

甜瓜弱微波辅助干热空气干燥特性及数学模型

Melon weak microwave-assisted hot air drying characteristics and mathematical model

张建超^{1,2} 白羽嘉^{1,2} 冯作山^{1,2}

ZHANG Jian-chao^{1,2} BAI Yu-jia^{1,2} FENG Zuo-shan^{1,2}

郑丽萍^{1,2} 迪力努尔·加克甫¹

ZHENG Li-ping^{1,2} DILINUR Jakefu¹

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆果品采后科学与技术重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

(1. College of Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Post-harvest Science and Technology of Fruit, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

摘要:目的:探究新疆甜瓜片在弱微波辅助干热空气干燥过程中的干燥特性。方法:以 R^2 、 χ^2 及 RMSE 为评价指标,比较不同条件下甜瓜片的湿基含水率、干燥速率、水分比的区别,并建立甜瓜片干燥动力学模型,获得甜瓜片在不同切片厚度、微波循环时间、干热空气循环时间条件下干燥特性曲线。结果:切片厚度越薄,微波及干热空气循环干燥时间越长,其湿基含水率下降越快,干燥速率越快,水分比变化越大;甜瓜片的干燥过程分为加速干燥和降速干燥两个阶段,加速干燥为主要干燥阶段;不同切片厚度、微波循环时间、干热空气循环时间下 Thompson 方程能更好地反映甜瓜片干燥特性及规律,其 R^2 为 0.992 9~0.999 9, χ^2 为 $9.55 \times 10^{-6} \sim 1.51 \times 10^{-3}$, RMSE 为 0.002 68~0.027 47。Thompson 方程的预测值与真实值的线性结果相似, R^2 为 0.995 0, χ^2 为 3.93×10^{-4} , RMSE 为 0.016 58。结论:该模型可用于预测弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片干燥过程的水分变化规律。

关键词:甜瓜;数学模型;干燥特性;微波干燥

Abstract: Objective: Using Xinjiang melon as raw material, explore melon slices in weak microwave-assisted hot air drying in the process of drying characteristics. **Methods:** Using R^2 , χ^2 and

RMSE as evaluation indexes, compare melon slices of wet basis moisture content under different conditions, the drying rate, moisture content than the distinction, and melon dry dynamics model was set up, and the drying characteristic curve of melon slices was gotten at different slice thickness, the cycle time of microwave, the hot air cycle time. **Results:** The thinner the slice, the longer the circulation drying time of microwave and dry hot air, the faster the moisture content of the dry base decreased. The faster the drying rate, and the more the moisture ratio changes. The drying process of melon slice can be divided into two stages, accelerated drying and reduced drying, and accelerated drying was the main drying stage. Different slice thickness, microwave circulation time and dry-hot air circulation time, the Thompson equation can better reflect the drying characteristics and laws of melon slices. The R^2 ranged from 0.992 9~0.999 9, χ^2 ranged from $9.55 \times 10^{-6} \sim 1.51 \times 10^{-3}$, RMSE ranged from 0.002 68~0.027 47. The predicted values of Thompson equation were similar to the true ones, R^2 was 0.995 0, χ^2 was 3.93×10^{-4} , and RMSE was 0.016 58. **Conclusion:** The model can be used to predict the moisture variation during the dry-hot air drying of melon slices.

Keywords: melon; mathematical model; drying characteristics; microwave drying

基金项目:食品科学与工程重点学科科研启动资助课题(编号: XJNDAK2001)

作者简介:张建超,男,新疆农业大学在读硕士研究生。

通信作者:冯作山(1963—),男,新疆农业大学教授,博士。

E-mail: fengzuoshan@126.com

白羽嘉(1984—),男,新疆农业大学副教授,博士。

E-mail: sainbyj@126.com

收稿日期:2021-11-18

甜瓜是新疆盛产的水果之一^[1]。但新疆地处偏远,甜瓜又属于季节性强、产量大、贮藏期短的水果,易造成采后大量浪费。目前,甜瓜干燥方式包括自然干燥、热风干燥、热泵干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、变温压差膨化干燥和气体射流冲击干燥等^[2]。微波干燥现被广泛应用,弱微波

