

DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90036

光皮木瓜真空脉动干燥特性及神经网络模型

Drying characteristics of *Chaenomeles sinensis* with vacuum pulsed drying technology based on BP neural network mode

巨浩羽¹ 赵士豪¹ 赵海燕² 张卫鹏³ 肖红伟⁴JU Hao-yu¹ ZHAO Shi-hao¹ ZHAO Hai-yan² ZHANG Wei-peng³ XIAO Hong-wei⁴

(1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061; 2. 河北经贸大学工商管理学院,

河北 石家庄 050061; 3. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 4. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

(1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang,

Hebei 050061, China; 2. College of Business Administration, Hebei University of Economics and Business,

Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 3. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University,

Beijing 100048, China; 4. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

摘要:目的:提高光皮木瓜干燥效率和品质。方法:以光皮木瓜为试验原料,选取干燥温度(50,60,70 °C)、真空时间(5,10,15,20 min)和常压时间(2,4,8 min)为影响因素,以干燥时间、复水比、维生素 C 含量、总黄酮含量、微观结构为指标进行单因素试验,建立 BP 神经网络模型并验证模型的预测效果。结果:干燥温度、真空时间和常压时间对光皮木瓜的干燥时间影响显著($P < 0.05$),其有效水分扩散系数为 $6.0448 \times 10^{-10} \sim 12.0086 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,且 D_{eff} 随干燥温度的升高而增大。BP 神经网络模型由干燥时间、干燥温度、常压时间和真空时间 4 个输入神经元、7 个隐含层和含水率 1 个输出神经元构成。当干燥温度为 65 °C、常压时间为 3 min、真空时间为 12 min 时,模型的预测值和实测值最大误差为 4.77%。光皮木瓜的复水性随干燥温度的提高而降低,随常压时间和真空时间的延长而先升高后降低;维生素 C、总黄酮含量随干燥温度、常压时间和真空时间的增加先上升后降低。当干燥温度为 70 °C 时,物料表面因大量失水而导致结壳硬化,水分迁移孔道坍塌堵塞;当干燥温度为 50 °C 时,物料表面呈蜂窝状多孔结构,有助于水分扩散迁移。结论:真空脉动干燥光皮木瓜的最佳工艺条件为干燥温度 60 °C、真空时间 10 min、常压时间 4 min,该条件下干燥时间

12.1 h、复水比 6.28 ± 0.05 、维生素 C、总黄酮含量分别为 $(71.26 \pm 0.74) \times 10^{-2}$, $(19.27 \pm 0.33) \text{ mg/g}$, BP 神经网络模型可以很好地描述光皮木瓜的真空脉动干燥过程。

关键词:光皮木瓜;真空脉动干燥;BP 神经网络;复水比;维生素 C;总黄酮

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the drying characteristic of *Chaenomeles sinensis* by using vacuum pulsed drying technology and establish BP neural network model. **Methods:** The single factor experiment of drying temperature (50, 60, 70 °C), constant atmosphere time (2, 4, 8 min) and vacuum time (5, 10, 15, 20 min) on drying time, rehydration ratio, V_C and general flavone content as well as microstructure of *Chaenomeles sinensis* during vacuum pulsed drying technology were investigated. **Results:** All the drying temperature, constant atmosphere time and vacuum time had significant influence on drying time ($P < 0.05$). The moisture effective diffusion coefficient (D_{eff}) ranged from 6.0448×10^{-10} to $12.0086 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ in different drying conditions and increased with drying temperature increasing. BP neural network mode consisted of input layer, hidden layer and output layer. The input layer included four neurons named drying time, drying temperature, constant atmosphere time and vacuum time. The hidden layer included seven neurons and the output layer included one neuron named moisture content. The maximum error between simulated and experimental values was 4.77%. Rehydration ratio decreased as drying temperature increased and increased first and then decreased with the extension of atmospheric pressure time and vacuum time. V_C and general flavone content increased first and then decreased with the increasing of drying temperature, atmospheric pressure time and vacuum time. The microstructure indica-

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:32102141);河北省自然科学基金资助项目(编号:C2020207004);河北省高等学校科学技术研究项目(编号:QN2021054);北京市自然科学基金项目(编号:6204035)

作者简介:巨浩羽,男,河北经贸大学讲师,博士。

通信作者:肖红伟(1982—),男,中国农业大学副教授,博士生导师,博士。E-mail: xhwcaugxy@163.com

收稿日期:2021-02-02

ted that when drying temperature was 70 °C, the material surface crusted due to a large amount of water loss. In this case, the water migration channel collapsed and blocked. When drying temperature was 50 °C, the surface of the material appeared a cellular porous structure, which was conducive to water diffusion and migration. **Conclusion:** The optimal drying process was drying at temperature 60 °C, with atmospheric pressure for 5 min and vacuum for 15 min. In this circumstance, the drying time, rehydration ratio, V_c and general flavone content were 12.1 h, 6.28 ± 0.05 , $(71.26 \pm 0.74) \times 10^{-2}$ mg/g and (19.27 ± 0.33) mg/g, respectively. BP neural network model can describe the vacuum pulsed drying process of *Chaenomeles sinensis*.

