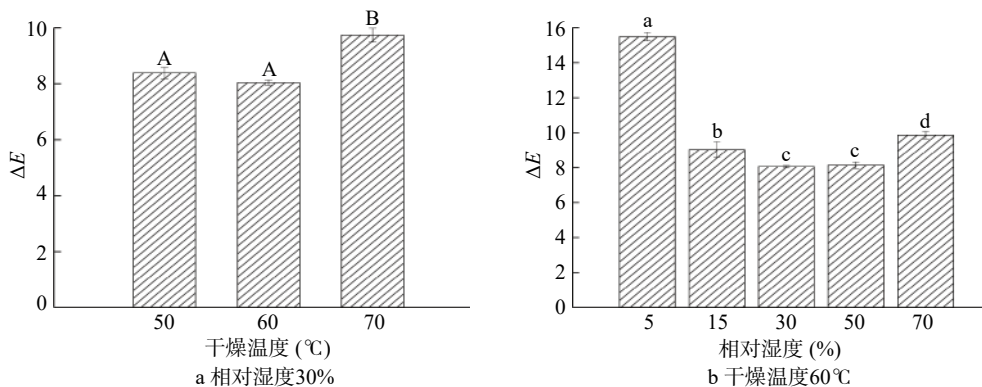


图 4 不同干燥条件下的山楂色差

Fig.4 Color difference of hawthorn at different drying conditions

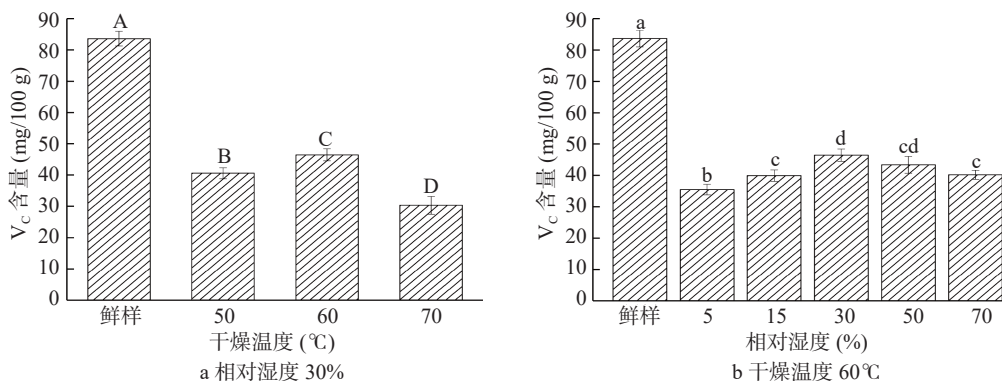


图 5 不同干燥条件下的山楂 V_C 含量

Fig.5 Vitamin C of hawthorn under different drying conditions

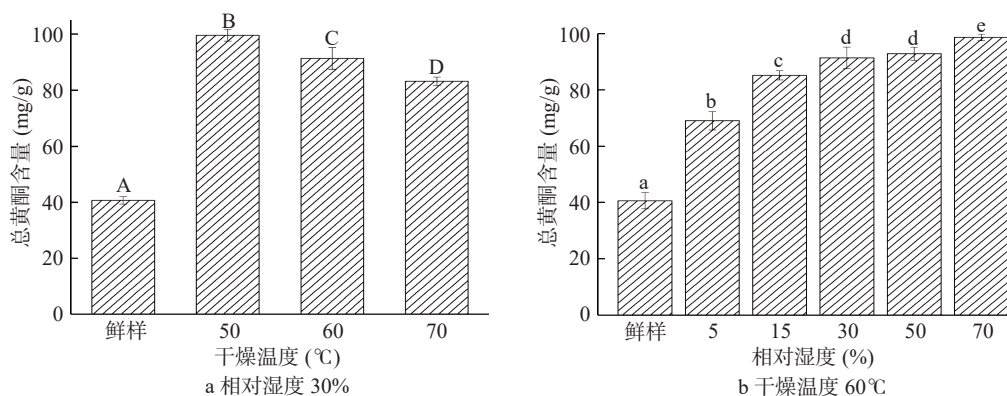


图 6 不同干燥条件下的山楂总黄酮含量

Fig.6 Total flavonoids content of hawthorn at different drying conditions

高,总黄酮含量减少;当温度为 50 °C 时,山楂总黄酮含量最高为 99.64 mg/g,表明山楂在 50 °C 干燥时有利于总黄酮生成。由图 6b 可知,随着相对湿度的增加(5%~70%),总黄酮含量呈增加趋势,说明相对湿度较高条件下能够促进总黄酮含量的增加,相对湿度为 30%、50% 条件下总黄酮含量相差不显著。