是在微波干燥的基础上降低其功率密度,因此不会使金属材料产生电火花,并能反射微波,使物料完全吸收,也不会出现物料边角焦糊的现象。干燥热空气是自然环境中温度较高(25~35℃)的干燥(相对湿度在20%~50%)空气,即干热空气能^[3]。新疆独特的地理位置,使之有取之不尽的干热空气,且干热空气节能环保,成本低。王童等^[4]研究发现,微波热风联合干燥速率最快且花生营养品质最佳;Bunushree等^[5]研究了微藻的对流微波干燥动力学模型;Hou等^[6]研究发现,低水分样品在较低温度下加热更均匀,水分剖面更均匀;Merve等^[7]研究了青椒微波干燥在180 W下干燥和80℃下复水能够保持其品质特征。目前,微波—热风干燥技术、微波—真空干燥技术及微波干燥技术运用较为广泛,但对终端产品有一定影响,不能满足消费者对产品口感及营养的需求。研究拟采用常见的5种薄层干燥模型,研究弱微波辅助干热空气对甜瓜片的干燥效果,并对各个模型进行拟合优度评价,筛选出最适合的模拟模型,并计算出最终模型方程,旨在为甜瓜加工方式的选择和应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

甜瓜:西州蜜25号,要求无病斑,无机械损伤,采后放入低温库(7℃)贮藏备用,产自新疆吐鲁番。

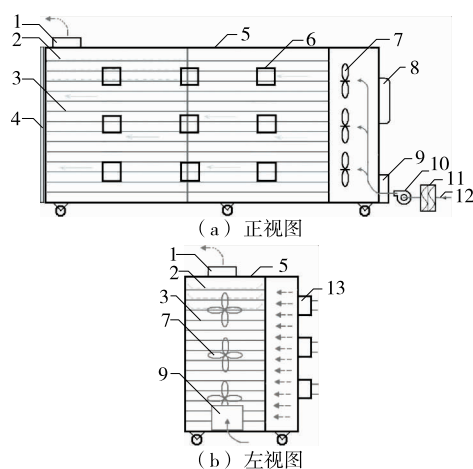
1.1.2 主要仪器设备

电子秤:JE21-JC21型,广东香山衡器集团股份有限公司;

微波辅助干热空气干燥装置(见图1):自制。

1.1.3 设备工作原理及方式 利用夏、秋季新疆的高温干燥空气,即干热空气能,作为主体的干燥介质,用于脱除果蔬70%~80%的水分,微波作为辅助补能方式,以电磁波的形式直接将能量传送到物料,无需中间传热介质,能量损耗小、利用率高,可达90%以上;能穿透到物料内部实现整体加热,干燥过程中水分内外扩散平衡、蒸发速率快;此外微波还有抑杀酶和微生物的作用,便于精确调控,易实现工业化生产。一般微波能量密度为10 kW/m³,试验设备降低微波场的能量密度至常规的1/20~1/50,即一种弱微波场状态^[12],解决微波应用中的干燥物料局部过热,边角焦糊、金属器具打火等技术应用瓶颈问题,实现该项技术的生产应用。

工作方式:试验所用干热空气通过空气净化器过滤由引风机引入干燥柜体,再由风扇吹向物料,潮湿空气由排气口排出;设备所用2M210-M1磁控管,单个功率1 000 W,工作频率2 450 MHz,干燥柜体长3 m、宽1 m、高2 m,内置长1 m、宽1 m干燥盘,干燥盘为大孔隙金属网盘,孔隙大小为1 cm×1 cm,设备干燥时由3个微波发



1. 排气口 2. 干燥盘 3. 隔架 4. 干燥柜门 5. 干燥柜体
6. 微波波导口 7. 风扇 8. 电器控制柜 9. 洁净干热空气入口
10. 引风机 11. 空气净化器 12. 自然环境干热空气 13. 微波发生器

图1 微波辅助干热空气装置

Figure 1 Microwave-assisted hot air device

生器为一组按从左至右的顺序轮流开启或关闭,开启功率3 000 W,9个微波发生器按顺序开启由3个DH48S-S时间继电器完成(一个时间继电器控制3个微波发生器),其中一个作为总的时间控制器,控制其余两个时间继电器,这两个时间继电器控制风扇和微波发生器的开启或关闭(即一个DH48S-S时间继电器可控制两个时间,一个时间结束即另一个时间开始),因此3个时间继电器可以控制4个时间段,风扇为一个时间,9个微波发生器3个为一组则为3个时间,开启顺序:先风扇,然后由3个微波发生器为一组按从左至右的顺序轮流开启或关闭,微波循环时间为3组微波总时间,每组微波时间为总的微波循环时间的1/3,以保证微波能量分布均匀,避免物料局部过热和发生边角焦糊。