Keywords: *Chaenomeles sinensis*; vacuum pulsed drying technology; BP neural network; rehydration ratio; V_c ; general flavone content

光皮木瓜 [*Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne] 为蔷薇科木瓜属植物木瓜的干燥成熟果实,具有抗肿瘤、抗癌、免疫调节等功效,是中国重要的药食两用资源^[1]。新鲜光皮木瓜呼吸作用强,易产生软化后熟和霉烂等现象。干燥是延长光皮木瓜货架期的重要加工方式,同时可增加产品附加值。崔莉等^[2]研究了皱皮木瓜的热风干燥特性,当干燥温度为 40~60 °C 时,皱皮木瓜干燥有效水分扩散系数为 $4.56 \times 10^{-9} \sim 6.38 \times 10^{-9}$ m/s²,Page 模型对其干燥过程拟合性较好。陈建凯等^[3]研究表明,微波功率、相对压力和切片厚度对番木瓜的干燥过程影响显著,且 Page 模型可很好地描述其干燥过程。而现有的经验模型或理论模型等仅对含水率和干燥时间进行了回归拟合,存在预测精确性差的问题。

真空脉动干燥技术是一种新型干燥技术,具有干燥效率高、品质好等优点,已被应用于茯苓^[4]、枣片^[5]、枸杞^[6]等物料干燥加工中。此外,神经网络模型在模拟干燥过程中物料含水率时,表现出很强的适应性和准确的模拟效果,其中应用最为广泛的是 BP 神经网络模型。试验拟探讨光皮木瓜在不同干燥温度、真空时间、常压时间下的干燥特性,测定干燥后产品的复水比、色泽、维生素 C 含量、总黄酮含量和微观结构,建立光皮木瓜干燥的 BP 神经网络模型,以期准确预测含水率、提高光皮木瓜的干燥效率和品质提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置及材料

真空脉动干燥机:结构示意图和工作原理参照巨浩羽等^[6]的方法;

光皮木瓜:选择无机械伤、无病虫害的样品,初始湿基含水率为 $(89.2 \pm 1.12)\%$,试验前于 (5 ± 1) °C 冰箱中冷藏,市售。

1.2 试验方法

1.2.1 光皮木瓜干燥 将光皮木瓜清洗,去皮,去籽,使用切片器横切为扇形片状,平铺于干燥机料盘上,考察干燥温度(50,60,70 °C)、真空时间(5,10,15,20 min)和常压时间(2,4,8 min)对光皮木瓜干燥特性和品质的影响,试验参数设计见表 1,真空时间结束时测定物料质量,干燥至湿基含水率为 10% 左右。

表 1 试验设计与参数

Table 1 Design for experiments with run conditions included

试验号	干燥温度/°C	真空时间/min	常压时间/min	初始质量/g
1	50	10	4	104.79±0.29
2	60	10	4	99.58±1.61
3	70	10	4	100.31±1.92
4	60	5	4	115.13±0.19
5	60	15	4	115.26±0.17
6	60	20	4	114.38±0.21
7	60	10	2	114.57±0.15
8	60	10	8	115.68±0.22

1.2.2 水分比 按式(1)、式(2)分别计算水分比^[7]和干基含水率。

$$M_R = \frac{M_t}{M_0}, \tag{1}$$

$$M_t = \frac{W_t - G}{G}, \tag{2}$$

式中:

M_R ——水分比;

M_t ——干燥 t 时刻物料的干基含水率, g/g;

M_0 ——初始干基含水率, g/g;

W_t ——干燥 t 时刻物料重量, g;

G ——绝干物质质量, g。

1.2.3 干燥速率 按式(3)计算干燥速率。

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1}, \tag{3}$$

式中:

D_R ——干燥速率, g/(g·h);

M_{t_1} 、 M_{t_2} ——干燥 t_1 和 t_2 时刻物料的干基含水率, g/g。

1.2.4 水分有效扩散系数 光皮木瓜干燥过程中的水分有效扩散系数 D_{eff} 可由简化的费克第二定律求解^[8], 即

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \approx \frac{8}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right), \tag{4}$$

式中:

