

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.059

猕猴桃片旋转托盘式微波真空干燥特性分析

张付杰¹ 辛立东¹ 代建武² 李丽霞¹ 周杰¹

(1. 昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500; 2. 四川农业大学机电学院, 雅安 625014)

摘要: 为研究猕猴桃片基于旋转托盘式微波真空干燥特性及品质优化工艺,探讨了不同功率密度(3.33、6.25、9.58 W/g)、干燥温度(40、45、50、55℃)、腔室压力(5、10、15、20 kPa)及切片厚度(3、6、9、12 mm)对猕猴桃片干燥特性的影响,比较了旋转托盘式相对于传统水平转盘式微波真空装备的优势,并研究了不同模型拟合预测猕猴桃片水分比变化的准确性与适用性。结果表明:随着功率密度的降低和切片厚度的增大,物料干燥过程中存在更为明显的恒速段;当干基含水率降至1.3 g/g左右时,干燥过程转入降速阶段。综合考虑感官评价及干燥时间可得,功率密度6.25 W/g、干燥温度45℃、腔室压力5 kPa、切片厚度6 mm干燥条件下猕猴桃片干制品品质最佳。旋转托盘式微波真空干燥可大幅提升物料装载量,干燥均匀性较传统方式提升了16%,干燥平均能耗仅为后者的71.2%。通过模型预测值与试验实测值的比较,BP神经网络模型决定系数 R^2 可达0.996,相比Weibull模型能更好地预测猕猴桃干燥过程的水分比变化规律。

关键词: 猕猴桃片;微波真空干燥;干燥特性;水分比预测;BP神经网络

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0501-08

Rotating Tray Microwave Vacuum Drying Characteristics of Kiwifruit Slices

ZHANG Fujie¹ XIN Lidong¹ DAI Jianwu² LI Lixia¹ ZHOU Jie¹

(1. Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya' an 625014, China)

Abstract: To investigate the rotating tray microwave vacuum drying characteristics and quality attributes of kiwifruit slices, the effects of different microwave power density (3.33 W/g, 6.25 W/g and 9.58 W/g), drying temperature (40℃, 45℃, 50℃ and 55℃), vacuum holding pressure (20 kPa, 15 kPa, 10 kPa and 5 kPa) and slice thickness (3 mm, 6 mm, 9 mm and 12 mm) on the drying kinetics of kiwifruit slices were analyzed. Weibull function and neural network model were also compared to choose the appropriate fitting model for kiwifruit slices drying. The results suggested that rotary tray microwave vacuum drying can greatly increase the material loading capacity. Meanwhile, the drying uniformity was increased by 16% compared with the traditional vacuum microwave drying method, and the average energy consumption was only 71.2% of the latter, which ensured excellent drying quality under the mass processing of kiwifruit slices. With the decrease of power density and the increase of slice thickness, there was a more obvious constant speed section in the process of material drying. When the moisture content of kiwifruit slices (dry base) dropped to about 1.3 g/g, the drying process changed to the speed reduction stage. The drying rate was added with the increase of microwave power density, drying temperature and vacuum holding pressure, as well as the decrease in slice thickness. Properly reducing the power density and drying temperature, increasing the vacuum degree and thickness can improve the quality attributes of dry products. The optimization parameter was confirmed at the power density of 6.25 W/g, drying temperature of 45℃, vacuum holding pressure of 5 kPa and the thickness of 6 mm. By analyzing the predicted values of two models, the determination coefficient (R^2) of neural network model can reach up to 0.996 and the root mean square error (RMSE) was 0.0216, which had

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 云南省重大科技专项计划项目(2018ZF004)、云南省科技人才和平台计划项目(2019IC001)和四川省科技创新人才计划项目(2020JDRC0066)

作者简介: 张付杰(1977—),男,副教授,博士,主要从事微波能在农产品干燥的应用研究,E-mail: 66605115@qq.com

通信作者: 代建武(1987—),男,讲师,博士,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: daijianwu@126.com

better simulation precision than that of Weibull model and it can predict the water transfer law of kiwifruit accurately during microwave vacuum drying. The research result provided a scientific reference for the mass production of kiwi fruit slices during the pilot stage.

Key words: kiwifruit slices; microwave vacuum drying; drying characteristics; moisture ratio prediction; BP neural network

0 引言

猕猴桃具有丰富的营养价值,每100 g猕猴桃鲜果含维生素C 100~420 mg^[1]。但在常温条件下,猕猴桃极易因微生物和酶的作用引起腐烂变质,难以久藏并造成经济损失^[2]。将鲜猕猴桃干制,不仅有利于延长其货架期,还可提升猕猴桃制品的产业价值^[3]。