1.2 方法

1.2.1 工艺流程 甜瓜经自来水冲洗,去皮,去瓢,切片,浸入含0.20%柠檬酸、0.15%食盐的混合溶液中护色20 min,漂洗后沥干表面水分,装盘,放入干燥柜体内进行干燥,一次微波+一次干热空气干燥为一次循环(干热空气和微波为轮流开启或关闭),每循环5次计一次重,风扇风速5 m/s,样品初始重量1 000 g,初始含水率89.64%,干热空气温度30℃,空气相对湿度30%,直至湿基含水率11%以下。因试验设置因素为改变微波和干热空气的工作时间,所以将以干燥时间计改为以干燥循环次数计,循环次数随干燥时间的延长而增加。

1.2.2 单因素试验设计

(1) 甜瓜切片厚度:设定干热空气循环干燥时间为6 min,微波循环干燥时间为120 s,甜瓜切片厚度分别为

5,7,9,11,13 mm,干热空气和微波为从左至右轮流开启或关闭,开启功率3 000 W,每循环5次称重一次,直至甜瓜片湿基含水率达11%以下,重复3次。

(2) 微波循环干燥时间:设定干热空气循环干燥时间为6 min,微波循环干燥时间分别为60,90,120,150,180 s,甜瓜切片厚度为9 mm,干热空气和微波为轮流开启或关闭,每循环5次称重一次,直至甜瓜片湿基含水率达11%以下,重复3次。

(3) 干热空气循环干燥时间:设定干热空气循环干燥时间分别为2,4,6,8,10 min,微波循环干燥时间为120 s,甜瓜切片厚度为9 mm,干热空气和微波为轮流开启或关闭,每循环5次称重一次,直至甜瓜片湿基含水率达11%以下,重复3次。

1.2.3 指标测定

(1) 甜瓜片含水量:按GB 5009.3—2016执行,按式(1)计算含水量。

$$H = \frac{L_1 - L_2}{L_1 - L_3} \times 100, \quad (1)$$

式中:

H ——甜瓜片水分含量,g/100 g;

L_1 ——甜瓜片和干燥皿的质量,g;

L_2 ——甜瓜片和干燥皿干燥至恒重时的质量,g;

L_3 ——干燥皿的质量,g。

(2) 湿基含水率:根据文献[13],按式(2)计算湿基含水率。

$$W_t = \frac{M_t - M_0(1 - W_0)}{M_t} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

W_t ——甜瓜片 t 次循环的湿基含水率,%;

M_t ——甜瓜片 t 次循环的质量,g;

M_0 ——甜瓜片的初始质量,g;

W_0 ——甜瓜片的初始含水率,%。

(3) 水分比:根据文献[14],按式(3)计算水分比。

$$MR = \frac{M_t - M_g}{M_0 - M_g}, \quad (3)$$

式中,

MR ——水分比,g/g;

M_0 ——甜瓜片的初始质量,g;

M_g ——甜瓜片干燥至平衡时刻的质量,g;

M_t ——甜瓜片 t 次循环的质量,g。

(4) 干燥速率:根据文献[15],按式(4)计算干燥速率。

$$DR = \frac{W_{t_1} - W_{t_2}}{t_1 - t_2}, \quad (4)$$

式中:

DR ——干燥速率,%/5次;

W_{t_1} 、 W_{t_2} ——甜瓜片干燥到 t_1 、 t_2 次的湿基含水率,%;

t_1 、 t_2 ——循环次数。

(5) 干燥数学模型:根据前人^[16-17]研究,选择5种相对常用的果蔬薄层干燥Thompson方程对甜瓜干燥数据进行拟合,模型种类及公式见表1。

模型拟合优度通过决定系数(R^2)、均方根标准差(RMSE)和卡方(χ^2)来判断^[18]。 R^2 与拟合度呈正相关, RMSE和 χ^2 与拟合度呈负相关^[19],并按式(5)~式(7)进行计算。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{\text{exp}}} - MR_{\text{pre},i})^2}, \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - n}, \quad (6)$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}, \quad (7)$$