L ——物料的切片厚度, m;

t ——干燥时间,s。

1.2.5 复水比 参照文献[9],并按式(5)计算复水比。

$$R_R = \frac{m_2}{m_1}, \quad (5)$$

式中:

R_R ——复水比,g/g;

m_2 ——复水后质量,g;

m_1 ——复水前质量,g。

1.2.6 维生素 C 含量测定 采用 2,6-二氯酚酞滴定法。

1.2.7 总黄酮含量测定 参照文献[1]。

1.2.8 数据处理 采用 Excel 绘制光皮木瓜的干燥曲线、干燥速率曲线,求解水分有效扩散系数及分析复水比、维生素 C 含量、总黄酮含量的显著性差异;Matlab 软件建立 BP 神经网络模型。

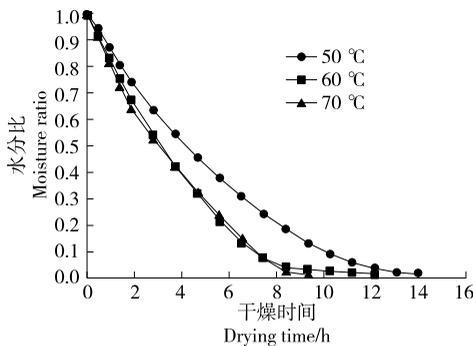
2 结果与分析

2.1 干燥特性

2.1.1 干燥温度对光皮木瓜真空干燥特性的影响 由图 1 可知,不同干燥温度下,水分比随干燥时间的延长不断降低,当干燥温度为 50,60,70 °C 时,干燥时间分别为 14.0,12.1,9.3 h,70 °C 时的干燥时间比 50 °C 时的缩短了 34.3%,说明升高温度可显著提高干燥效率,缩短干燥时间。0~7 h 内,60,70 °C 下的干燥曲线无显著性差异,是因为较高干燥温度下物料表面水分大量蒸发,而内部水分不能及时迁移至表面而造成表面结壳硬化,阻碍了内部水分进一步向外迁移。此外,干燥温度过高还可能导致维生素 C、黄酮类有效成分大量降解,因此干燥温度不宜过高。

由图 2 可知,不同干燥温度下,干燥速率均先上升后下降,说明干燥过程是由表面水分蒸发和内部水分扩散共同控制。当干燥温度为 70 °C 时,干燥速率先大于后小于 60 °C 的,可能是因为高温导致光皮木瓜表面结壳硬化,降低了干燥速率。

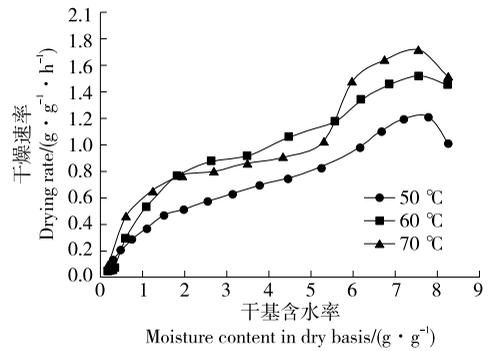
2.1.2 常压时间对光皮木瓜真空干燥特性的影响 由



真空时间 10 min,常压时间 4 min

图 1 干燥温度对干燥曲线的影响

Figure 1 Effects of drying temperature on drying curves



真空时间 10 min,常压时间 4 min

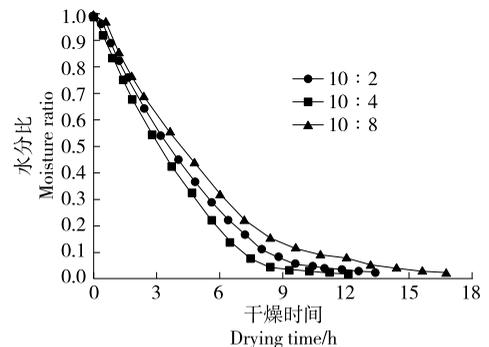
图 2 干燥温度对干燥速率曲线的影响

Figure 2 Effects of drying temperature on drying rate curves

图 3 可知,当常压时间为 2,4,8 min 时,干燥时间分别为 13.4,12.1,16.8 h,干燥时间随常压时间的增大先减少后增加。常压阶段为光皮木瓜片的加热阶段,而当常压时间为 2 min 时,光皮木瓜未被充分加热,物料温度较低,内部水分扩散推动力较小。当常压时间为 8 min 时,光皮木瓜已充分加热,但由于常压时间的延长导致总干燥时间延长。