目前国内外针对猕猴桃片的干制加工方法主要包括热风干燥^[4]、渗透脱水^[5]、真空冷冻干燥^[6]和对流红外干燥^[7]等。微波真空干燥可有效提升干燥效率,保证产品色泽,在产品品质方面比热风干燥明显提高^[8],与冷冻干燥接近,且能大幅降低生产成本,具有明显的技术优势^[9-10]。文献[11]研究了真空微波干燥对猕猴桃抗氧化活性和总酚物质的影响。文献[12]的试验结果表明,在微波功率800 W、真空腔压力0.04 MPa、切片厚度4 mm的条件下,干制品品质最好。文献[13]研究发现 Weibull 函数可有效描述猕猴桃片微波真空干燥失水过程,其尺度参数 a 与微波功率和真空度有关。虽然当前有关猕猴桃片的研究报道较多,但主要集中于传统微波真空设备的小批量工艺优化,受限于微波腔传热特性,不仅装载量低、效费比偏低,而且干燥过程中因物料的边角效应导致干燥不均匀等问题,限制了该技术的广泛应用,距离批量生产试制的工业化应用还存在一定限制。相关研究表明^[14],受原料来源的影响,农产品在实际生产中较实验室规模的加工品质差异性大,导致其最佳生产参数不一致。而旋转托盘式微波真空干燥设备在相同干燥腔室面积下可容纳更大装载量,更易实现规模化生产,不仅确保了批段式加工效率,同时料盘以回转的方式不断接近和远离微波发射设备实现脉动加热,保证了加热的均匀性,针对其技术方案进行工艺优化研究更具有实用价值^[15]。

神经网络模型作为近年来发展的一种先进智能化预测模型,因其可自主反馈与学习,能更好地预测干燥失水过程。BP神经网络是目前应用最广泛的多层前馈神经网络之一^[16]。文献[17]研究了南瓜片的真空脉动干燥,表明应用BP神经网络模型能很好预测南瓜片干燥过程中含水率的变化,其预测

值与实测值之间的决定系数 R^2 可达0.997。文献[18]研究发现在 Elman、RBF、BP 这3种神经网络模型中,BP神经网络模型拟合效果最好,能准确地快速地预测马铃薯超声强化远红外辐射干燥过程中的含水率变化。

因此,本文采用旋转托盘式真空微波干燥设备研究不同微波功率密度、腔室压力、干燥时间以及切片厚度对猕猴桃片微波真空干燥特性的影响,并结合传统微波真空干燥设备在干制品品质指标及综合分析评价方面进行分析;同时权衡 Weibull 经验函数与BP神经网络的拟合效果,确定能更好表达猕猴桃片微波真空干燥的函数模型,为其批量干制加工及品质优化提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

猕猴桃(新鲜、大小适中、无病虫害、表面完整无机械损伤)购自雅安市雨城区农贸市场,直径为 (4.5 ± 0.1) cm,长度为 (6 ± 0.2) cm,置于纸箱中阴凉处保存。去皮,采用水分测定仪与标准干燥法(105℃干燥24 h)共同测定得平均湿基含水率为86.5%。

1.2 仪器和设备

本研究所用设备为旋转托盘式真空微波干燥装置,主要由干燥箱、真空系统、传动系统、微波加热系统和控制系统等组成,其具体结构如图1所示。

干燥箱的整体外观呈长方体,在装置正面设置有箱门与控制面板,借助箱门中部的可视化窗口能够实时观测干燥室内情况,干燥箱顶部安装有微波发生装置,以实现物料进行微波加热。5个水平托盘均布于主轴四周,利用聚酰胺材料的自润滑特性并结合平行四连杆机构确保料盘内部物料始终处于水平状态。同时托架在旋转驱动装置的作用下带动水平托盘匀速旋转,显著提高了空间利用率与物料装载量,且使物料不断接近和远离微波发射腔实现脉动加热,确保整体受热效果更加均匀。真空系统通过调整真空微调阀的开闭状态实现对干燥室内的压力进行调节。其中,该设备的微波功率调节分为3个档位:800、1 500、2 300 W,物料温度则通过干燥箱体内部顶部的红外线温度传感器测得。

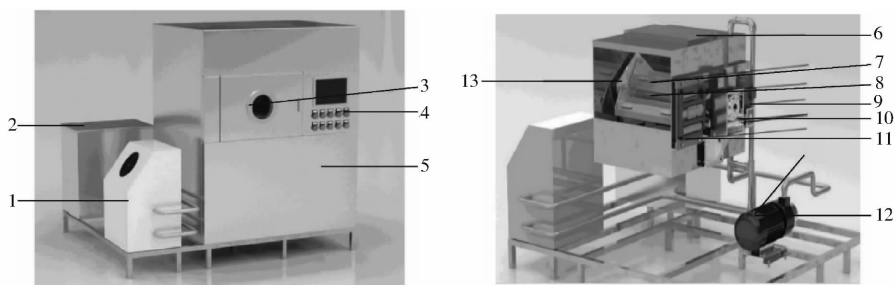


图 1 旋转托盘式微波真空干燥装置

Fig. 1 Schematic of equipment for microwave vacuum drying based on rotating tray

1. 冷凝器 2. 水箱 3. 干燥箱门 4. 真空微调阀 5. 箱体 6. 微波发射器 7. 水平托盘 8. 主轴 9. 驱动电机 10. 旋转驱动装置 11. 控制系统 12. 真空泵 13. 旋转托架