式中:

$MR_{\text{exp},i}$ 、 $MR_{\text{pre},i}$ ——第 i 个数据点试验 MR 与模型预测 MR ;

N ——试验数据点数目;

n ——模型中参数数量。

1.3 数据处理与分析

利用Excel 2016软件进行数据录入和计算,用Origin 2018 64Bit软件进行绘图和模型拟合。

2 结果与分析

2.1 弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片干燥特性分析

2.1.1 切片厚度对甜瓜片干燥特性的影响

由图2、图3

表1 常用的果蔬薄层干燥数学模型

Table 1 Vegetable and fruit thin layer drying models and expressions

干燥模型	模型方程	线性方程
Appoximation of Diffusion	$MR = B \exp(Kt)$	$\ln MR = \ln B - Kt$
Newton	$MR = \exp(-Kt)$	$\ln MR = -Kt$
Page	$MR = \exp(-Kt^N)$	$\ln(-\ln MR) = \ln K + N \ln t$
Parabolic	$MR = A + Bt + Ct^2$	
Thompson	$t = A + B \ln MR + C (\ln MR)^2$	

可知,当甜瓜切片厚度为 5,7,9,11,13 mm 时,干燥循环次数分别为 45,50,55,60,65 次,甜瓜片含水率随循环次数的增加逐渐下降,分别在循环 35,40,50,55,60 次有最大干燥速率,分别为 3.55%/5 次,3.40%/5 次,2.61%/5 次,2.50%/5 次,2.11%/5 次。水分比在干燥前期下降较快,干燥后期下降缓慢,与易丽等^[20]的结果相似,说明切片厚度对干燥时间有显著影响。甜瓜片干燥过程主要为加速和降速两个阶段,且加速阶段比降速阶段长,干燥速率在起初为缓慢状态到干燥中期干燥速率加快,接近干燥终点时干燥速率开始减慢,可能是接近干燥终点,甜瓜片中的极性分子越少,吸收微波能量的能力减弱^[21],所以接近干燥终点时干燥速率会减慢。这与西林火姜^[22]、马铃薯^[23]、香蕉^[24]的微波干燥变化规律相似。甜瓜片越薄,水分子由内向外的扩散途径越短,相同质量下接触干热空气的面积越大,甜瓜片的干燥速率越快,干燥时间越短。综合考虑,选择切片厚度为 9 mm 较合适。

2.1.2 微波循环干燥时间对甜瓜片干燥特性的影响 由图 4、图 5 可知,当微波循环时间为 60,90,120,150,180 s 时,干燥循环次数分别为 70,65,55,45,35 次,说明随着微波时间的延长,干燥循环次数越少,分别在循环 60,55,45,35,30 次有最大干燥速率,分别为 2.36%/5 次,2.23%/5 次,2.91%/5 次,3.75%/5 次,5.09%/5 次。微波加热方式为由内向外的加热,极性分子之间振动摩擦产生热,可为水分蒸发提供潜热并与外部空气形成较大的水分梯度^[22],加速水分迁移速率。甜瓜片水分比在干燥前期下降较快,后期趋于平缓,与谢辉等^[25]的结果相似。干燥过程分为加速干燥和减速干燥两个阶段,干燥前期、中期甜瓜片表面水分迅速汽化,干燥速率增加^[26],干燥末期表面自由水逐渐消失,内部自由水和少量流动水的去除受到细胞结构的限制,干燥速率降低^[27]。与蓝莓^[28]、紫薯^[29]、苹果^[30]等物料的微波干燥过程相似。甜瓜片干燥初期,微波干燥 60 s,甜瓜片可升温 10 ℃,微波

干燥 120 s,可升温 20 ℃,微波干燥 180 s,可升温 30 ℃,因此,随着微波时间的延长,物料整体温度升高,温度越高,甜瓜片与空气间的温度差和湿度差增大,从而加快甜瓜片中水分扩散速率,所以微波时间越长,干燥速率越快,干燥循环次数越少。综合考虑,选择微波循环时间为 120 s 较合适。