由图 4 可知,不同常压时间下,光皮木瓜的干燥速率均先上升后下降。升温干燥阶段,常压时间为 8 min 时干燥速率最大,可能是因为常压时间内光皮木瓜充分预热,升温速率快。降温干燥阶段,常压时间为 4 min 时的干燥速率最大,此时光皮木瓜充分预热,并保持合适的真空常压时间脉动比。

2.1.3 真空时间对光皮木瓜真空干燥特性的影响 由图 5 可知,当真空时间为 5,10,15,20 min 时,干燥时间分别为 13.9,12.1,15.0,16.0 h。干燥时间随真空时间的延长先减少后增加。真空阶段,光皮木瓜中的水分在表面蒸发,为脱水阶段。当真空时间为 5 min 时,光皮木瓜片中的水分未及时在表面蒸发,而当真空时间为 15,20 min



干燥温度 60 °C,真空时间 10 min

图 3 常压时间对干燥曲线的影响

Figure 3 Effects of normal atmosphere holding time on drying curves

时,光皮木瓜水分在表面大量蒸发,而蒸发带走大部分热量,此时物料温度可能不足以使内部水分迁移至表面,故总干燥时间增加。

由图 6 可知,不同真空时间下,干燥速率均先升高后降低,其中真空时间为 10 min 时的干燥速率最大。综上,干燥温度、真空时间和常压时间对干燥时间影响显著 ($P < 0.05$),且干燥温度 > 真空时间 > 常压时间。当干燥温度为 60 °C,常压时间为 4 min,真空时间为 10 min 时,干燥时间较短为 12.1 h。

干燥时间随干燥温度的升高而缩短,干燥温度越高,物料升温速率越快,内部水分扩散迁移速度剧烈。当干燥温度为 70 °C 时,光皮木瓜表面发生了结壳硬化,但仍具有较高的干燥速率,与张卫鹏等^[7]的结论一致。干燥时间随常压真空时间的延长而先升高后缩短。电加热板传递至物料的热量一部分用于物料表面水分蒸发,一部分用于物料升温^[10]。真空阶段为物料大量脱水阶段^[11],水分在物料表面大量蒸发带走大部分热量,可能导致物料温度降低,而物料温度降低后不利于内部水分向表面迁移。此外,随着物料内部水分的不断减少,干燥脱去的水分由自由水转变为结合水,故物料需要更高的温度才能迫使结合水发生扩散迁移。因此,真空保持一段时间后需转变为常压。常压时间内,此时物料吸收的热量主要用于物料升温,蒸发的水分较少^[12]。当物料升温至一定温度后,再转为真空阶段以进一步干燥,故真空时间和常压时间需要合理适当的组合,才能得到最优的干燥工艺。

2.1.4 水分有效扩散系数 由表 2 可知,不同干燥条件下,光皮木瓜的 D_{eff} 为 $6.044 8 \times 10^{-10} \sim 12.008 6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。 D_{eff} 随干燥温度的升高而增大,干燥温度越高,光皮木瓜物料温度越高,内部水分扩散迁移速率越快,与 José 等^[13-14]的结论一致。 D_{eff} 随真空时间或常压时间的延长而先增大后减小,与真空时间和常压时间对

干燥时间的影响结果一致。

2.2 BP 神经网络拟合

2.2.1 BP 神经网络模型参数选择 BP 神经网络包含输入层、隐藏层和输出层 3 部分^[15-16]。干燥温度、常压时间、真空时间和干燥时间是干燥过程的重要参数,选择此 4 个参数作为输入层。输出神经元 1 个,即光皮木瓜含水率。根据 Kolmogorov 定理^[17],当隐藏层节点数为 7 时,训练结果最优。因此,采用 4-7-1 结构的 BP 神经网络模型对光皮木瓜真空脉动干燥过程中的含水率进行预测,网络模型结构如图 7 所示。此外,选择 tansig-purelin 组合作为该网络的传递函数;采用 LM 算法的 trainlm 作为网络训练函数。

2.2.2 样本数据采集与处理 采集光皮木瓜不同干燥温度(50,60,70 °C)、常压时间(2,4,8 min)和真空时间(5,10,15,20 min)下共计 420 组试验数据,其中 400 组作为网络测试数据,20 组作为测试数据。由于干燥温度、常压时间和真空时间的量纲和范围差异,将输入数据归一化处理至 $[-1, 1]$ 。

2.2.3 网络模型训练与测试 由图 8 可知,BP 神经网络经 16 次训练后停止,均方差值达 0.000 503 4。由图 9 可知,光皮木瓜的实测含水率与预测含水率的决定系数 R^2 为 0.999 0,说明 BP 神经网络可以很好地描述光皮木瓜的真空脉动干燥过程。