其他仪器设备: OHAUS - AR522CN 型电子精密天平(奥豪斯仪器(上海)有限公司); MA150 Starorius 型水分仪(赛多利斯公司, 德国); JX139632GR - 300 型推杆式切片机(河北润联机械设备有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

猕猴桃经人工去皮、切片, 单层均匀地摆放在料盘中。依据前期试验结果确定参数范围, 过高干燥温度及功率密度会导致猕猴桃片出现焦糊现象, 因此选取温度上限为 55℃、功率密度为 9.58 W/g; 受限于装置的机械特性, 其腔室压力最低可维持在 5 kPa, 同时过厚的猕猴桃片会导致干后口感不佳。综上所述, 本文采用单因素试验设计, 选定微波功率密度(3.33、6.25、9.58 W/g)、干燥温度(40、45、50、55℃)、腔室压力(5、10、15、20 kPa)、切片厚度(3、6、9、12 mm)进行研究, 探索旋转托盘式微波真空干燥装置不同干燥条件对猕猴桃片干燥特性及品质的影响, 具体试验参数如表 1 所示。其中, 传统微波真空干燥对比试验标定为对照组, 在不同功率密度条件下进行对比分析, 其他条件与试验序号 1~3 相同。每次试验重复 3 次, 取其平均值。试验过程中每隔

5 min 测定样品的质量变化, 直至猕猴桃片湿基含水率降至 15% 以下时停止试验^[19]。

1.3.2 干燥参数的计算方法

不同干燥时间猕猴桃的水分比计算式^[20]为

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

式中 M_0 ——初始干基含水率, kg/kg

M_e ——试样平衡干基含水率, kg/kg

M_t —— t 时刻干基含水率, kg/kg

干燥速率的计算公式^[17]为

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_1 - t_2} \quad (2)$$

式中 D_R ——干燥速率, kg/(kg·min)

M_{t_1} —— t_1 时刻干基含水率, kg/kg

M_{t_2} —— t_2 时刻干基含水率, kg/kg

脱水量均匀度 K_a 表征猕猴桃片干燥过程中的均匀性, K_a 越接近 100%, 干燥均匀性越好, 其计算公式^[21]为

$$K_a = \frac{\bar{X} - \Delta X}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 \bar{X} ——所有料盘脱水量平均值, g

ΔX ——所有料盘脱水量均方差, g

Weibull 函数模型方程被广泛用于农产品干燥过程的预测分析, 其表达式^[22-23]为

$$M_R = \exp(- (t/\alpha)^\beta) \quad (4)$$

式中 α ——速率常数, min β ——形状参数

其中, α 约等于干燥过程中物料脱去 63% 水分所需的时间, β 与干燥中传质开始时的速率呈负相关。

1.3.3 数据处理与模型分析

用 Excel 软件对试验数据进行处理, 选择 Matlab 2019 软件对试验数据进行 Weibull 模型拟合分析, 利用神经网络工具箱建立 BP 模型并对数据优化拟合。模型的拟合优度由决定系数 R^2 和均方根误差^[24]表示, R^2 越接近 1, 均方根误差越接近 0, 则拟合度越高。

表 1 试验设计和试验参数

Tab. 1 Experiment design and parameters

序号	功率密度/ (W·g ⁻¹)	干燥温度/ ℃	腔室压力/ kPa	切片厚度/ mm
1	3.33	45	10	6
2	6.25	45	10	6
3	9.58	45	10	6
4	6.25	40	10	6
5	6.25	50	10	6
6	6.25	55	10	6
7	6.25	45	20	6
8	6.25	45	15	6
9	6.25	45	5	6
10	6.25	45	10	3
11	6.25	45	10	9
12	6.25	45	10	12

1.3.4 综合评分方法

在品质分析中,为使数据具有统一性,需对评价指标感官评分(正向指标)与干燥时间(负向指标)进行归一化处理,公式^[25]为

$$y_{i1} = (x_{i1} - x_{min1}) / (x_{max1} - x_{min1}) \quad (5)$$

$$y_{i2} = (x_{max2} - x_{i2}) / (x_{max2} - x_{min2}) \quad (6)$$

式中 y_{ij} ——第 j 项指标归一值

x_{ij} ——第 j 项实际指标值

x_{maxj} ——第 j 项指标最大值

x_{minj} ——第 j 项指标最小值

加权综合评分^[26]公式为

$$Y_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} W_j \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