2.4 ELM 神经网络模型

2.4.1 ELM 神经网络模型建立 ELM 是一种基于前馈神经网络构建的机器学习系统或方法,与其他单隐层前向神经网络相比,其特点是随机产生输入层与隐含层间的连接权值及隐含层神经元的阈值,且在训练过程中无需调整,只需要设置隐含层神经元的个数,便可以获得唯一的最优解^[26]。

将干燥温度(x_1)、相对湿度(x_2)和干燥时间(x_3)作为输入层神经元,物料水分比(y)作为输出层神经元, β_{ij} 为输入层第 i 个神经元与隐含层第 j 个神经元间的连接权值, ω_{jk} 为隐含层第 j 个神经元与输出层第 k 个神经元间的连接权, b_j 为隐含层神经元的阈值, $g(x)$ 为隐含层神经元激活函数。建立结构如图 7 所示的 ELM 神经网络模型。当隐含层神经元个数为 8 时,山楂含水率的预测值与实验值最接近,其决定系数 R^2 为 0.996,均方根误差 RMSE 为 0.00952,模型预测精度较高,回归结果见图 8。

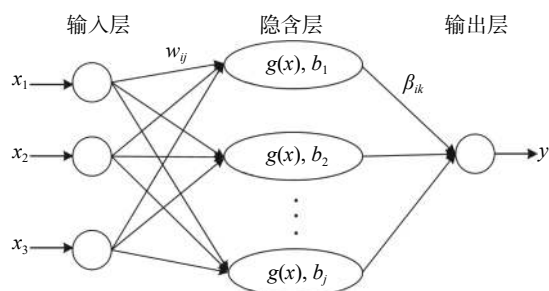


图 7 ELM 神经网络模型结构

Fig.7 ELM neural network model structure

2.4.2 神经网络模型验证 为了进一步验证模型的准确性,选择表 2 中方案 16 进行实验,得到山楂从开始到干燥完成的含水率变化曲线,并与 ELM 预测

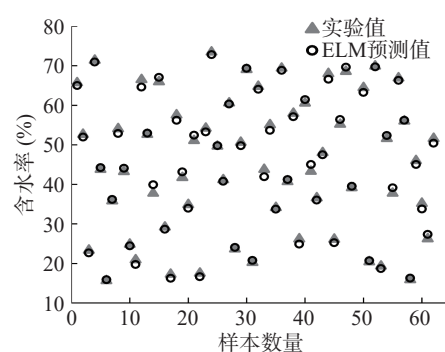


图 8 预测值与实验值对比

Fig.8 Comparison of predicted and experimental results of three neural networks

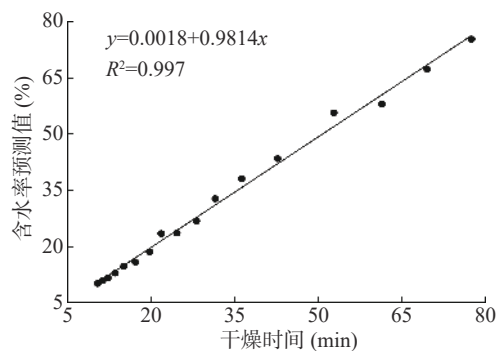
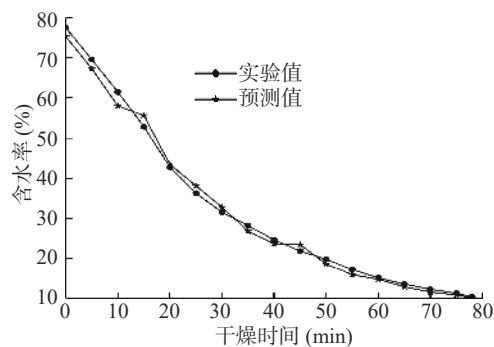


图 9 水分比预测值与实验值比较与回归

Fig.9 Contrast and regression between predicted and experimental values of moisture ratio

值进行对比,结果见图 9。经计算,预测值与实验值之间决定系数 R^2 为 0.997,均方根误差 RMSE 为 0.01642,可见 ELM 能够很好的预测山楂微波干燥