2.2.4 模型验证 由图 10 可知,当干燥时间 < 1 h 时,光皮木瓜的水分比预测值与实测值偏差较大,当干燥时间 > 1 h 时,BP 神经网络预测值和实测值基本吻合,最大相对误差为 4.77%,说明 BP 神经网络能够很好地预测光皮木瓜在真空脉动干燥过程中的含水率。

2.3 干燥品质和微观结构

2.3.1 复水比、维生素 C 含量和总黄酮含量 由表 3 可知,复水比随干燥温度的升高而降低,是因为干燥温度过高导致光皮木瓜表面结壳,堵塞了水分迁移孔道,复水

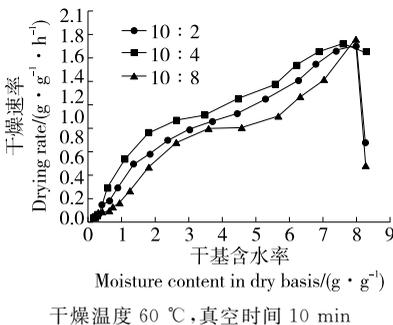


图 4 常压时间对干燥速率曲线的影响
Figure 4 Effects of normal atmosphere pressure holding time on drying rate curves

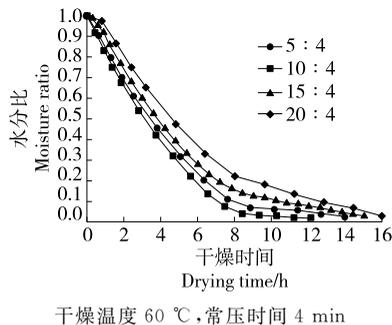


图 5 常压时间对干燥曲线的影响
Figure 5 Effects of vacuum holding time on drying curves

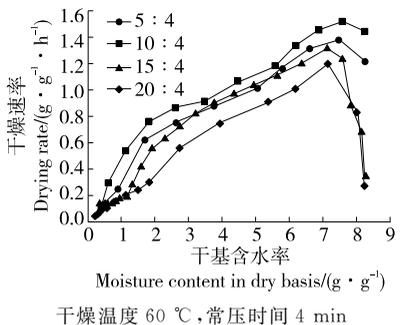


图 6 常压时间对干燥速率曲线的影响
Figure 6 Effects of vacuum holding time on drying rate curves

表 2 光皮木瓜真空脉动干燥水分有效扩散系数

Table 2 The moisture effective diffusion coefficient of *Chaenomeles sinensis* slices with vacuum pulsed drying conditions

试验号	干燥温度/℃	常压时间/min	真空时间/min	线性回归方程	R ²	有效水分扩散系数 D _{eff} /(×10 ⁻¹⁰ m ² ·s ⁻¹)
1	50	4	10	lnM _R = -8.00×10 ⁻⁵ t + 0.346 1	0.951 4	8.113 9
2	60	4	10	lnM _R = -10.45×10 ⁻⁵ t + 0.274 7	0.980 7	10.598 8
3	70	4	10	lnM _R = -11.84×10 ⁻⁵ t + 0.385 2	0.910 4	12.008 6
4	60	2	10	lnM _R = -6.63×10 ⁻⁵ t + 0.171 1	0.995 8	6.724 4
5	60	8	10	lnM _R = -8.54×10 ⁻⁵ t + 0.241 3	0.986 9	8.616 0
6	60	4	5	lnM _R = -5.96×10 ⁻⁵ t + 0.211 2	0.974 9	6.044 8
7	60	4	15	lnM _R = -6.54×10 ⁻⁵ t + 0.124 5	0.993 9	6.633 1
8	60	4	20	lnM _R = -7.66×10 ⁻⁵ t + 0.109 0	0.986 3	7.769 0

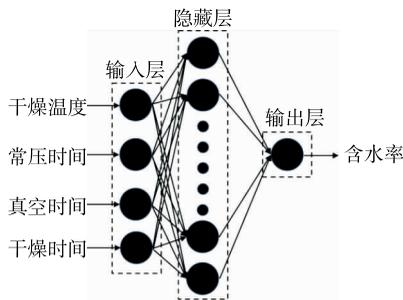


图 7 神经网络模型结构图

Figure 7 Neural network mode of *Chaenomeles sinensis* moisture content prediction