其中

$$W_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (8)$$

$$E_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (9)$$

$$P_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (10)$$

式中 Y_i ——综合评分

W_j ——对应的权重

E_j ——第 j 项指标的信息熵

m ——被评价对象的数目

n ——评价指标数目

本文中感官评分与干燥时间权重分配分别为 0.565 和 0.435。

2 结果与分析

2.1 干燥特性曲线

猕猴桃片在不同条件下的干燥曲线如图 2 所示。在较高功率密度和干燥温度及较小切片厚度下

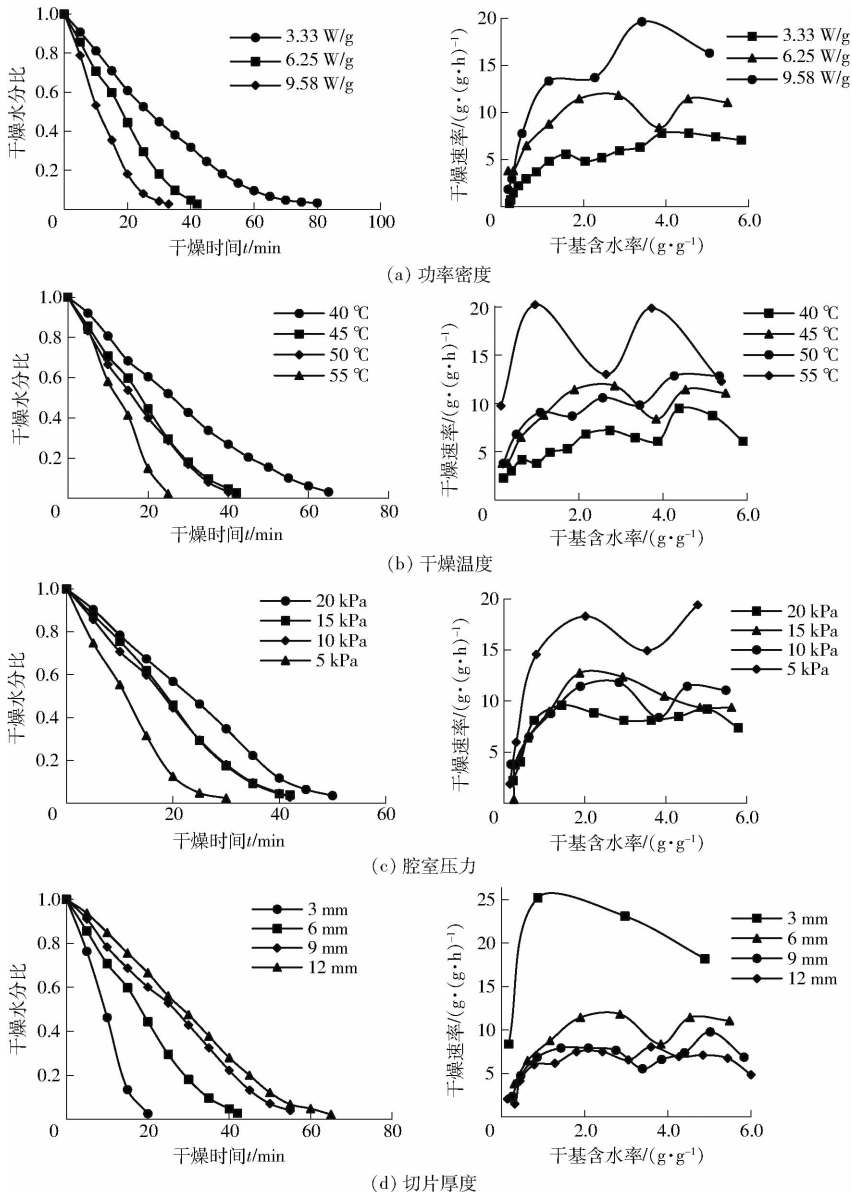


图 2 不同干燥条件下猕猴桃片的干燥曲线

Fig. 2 Drying curves of kiwi fruit slices under different drying conditions

物料含水率下降更快。随着功率密度增大,传质驱动力增大,其干燥时间显著缩短,该结果与文献[27]针对黑莓微波真空干燥的结果一致。干燥温度从40℃增加到55℃时,猕猴桃片的干燥时间缩短了59.7%;切片厚度从12 mm减少到3 mm,样品的平均干燥速率增加了3.25倍;当腔室压力减小(20 kPa下降至5 kPa),真空度增大,其干燥时间由50 min缩短至30 min(图2c)。造成该现象的原因可能是高真空度下物料内外水蒸气分压增加,同时沸点降低,更利于水分扩散。当干基含水率降至1.3 g/g左右时,干燥速率均呈下降趋势,此时主要表现为结合水的脱除阶段,其变化规律与物料性质及内部结构密切相关。

由图2a可知,在不同功率密度条件下,物料干燥过程中存在一定的恒速段,且随功率密度降低逐步延长,表明了6 mm猕猴桃片水分挥发吸热所需的能量平衡点。不同干燥温度下,图2b的干燥速率曲线均存在波动起伏的变化规律,且转折点对应的干基含水率随干燥温度的增加不断下降。图2d表明,随着切片厚度增大,干燥过程存在明显的恒速阶段。原因可能是随着干燥的进行,物料厚度的增加延长了内部水分迁移距离,同时含糖的猕猴桃切片在表面结壳后阻碍了水分向外迁移,导致水分扩散受限而维持基本平衡的状态,造成干燥速率在一段时间内保持不变^[28]。

2.2 干燥均匀性对比分析

如表2所示,本文针对猕猴桃片基于旋转托盘式微波真空干燥与传统水平转盘式微波真空干燥的均匀性及能耗进行了对比分析。单位面积下旋转托盘式干燥的装载量较传统水平转盘式微波干燥方式提升了2.2倍,更利于工业化批量生产。同时其干燥均匀性可达95%,较后者提升了16%^[15],干燥平均能耗仅为后者的71.2%,凸显该技术更为节能。