过程中的含水率。

3 结论

试验表明,微波干燥过程中干燥温度和环境相对湿度对山楂干燥速率、色差、 V_C 含量和总黄酮含量均有影响,干燥温度和相对湿度过高或过低均不利于营养成分和颜色保留。干燥温度为60℃,相对湿度为30%时,山楂色差变化最小, V_C 含量最高,总黄酮含量较高。干燥温度60℃时,相对湿度为30%和50%对总黄酮含量影响程度不明显。经过有限次训练得到结构为“3-8-1”的ELM神经网络模型预测效果最好,含水率的预测值与实际值非常接近,结果表明ELM神经网络模型能够很好的预测山楂微波干燥过程中的含水率。该神经模型能将干燥过程中所有影响因素包含在一个网络模型中,在快捷性和准确性等方面具有优势。

参考文献

- [1] 郭婷,白向丽,陈益能,等.干燥方式对大果山楂粉干燥速率及品质的影响[J].食品与机械,2019,35(10):122-125,188.
- [2] Jurikova Tunde, Sochor Jiri, Rop Otakar, et al. Polyphenolic profile and biological activity of Chinese hawthorn (*Crataegus pinnatifida* BUNGE) fruits[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2012, 17(12): 14490-14509.
- [3] 吕豪,吕黄珍,杨炳南,等.苦瓜微波-热风振动床干燥湿热特性与表观形态研究[J].农业机械学报,2020,51(4):373-381.
- [4] Pande R, Mishra H N, Singh M N. Microwave drying for safe storage and improved nutritional quality of green gram seed (*Vigna radiata*)[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2012, 60(14): 3809-3816.
- [5] 唐小闲,段振华,任爱清,等.即食慈姑片微波干燥特性及动力学模型研究[J/OL].食品与机械:1-11[2020-09-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1183.TS.20200629.1527.006.html>.
- [6] Jing Li, Zhenfeng Li, Lili Li, et al. Microwave drying of balsam pear with online aroma detection and control[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020: 288.
- [7] Ma X, Luo G, Li Z, et al. Microwave power control scheme for potatoes based on dielectric loss factor feedback[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 288: 110134.
- [8] 惠菊,李臻峰,李静,等.排湿风速对微波干燥过程湿度及其干燥特性的影响[J].浙江农业学报,2016,28(6):1061-1068.
- [9] 李静,浦宏杰,宋飞虎,等.排湿压力对微波干燥过程的影响[J].江苏农业科学,2015,43(5):257-259.
- [10] 李静,宋飞虎,浦宏杰,等.苹果控制排湿压力微波干燥模型研究[J].江苏农业科学,2015,43(11):529-532.
- [11] 席慧涵,刘云宏,王琦,等.马铃薯超声强化远红外辐射干燥特性及神经网络模型研究[J].食品与机械,2019,35(2):123-128,152.
- [12] Tavakolipour H, Mokhtarian M. Neural network approaches for prediction of pistachio drying kinetics[J]. *International Journal of Food Engineering* 2012, 8(3): 1-17.
- [13] 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.
- [14] Liu Yunhong, Sun Yue, Miao Shuai, et al. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of flos *loniceræ*[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(8): 4955-4964.
- [15] Ju H Y, Zhao S H, Mujumdar A S, et al. Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2018, 111: 20-29.
- [16] 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等.干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(16):296-304.
- [17] 田华.生姜微波干燥动力学模型构建[J].保鲜与加工,2020,20(1):127-132.
- [18] Jian Wu Dai, Jun Quan Rao, Dong Wang, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves[J]. *Drying Technology*, 2015, 33(12): 365-376.
- [19] 李文峰,金欢欢,肖旭霖.山楂气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J].食品科学,2014,35(9):69-73.
- [20] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.86-2016 食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [21] 李文峰,金欢欢,肖旭霖.气体射流冲击干燥对山楂抗坏血酸、还原糖、总酸及总黄酮的影响[J].食品与发酵工业,2013,39(7):147-153.
- [22] Mohammad Hossein Nadian, Shahin Rafiee, Mortaza Aghbashlo, et al. Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2015, 94: 263-274.
- [23] 白竣文,田潇瑜,马海乐.基于BP神经网络的葡萄气体射流冲击干燥含水率预测[J].现代食品科技,2016,32(12):198-203.
- [24] 刘品,刘寅,张艳,等.干燥介质相对湿度对红枣热风干燥特性的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(11):185-190.
- [25] 于海明,李海源,张欣悦,等.水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥动力学模型研究[J].农业机械学报,2020,51(5):339-348.
- [26] Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: Theory and applications[J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(1-3): 489-501.