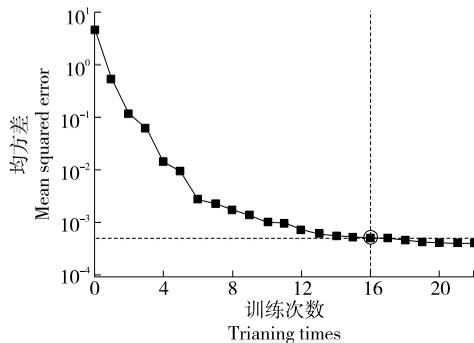


图 8 均方误差曲线图

Figure 8 Mean square error curve

性减弱。复水比随常压时间和真空时间的延长先升高后降低,且差异显著 ($P < 0.05$),可能是因为常压时间或真空时间对光皮木瓜内部水分迁移孔道产生不同程度的影响。当干燥温度为 50 °C 时,复水比较高,但干燥时间较长;当干燥温度为 60 °C,常压时间为 4 min,真空时间为 10 min 时,能保证较高的复水比 (6.28 ± 0.05),且干燥时间较短。

维生素 C 和总黄酮含量均随干燥温度的升高先升高后降低,说明较长的干燥时间和高温均不利于维生素 C 和总黄酮含量的保留;维生素 C 和总黄酮含量随常压时间和真

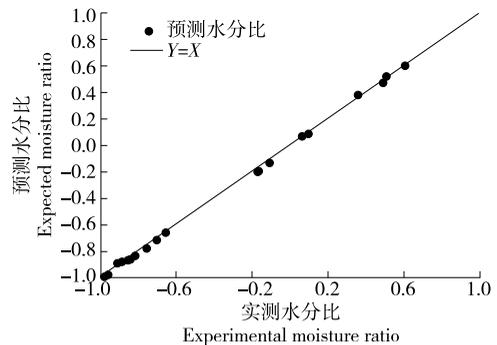
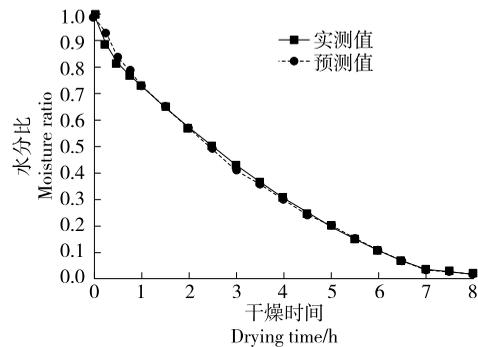


图 9 光皮木瓜含水率回归分析图

Figure 9 Regression analysis of *Chaenomeles sinensis* moisture



干燥温度 65 °C、真空时间 12 min、常压时间 3 min

图 10 光皮木瓜水分比实测值和预测值对比

Figure 10 Comparison of measured value and predicted value of *Chaenomeles sinensis* moisture content

真空时间的延长先升高后降低。综合比较,当干燥温度为 60 °C,常压时间为 4 min,真空时间为 10 min 时,光皮木瓜具有较高的干燥效率,且干燥品质较好,此时干燥时间为 12.1 h,复水比为 6.28 ± 0.05 ,维生素 C 含量为 $(71.26 \pm 0.74) \times 10^{-2}$ mg/g,总黄酮含量为 (19.27 ± 0.33) mg/g。

2.3.2 微观结构 由图 11 可知,50 °C 干燥条件下,光皮木瓜内部呈蜂窝状的多孔结构,有利于水分迁移,故干燥

表 3 光皮木瓜真空脉动干燥复水比、维生素 C 和总黄酮含量[†]

Table 3 Rehydration ratio, V_C content and general flavone of *Chaenomeles sinensis* slices with vacuum pulsed drying conditions

试验号	干燥温度/℃	常压时间/min	真空时间/min	复水比	维生素 C 含量/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	总黄酮/ (mg · g ⁻¹)
1	50	4	10	7.71±0.06 ^a	58.53±0.56 ^f	12.99±0.14 ^d
2	60	4	10	6.28±0.05 ^b	71.26±0.74 ^a	19.27±0.33 ^a
3	70	4	10	5.81±0.05 ^c	63.87±0.35 ^c	15.85±0.27 ^b
4	60	2	10	5.12±0.03 ^f	60.21±0.87 ^e	14.23±0.32 ^c
5	60	8	10	5.29±0.05 ^e	67.35±0.69 ^b	11.58±0.51 ^e
6	60	4	5	4.81±0.02 ^b	68.45±0.44 ^b	16.55±0.74 ^b
7	60	4	15	5.47±0.01 ^d	62.17±0.63 ^d	14.34±0.84 ^c
8	60	4	20	4.97±0.01 ^e	55.25±0.87 ^e	10.88±0.35 ^e