表2 猕猴桃片在不同干燥方式下的均匀性对比

Tab.2 Comparison of drying uniformity of kiwifruit slices under different drying methods

参数	传统水平转盘式	旋转托盘式
	微波真空干燥	微波真空干燥
料盘状态	水平旋转	空间旋转
单位面积装载量/(g·m ⁻²)	1 700	5 432
干燥均匀性/%	82	95
平均能耗/(kW·h·kg ⁻¹)	6.15	4.38

2.3 猕猴桃品质分析

2.3.1 指标选取

不同干燥工艺条件对产品品质的影响主要体现在产品颜色和形态上。本试验选取感官评价

(采用权重法)与干燥时间作为干制品品质评价的指标。从色泽、滋气味及状态3个方面对猕猴桃干制品进行感官质量评分,其评分标准参照文献[29](表3),满分10分,评分6分以上为可接受。

表3 猕猴桃干制品感官评价标准

Tab.3 Sensory evaluation criteria for kiwifruit dried products

项目	要求	评分
色泽	切片呈绿色或浅绿色,色明亮	4
	切片呈浅黄色	3
	切片呈黄色或褐色	2
	切片为暗黄或焦黄,无光泽	1
滋气味	易咀嚼,有香气	3
	偏硬,有香气	2
	偏硬,有焦糊味	1
状态	大小均匀平整,饱满	3
	均匀平整,饱满	2
	均匀,饱满度差	1

2.3.2 综合评价分析

不同干燥条件下,所得猕猴桃片综合评分如表4所示。可知,在较低功率密度下,猕猴桃片色泽较好,无明显孔洞,总感官评分较高,但当微波功率密度达到9.58 W/g或温度升至55℃时,猕猴桃干制品色泽变暗,出现焦糊现象,品质不佳。腔室压力

表4 不同干燥条件下猕猴桃片的综合评分

Tab.4 Comprehensive scores under different drying conditions

序号	条件	感官评价				干燥时间/min	综合评分
		色泽	滋气味	状态	总分		
1	3.33 W/g	4	2	3	9 ^a	80 ^b	0.60 ^d
2	6.25 W/g	3	2	2	7 ^c	42 ^e	0.67 ^c
3	9.58 W/g	2	1	1	4 ^f	33 ^h	0.44 ^g
4	40℃	3	3	2	8 ^b	65 ^c	0.61 ^d
2	45℃	3	2	2	7 ^c	42 ^e	0.67 ^c
5	50℃	2	2	1	5 ^e	40 ^g	0.49 ^f
6	55℃	1	1	1	3 ^g	25 ⁱ	0.40 ^h
7	20 kPa	3	2	2	7 ^c	50 ^f	0.61 ^d
8	15 kPa	3	2	2	7 ^c	42 ^e	0.67 ^c
2	10 kPa	3	2	2	7 ^c	42 ^e	0.67 ^c
9	5 kPa	3	3	2	8 ^b	30 ⁱ	0.84 ^a
10	3 mm	4	1	1	6 ^d	20 ^k	0.72 ^b
2	6 mm	3	2	2	7 ^c	42 ^e	0.67 ^c
11	9 mm	3	2	2	7 ^c	55 ^c	0.58 ^e
12	12 mm	3	3	2	8 ^b	65 ^c	0.61 ^d
水平转盘	3.33 W/g	3	2	2	7 ^c	86 ^a	0.38 ⁱ
式真空对	6.25 W/g	2	1	2	5 ^e	59 ^d	0.37 ⁱ
照组	9.58 W/g	1	1	1	3 ^g	44 ^g	0.28 ^j

注:用Duncan法多重比较,同列标有不同字母代表显著性差异($p < 0.05$)。

在 10~20 kPa 时对于猕猴桃片干制品感官品质的影响则无显著差异,而随着厚度的不断增大,其感官品质也逐渐向优,保持了较好的滋气味。

不同功率密度、干燥温度及物料厚度均与感官评分及干燥时间存在显著性影响,而腔室压力在 10~15 kPa 时影响则不显著(表 4)。综合评分随腔室压力的减小而增加,随功率密度、干燥温度和物料厚度的增加而减小。与此同时,在相同功率密度(3.33、6.25、9.58 W/g)下,旋转托盘式真空微波干燥所得干制品在色泽、气味、状态及干燥时间方面均优于水平转盘式真空对照组,其综合评分分别对应提高了 57.9%、81.8% 和 57.1%。综合考虑感官评价与干燥时间的影响,功率密度 6.25 W/g、腔室压力 5 kPa、干燥温度 45℃、切片厚度 6 mm 下猕猴桃片综合评分最高,为 0.84。因此,与传统水平转盘式微波真空干燥方式(对照组)相比,采用旋转托盘式干燥可有效缩短干燥时间,提高品质,应用前景更好。

2.4 模型建立与对比分析

2.4.1 Weibull 模型

模型是对干燥过程的数学抽象,可从数值上揭示物料干燥失水过程随参数变化规律。干燥模型的建立能更好地描述、预测、控制整个干燥过程,为优化猕猴桃干燥工艺提供理论依据^[30]。