2.1.3 干热空气循环干燥时间对甜瓜片干燥特性的影响

由图 6、图 7 可知,当干热空气干燥时间为 2,4,6,8,10 min 时,甜瓜片干燥循环次数分别为 65,60,55,50,40 次,随着干热空气循环干燥时间的延长,甜瓜片的循环干燥次数减少,分别在循环 60,55,40,45,35 次有最大干燥速率,分别为 2.39%/5 次,2.32%/5 次,2.61%/5 次,3.79%/5 次,2.72%/5 次。干热空气循环时间越长其水分比曲线斜率越大,干燥速率越快,干燥末期曲线斜率逐渐平缓,其干燥速率下降,与侯燕杰等^[31]的结果相似。干燥过程分为加速干燥和降速干燥两个阶段,且加速干燥时间较长,与核桃^[32]、树莓^[33]、无籽刺梨^[34]的热风干燥规律相似。这是因为干热空气流过甜瓜片表面会形成浓度边界层,边界层内水分浓度梯度较大,干热空气的水分浓度梯度远低于甜瓜片表面的,热空气流过甜瓜片表面,在对流传质的作用下水分从甜瓜片表面传递到干热空气。物料传递给干热空气水分会在内部形成水分梯度,从而推动内部水分向表面迁移,同时甜瓜片吸收的微波能也为内部水分迁移提供驱动力,使物料快速干燥^[35]。综合考虑,选择干热空气循环时间为 6 min 较合适。

2.2 甜瓜片干燥动力学模型的建立

2.2.1 不同干燥条件下的干燥模型 由表 2 可知,lnMR 与循环次数 t 的线性方程既不符合指数模型也不符合单项扩散模型。不同切片厚度下 Page 方程相关系数 R^2 为 0.971 4~0.986 6,卡方 χ^2 为 $5.39 \times 10^{-4} \sim 1.44 \times 10^{-3}$,均方根标准差 RMSE 为 0.021 19~0.031 68;Parabolic 方程相关系数 R^2 为 0.994 4~0.998 9,卡方 χ^2 为 $3.52 \times$

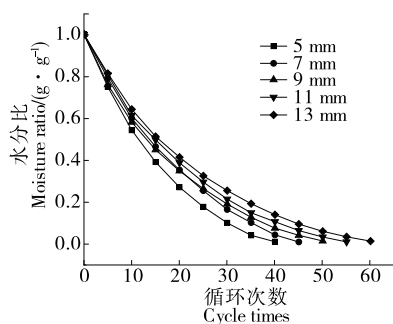


图 2 不同切片厚度下甜瓜片的水分比变化曲线

Figure 2 Different thickness of slice the moisture ratio curve of melon slices

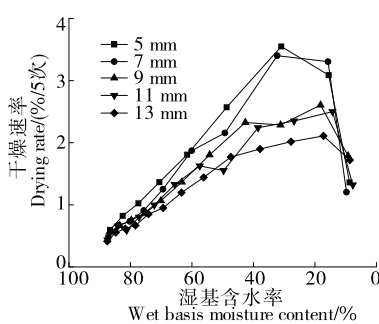


图 3 不同切片厚度下甜瓜片的干燥速率变化曲线

Figure 3 The drying rate curve of different slice thickness of melon slices

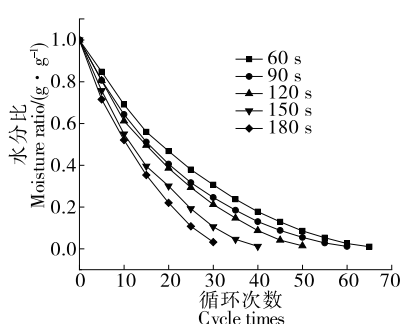


图 4 不同微波循环时间下甜瓜片的水分比变化曲线

Figure 4 Different microwave circulation time the moisture ratio curve of melon slices

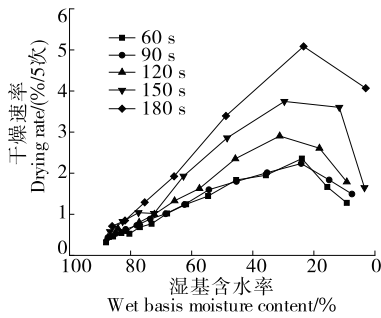


图5 不同微波循环时间下甜瓜片的干燥速率变化曲线

Figure 5 Different microwave circulation time curves of drying rate of melon slices