[†] 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

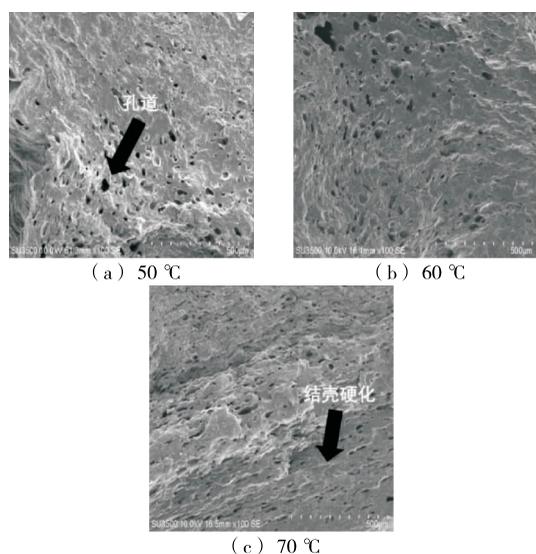


图 11 不同干燥温度下光皮木瓜微观结构

Figure 11 Microstructure of *Chaenomeles sinensis* slices at different drying temperature

后复水比较大。而干燥温度为 70 °C 时,表面水分大量蒸发引起物料表面结壳,堵塞了水分迁移扩散的通道,故复水率较低。

3 结论

基于 BP 神经网络模型研究了干燥温度、真空时间和常压时间对光皮木瓜干燥特性和品质的影响。结果表明,干燥温度、常压时间和真空时间对光皮木瓜的干燥时间影响显著(P<0.05),且干燥温度>真空时间>常压时间。光皮木瓜的有效水分扩散系数为 6.044 8×10⁻¹⁰~12.008 6×10⁻¹⁰ m²/s,且有效水分扩散系数随干燥温度的升高而增大。综合考虑,真空脉动干燥光皮木瓜的最优工艺条件为干燥温度 60 °C、真空时间 10 min、常压时间 4 min,此时干燥时间为 12.1 h,复水比为 6.28±0.05,

维生素 C 含量为(71.26±0.74)×10⁻² mg/g,总黄酮含量为(19.27±0.33) mg/g。实测含水率与预测含水率的决定系数为 0.999 0,BP 神经网络模型可以很好地描述光皮木瓜的真空脉动干燥过程。光皮木瓜真空脉动干燥过程中,干燥温度、常压时间和真空时间对光皮木瓜微观结构的影响机理尚不清晰,明确光皮木瓜微观结构的演化规律有助于揭示真空脉动干燥的促干机理。

参考文献

[1] 巨浩羽, 赵海燕, 张菊, 等. 基于 Dincer 模型不同干燥方式下光皮木瓜干燥特性研究[J]. 中草药, 2020, 51(15): 3 911-3 921.
JU Hao-yu, ZHAO Hai-yan, ZHANG Ju, et al. Drying characteristics of *Chaenomeles sinensis* with different drying methods based on Dincer model [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(15): 3 911-3 921.

[2] 崔莉, 杜利平, 王岱杰, 等. 皱皮木瓜热风干燥特性及其动力学模型的研究[J]. 中国食品添加剂, 2017(7): 96-102.
CUI Li, DU Li-ping, WANG Dai-jie, et al. Hot-air drying characteristics and dynamic model of *Chaenomeles spiciosa* (Sweet) Nakai[J]. China Food Additives, 2017(7): 96-102.

[3] 陈健凯, 王绍青, 林河通, 等. 番木瓜片的微波真空干燥特性与动力学模型[J]. 热带作物学报, 2017, 38(8): 157-165.
CHEN Jian-kai, WANG Shao-qing, LIN He-tong, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of papaya slices[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(8): 157-165.

[4] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317-324.
ZHANG Wei-peng, GAO Zhen-jiang, XIAO Hong-wei, et al. Drying characteristics of poriacocos with different drying methods based on Weibull distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 317-324.

[5] 钱婧雅, 张茜, 王军, 等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 259-265.
QIAN Jing-ya, ZHANG Qian, WANG Jun, et al. Effects of three dr-