猕猴桃片基于 Weibull 干燥模型的拟合情况如表 5 所示,其中模型参数 α 和 β 可通过对微波功率、

表 5 Weibull 模型参数值及 R^2 、均方根误差

Tab.5 Parameters of thin-layer drying model for kiwifruit slices, R^2 and RMSE values

试验条件	α	β	R^2	均方根误差
3.33 W/g	34.14	1.374	0.997	0.016
6.25 W/g	21.40	1.557	0.994	0.025
9.58 W/g	13.93	1.455	0.999	0.011
40℃	32.22	1.427	0.996	0.019
50℃	20.14	1.409	0.993	0.027
55℃	14.18	1.817	0.996	0.022
20 kPa	27.26	1.657	0.991	0.030
15 kPa	22.08	1.732	0.996	0.021
5 kPa	12.93	1.486	0.996	0.023
3 mm	10.85	1.898	0.995	0.025
9 mm	30.66	1.546	0.988	0.035
12 mm	33.92	1.719	0.995	0.023

温度、腔室压力和切片厚度等干燥条件进行一次多项线性回归,其表达式^[30]为

$$\alpha = a_0 + a_1 w + a_2 T + a_3 p + a_4 s \quad (11)$$

$$\beta = b_0 + b_1 w + b_2 T + b_3 p + b_4 s \quad (12)$$

式中 w ——微波功率密度, W/g

T ——干燥温度,℃

p ——腔室压力, kPa

s ——物料切片厚度, mm

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 ——常数

b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 ——常数

根据各次试验设定的温度、功率密度、腔室压力和厚度以及 Weibull 模型的 α 和 β 值,分别求出 Weibull 模型中的参数 α 和 β 的回归方程,结果为

$$\alpha = 61.879 - 3.168w - 0.9183T + 0.661p + 2.434s \quad (13)$$

其中, R^2 为 0.85, F 为 9.79。而 β 的线性回归拟合度较低,回归方程不显著,因此取表 5 中 Weibull 模型 β 的均值为 1.590。代入 Weibull 模型方程后,得到猕猴桃片真空微波干燥下的实时水分比计算公式为

$$M_R = \exp\left(-\left(\frac{t}{61.879 - 3.168w - 0.9183T + 0.661p + 2.434s}\right)^{1.590}\right) \quad (14)$$

2.4.2 BP 神经网络模型

采集猕猴桃片在不同条件下水分比从初始值下降到干燥完成共计 125 组数据。采用交叉验证方式,设定训练数据、验证数据、测试数据的比例为 0.76:0.12:0.12,随机选取。输入层中,干燥时间、功率密度、温度、样品厚度与腔室压力均对猕猴桃片干燥过程中水分比的变化有重要影响。根据隐藏层个数 1~14 依次尝试,由图 3 可知,隐藏层节点数为 11 时均方误差最小,有最优训练效果。因此,本文采用结构为“5-11-1”的 BP 神经网络模型预测猕猴桃片干燥过程中实时水分比变化。

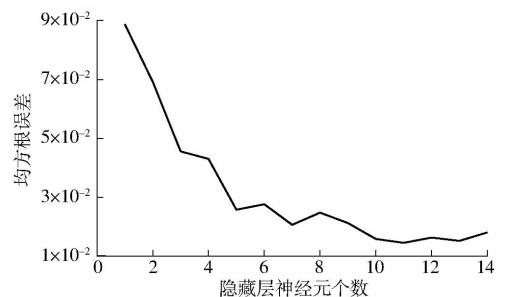


图 3 训练效果与隐藏神经元个数关系

Fig.3 Training effect and hidden neuron number relationship

分别用 L-M 优化算法(train-lm)、贝叶斯正则化算法(train-br)和比例共轭梯度动量算法(train-scg)3种常用训练函数对神经网络模型重复训练 15 次,取均方误差最小为最优数。经训练可得 train-lm 函数所得均方根误差最小,为 0.0145。故本研究采用 L-M 优化算法(train-lm)为训练函数。

将总样本中随机选取的 76% 作为训练样本,按上述神经网络结构及参数重复 15 次训练停止,可得

均方根误差为 0.016 6。验证样本在第 17 次训练后有最优均方误差为 0.021 3, 决定系数 R^2 为 0.993 1; 用测试样本对所得模型进行预测的决定系数 R^2 可达 0.997 0, 均方根误差为 0.016 5, 表明该模型预测效果较好。

2.4.3 模型验证与对比

为进一步验证比较模型的可靠性, 选取干燥条件为功率密度 6.25 W/g、干燥温度 47℃、腔室压力 5.3 kPa 与切片厚度 9 mm 进行验证试验, 预测及实测干燥曲线如图 4 所示。经计算, Weibull 模型 R^2 为 0.978、均方根误差为 0.049 6, 而 BP 模型 R^2 可达 0.996、均方根误差为 0.021 6。结果表明, BP 模型具有更好的预测精度, 可更好地预测猕猴桃微波真空干燥过程。

3 结束语

猕猴桃片的干燥速率随干燥温度、功率密度增加及腔室压力、切片厚度的减小而不断加快。不同功率密度、干燥温度及切片厚度均对感官评分及干燥时间存在显著性影响, 而腔室压力在一定范围内

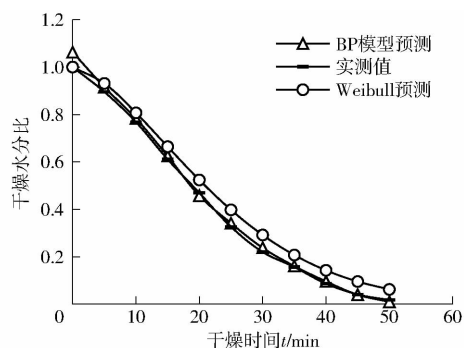


图 4 模型预测值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison of predicted and measured values

影响则不显著。综合考虑感官评价与干燥时间的影响, 功率密度 6.25 W/g、腔室压力 5 kPa、干燥温度 45℃、切片厚度 6 mm 下猕猴桃片的综合评分最高, 可达 0.84。与传统水平托盘式微波真空干燥相比, 基于旋转托盘式干燥方式可有效缩短干燥时间, 提高干燥速率, 保证均匀性及干燥品质, 具有更好的适应性。通过对 Weibull 函数及“5-11-1”结构的 BP 神经网络模型进行拟合比较, BP 神经网络模型具有更高的精度, 能更好描述猕猴桃片水分迁移的变化规律。

参 考 文 献

- [1] 张美芳, 何玲, 张美丽, 等. 猕猴桃鲜果贮藏保鲜研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 343-347. ZHANG Meifang, HE Ling, ZHANG Meili, et al. Advances in preservation methods for kiwifruit [J]. Food Science, 2014, 35(11): 343-347. (in Chinese)
- [2] 朱德泉, 王继先, 钱良存, 等. 猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 248-252. ZHU Dequan, WANG Jixian, QIAN Liangcun, et al. Optimization of technical parameters of microwave-vacuum drying of Chinese gooseberry slices [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 248-252. (in Chinese)
- [3] 曾目成. 猕猴桃片新型联合干燥技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. ZENG Mucheng. Reserach on the novel combination drying technology of kiwifruit slices [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [4] 邓红, 尤毅娜, 李宁, 等. 猕猴桃片的热风干燥特性[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(11): 165-170. DENG Hong, YOU Yi'na, LI Ning, et al. The hot air drying on kiwi fruit slices [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(11): 165-170. (in Chinese)
- [5] MICHAL B, ARTUR W, DOROTA W R, et al. The influence of osmotic dehydration conditions on drying kinetics and total carotenoid content of kiwiberry (*Actinidia arguta*) [J]. International Journal of Food Engineering, 2020, 16(1): 1515-1521.
- [6] 黄迪. 猕猴桃片气体射流干燥及气体射流联合真空冷冻干燥的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017. HUANG Di. Study on the air-impingement jet drying and air-impingement jet drying combined vacuum freeze drying technologies of kiwifruit slices [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017. (in Chinese)
- [7] ÖZDEMİR M B, AKTAS M, SEVIK S, et al. Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(28): 18005-18013.
- [8] CHUA L S, YEN W, CHUA B L, et al. Characterisation of the convective hot-air drying and vacuum microwave drying of *Cassia alata*: antioxidant activity, essential oil volatile composition and quality studies [J]. Molecules, 2019, 24(8): 1625.
- [9] RICARDO L M, JADE V L, GIUSTINO T, et al. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 232: 1-10.
- [10] 王红提, 郭康权, 李鹏, 等. 疏解棉秆的微波干燥动力学及能耗分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 294-301. WANG Hongti, GUO Kangquan, LI Peng, et al. Microwave drying kinetics and energy consumption analysis of extruded cotton stalks [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 294-301. (in Chinese)
- [11] ÖZCAN M M, AL J F, AHMED I A M, et al. Effect of microwave and oven drying processes on antioxidant activity, total phenol and phenolic compounds of kiwi and pepino fruits [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(1): 233-242.
- [12] 吴建业, 方露娜, 刘云宏, 等. 微波真空干燥工艺参数对猕猴桃切片品质的影响[J]. 干燥技术与设备, 2013, 11(6): 25-30. WU Jianye, FANG Lu'na, LIU Yunhong, et al. Influence of microwave vacuum drying parameters on quality of kiwifruit slices [J]. Drying Technology and Equipment, 2013, 11(6): 25-30. (in Chinese)