- ying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 259-265.
- [6] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 基于 Weibull 分布函数的枸杞真空脉动干燥过程模拟及动力学研究[J]. 中草药, 2018, 49(22): 5 311-5 319.
JU Hao-yu, ZHAO Shi-hao, ZHAO Hai-yan, et al. Vacuum pulsed drying characteristics of Goji berry based on Weibull model[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(22): 5 311-5 319.
- [7] 张卫鹏, 陈浩然, 范晓志, 等. 茯苓真空脉动干燥特性及多目标优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 91-98, 144.
ZHANG Wei-peng, CHEN Hao-ran, FAN Xiao-zhi, et al. Pulsed vacuum drying characteristics and multi-objective optimization of Poria cubes[J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 91-98, 144.
- [8] 邹三全, 刘显茜, 赵振超, 等. 猕猴桃切片流化床干燥特性与干燥动力学模型研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 150-156.
ZOU San-quan, LIU Xian-xi, ZHAO Zhen-chao, et al. Study on drying characteristics and drying kinetic model of kiwi fruit slices in fluidized bed[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 150-156.
- [9] 张记, 彭桂兰, 张雪峰, 等. 黄芪切片热风干燥特性及动力学模型研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 22-28, 56.
ZHANG Ji, PENG Gui-lan, ZHANG Xue-feng, et al. Study on hot-air drying characteristics and kinetics model of Astragalus slice[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 22-28, 56.
- [10] RAHMAN N, KUMAR S. Influence of sample size and shape on transport parameters during drying of shrinking bodies[J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 30(2): 186-203.
- [11] XIE Y C, GAO Z J, LIU Y H, et al. Pulsed vacuum drying of rhizoma dioscoreae slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 237-249.
- [12] 张卫鹏, 郑志安, 陈畅, 等. 茯苓真空脉动中试干燥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 362-371.
ZHANG Wei-peng, ZHENG Zhi-an, CHEN Chang, et al. Design and test of pilot pulsed vacuum infrared drying equipment for Poria cocos[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 362-371.
- [13] JOSÉ A B, SANDOVAL A J. Kinetics of moisture adsorption during simulated storage of whole dry cocoa beans at various relative humidity[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 273: 109869.
- [14] AGNIHOTRI V, JANTWAL A, JOSHI R. Determination of effective moisture diffusivity, energy consumption and active ingredient concentration variation in Inula racemosa rhizomes during drying[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 106: 40-47.
- [15] 张彪, 刘璇, 毕金峰, 等. 基于 BP 神经网络算法的苹果制干适宜性评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(1): 134-147.
ZHANG Biao, LIU Xuan, BI Jin-feng. Suitability evaluation of apple for chips-processing based on bp artificial neural network[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(1): 134-147.
- [16] BHAGYA RAJ G V S, DASH K K. Microwave vacuum drying of dragon fruit slice: Artificial neural network modelling, genetic algorithm optimization, and kinetics study[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105814.
- [17] 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 Ning. Experiment on neural network prediction modeling of far infrared radiation drying of agaricus bisporus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 110-114.
-
- (上接第 117 页)
- [5] 戚亚东. YB25 包装机烟库搅动电机渗油问题剖析及改造[J]. 中国设备工程, 2020(4): 131-132.
QI Ya-dong. Analysis and transformation of oil leakage of stirring motor in tobacco warehouse of YB25 packaging machine[J]. China Equipment Engineering, 2020(4): 131-132.
- [6] 朱宝林. YB25 型软盒包装机四号轮内导板加热装置的改进及应用[J]. 科学中国人, 2017(20): 26.
ZHU Bao-lin. Improvement and application of heating device for inner guide plate of No. 4 wheel of YB25 flexible box packaging machine[J]. Scientific Chinese, 2017(20): 26.
- [7] 陈青辉, 张少博. YB25 型软盒包装机烟包划痕产生的原因分析[J]. 科技传播, 2014(14): 160-161.
CHEN Qing-hui, ZHANG Shao-bo. Cause analysis of cigarette package scratch of YB25 flexible box packaging machine[J]. Technology Communication, 2014(14): 160-161.
- [8] 辛利江. 提高卷烟生产设备多样化生产适应性[J]. 内蒙古科技与经济, 2018(18): 86-88.
XIN Li-jiang. Improve the diversified production adaptability of cigarette production equipment[J]. Inner Mongolia Science & Technology and Economy, 2018(18): 86-88.
- [9] 濮良贵, 纪名刚, 陈国定, 等. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 343-350.
PU Liang-gui, JI Ming-gang, CHEN Guo-ding, et al. Mechanical design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 343-350.
- [10] 机械设计手册编委会编著. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 683-689.
Edited by the Editorial Committee of Mechanical Design Manual. Mechanical design manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 683-689.
- [11] 刘伟忠, 朱春明, 张思韦. 双通道烟草包装机烟包转角输入机构的设计[J]. 机械工程师, 2012(5): 101-102.
LIU Wei-zhong, ZHU Chun-ming, ZHANG Si-wei. Design of the input mechanism of the cigarette pack corner of the dual-channel tobacco packaging machine[J]. Mechanical Engineers, 2012(5): 101-102.
- [12] 伍宇超. GDX1 包装机烟包输出驱动装置的改进[J]. 卷宗, 2019(27): 353.
WU Yu-chao. Improvement of cigarette pack output driving device of GDX1 packaging machine[J]. File, 2019(27): 353.