- [13] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 基于 Weibull 分布函数猕猴桃切片微波真空干燥过程模拟及应用[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 129 - 135.
ZENG Mucheng, BI Jinfeng, CHEN Qinqin, et al. Weibull distribution for modeling microwave vacuum drying of kiwifruit slices and its application [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(6): 129 - 135. (in Chinese)
- [14] WANG R, LI Z, SU W, et al. Comparison of microwave drying of soybean in static and rotary conditions [J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6(2): 1556 - 1562.
- [15] 代建武, 杨升霖, XIE Yuceng, 等. 旋转托盘式微波真空干燥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 370 - 376.
DAI Jianwu, YANG Shenglin, XIE Yuceng, et al. Design and experiments of rotating tray microwave vacuum dryer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 370 - 376. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200541. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.041. (in Chinese)
- [16] 刘海军, 刘伟, 张春芝, 等. 基于 BP 神经网络的微波真空膨化浆果脆片工艺参数优化[J]. 中国食品学报, 2016, 16(3): 103 - 108.
LIU Haijun, LIU Wei, ZHANG Chunzhi, et al. Optimization of process parameters for microwave puffing berry snacks based on BP neural network [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(3): 103 - 108. (in Chinese)
- [17] 白峻文, 周存山, 蔡健荣, 等. 南瓜片真空脉动干燥特性及含水率预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 290 - 297.
BAI Junwen, ZHOU Cunshan, CAI Jianrong, et al. Vacuum pulse drying characteristics and moisture content prediction of pumpkin slices [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 290 - 297. (in Chinese)
- [18] 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.
XI Huihan, LIU Yunhong, WANG Qi, et al. Drying characteristics and neural network model of far-infrared radiation enhanced by potato ultrasound [J]. Food and Machinery, 2019, 35(2): 123 - 128, 152. (in Chinese)
- [19] 孙海涛, 金显言, 邵信儒, 等. 真空干燥对野生枣软猕猴桃果脯感官品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 82 - 87.
SUN Haitao, JIN Yuyan, SHAO Xinru, et al. Effect of vacuum drying conditions on sensory quality of preserved fruits of wild actinidia arguta [J]. Food Science, 2014, 35(10): 82 - 87. (in Chinese)
- [20] 赵丹丹, 陈冬, 彭郁, 等. 枸杞热风干燥过程动力学模型及品质分析[J]. 中国食品学报, 2018, 18(3): 114 - 124.
ZHAO Dandan, CHEN Dong, PENG Yu, et al. Drying kinetics models and qualities analysis of lycium during hot air drying [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(3): 114 - 124. (in Chinese)
- [21] 代建武, 肖红伟, 谢龙, 等. 倾斜料盘式气体射流冲击干燥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 238 - 244.
DAI Jianwu, XIAO Hongwei, XIE Long, et al. Design and experiment of tilted tray air-impingement dryer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 238 - 244. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150735&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.035. (in Chinese)
- [22] BANTLE M, KOLSAKER K, EIKEVIK T M. Modification of the Weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food [J]. Drying Technology, 2011, 29(10): 1161 - 1169.
- [23] 尹慧敏, 聂宇燕, 沈瑾, 等. 基于 Weibull 分布函数的马铃薯丁薄片热风干燥特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 252 - 258.
YI Huimin, NIE Yuyan, SHEN Jin, et al. Drying characteristics of diced potato with thin-layer by hot-wind based on Weibull distribution function [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 252 - 258. (in Chinese)
- [24] 白峻文, 田潇漪, 刘宇婧, 等. 大野芋薄片干燥特性及收缩动力学模型研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(4): 124 - 131.
BAI Junwen, TIAN Xiaoyu, LIU Yujing, et al. Studies on drying characteristics and shrinkage kinetics modelling of *Colocasia gigantea* slices during thin layer drying [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(4): 124 - 131. (in Chinese)
- [25] 张文琴, 王晓燕, 宋高林. 不同干燥方式对黄刺玫果粉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(7): 218 - 224.
ZHANG Wenqin, WANG Xiaoyan, SONG Gaolin. Effect of drying methods on the quality of *Rosa xanthina* Lindl powder [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(7): 218 - 224. (in Chinese)
- [26] 顾苗青, 周厚源, 李汴生, 等. 肉鸡烤翅加工的多指标分析及工艺参数优化[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(8): 149 - 156.
GU Miaoqing, ZHOU Houyuan, LI Biansheng, et al. Multi-index analysis and optimization of processing parameters of roasted broiler chicken wings [J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(8): 149 - 156. (in Chinese)
- [27] SONG C, WU T, LI Z. Analysis of the heat transfer characteristics of blackberries during microwave vacuum heating [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 70 - 78.
- [28] 王志艳, 林毅雄, 林河通, 等. 南瓜片微波真空干燥特性[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(5): 510 - 516.
WANG Zhiyan, LIN Yixiong, LIN Hetong, et al. Microwave-vacuum drying characteristics of pumpkin slices [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(5): 510 - 516. (in Chinese)
- [29] 吕为乔, 王也, 韩清华, 等. 微波流态化干燥姜片工艺与品质分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 231 - 235.
LÜ Weiqiao, WANG Ye, HAN Qinghua, et al. Process and quality of ginger slices microwave-fluidization drying [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 231 - 235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140837&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.037. (in Chinese)
- [30] 李顺峰, 王安建, 侯传伟, 等. 废弃双孢蘑菇柄微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 中国食品学报, 2016, 16(2): 181 - 188.
LI Shunfeng, WANG Anjian, HOU Chuanwei, et al. Microwave vacuum drying characteristics and kinetic model of abandoned *Agaricus bisporus* mushroom handle [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(2): 181 - 188. (in Chinese)