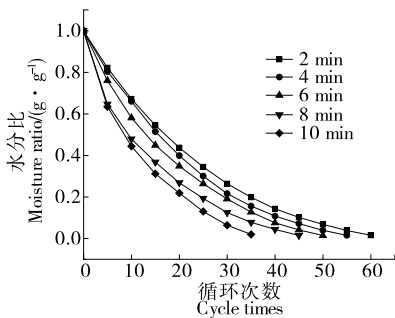


图6 不同干热空气循环时间下甜瓜片的水分比变化曲线

Figure 6 Different dry air circulation time the moisture ratio curve of melon slices

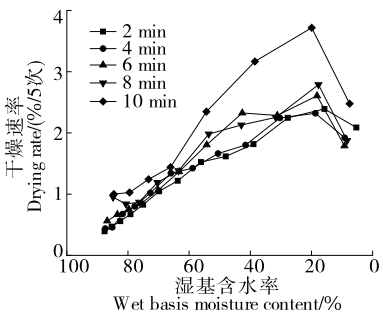


图7 不同干热空气循环时间下甜瓜片的干燥速率变化曲线

Figure 7 Different dry air circulation time curves of drying rate of melon slices

$10^{-4} \sim 4.12 \times 10^{-3}$, 均方根标准差 RMSE 为 $0.015\ 69 \sim 0.055\ 58$; Thompson 方程相关系数 R^2 为 $0.992\ 9 \sim 0.999\ 7$, 卡方 χ^2 为 $4.55 \times 10^{-5} \sim 1.51 \times 10^{-3}$, 均方根标准差 RMSE 为 $0.005\ 84 \sim 0.027\ 47$, Thompson 方程 R^2 的最小值明显大于 Page 方程和 Parabolic 方程的, χ^2 的最大值小于 Parabolic 方程的稍大于 Page 方程的, 但 Thompson 方程的最小值明显小于 Page 方程的, 仍可说明甜瓜片的干燥特性, RMSE 的最大值明显小于 Page 方程和 Parabolic 方程的。

由表 3 可知, 不同微波循环干燥时间下 Page 方程相关系数 R^2 为 $0.974\ 1 \sim 0.985\ 2$, 卡方 χ^2 为 $5.74 \times 10^{-4} \sim 1.44 \times 10^{-3}$, 均方根标准差 RMSE 为 $0.021\ 86 \sim 0.030\ 99$; Parabolic 方程相关系数 R^2 为 $0.996\ 5 \sim 0.998\ 8$, 卡方 χ^2

为 $4.91 \times 10^{-4} \sim 4.68 \times 10^{-3}$, 均方根标准差 RMSE 为 $0.016\ 75 \sim 0.058\ 34$; Thompson 方程相关系数 R^2 为 $0.996\ 7 \sim 0.999\ 5$, 卡方 χ^2 为 $2.26 \times 10^{-5} \sim 3.38 \times 10^{-4}$, 均方根标准差 RMSE 为 $0.004\ 05 \sim 0.013\ 90$, Thompson 方程 R^2 的最小值大于 Page 方程和 Parabolic 方程的, χ^2 和 RMSE 的最大值明显小于 Page 方程和 Parabolic 方程的。

由表 4 可知, 不同干热空气循环干燥时间下, Page 方程相关系数 R^2 为 $0.969\ 2 \sim 0.987\ 8$, 卡方 χ^2 为 $2.86 \times 10^{-4} \sim 1.12 \times 10^{-3}$, 均方根标准差 RMSE 为 $0.015\ 31 \sim 0.028\ 30$; Parabolic 方程相关系数 R^2 为 $0.979\ 4 \sim 0.998\ 8$, 卡方 χ^2 为 $8.46 \times 10^{-4} \sim 5.39 \times 10^{-3}$, 均方根标准差 RMSE 为 $0.024\ 81 \sim 0.061\ 43$; Thompson 方程相关系数 R^2 为 $0.999\ 2 \sim 0.999\ 9$, 卡方 χ^2 为 $9.55 \times 10^{-6} \sim 6.19 \times$

表 2 不同切片厚度下模型拟合结果

Table 2 Model fitting results under different slice thickness conditions

模型	切片厚度/mm	回归方程	R^2	χ^2	RMSE
Page 方程	5	$\ln(-\ln MR) = -3.407\ 6 + 1.269\ 0 \ln t$	0.978 1	9.49×10^{-4}	0.026 67
	7	$\ln(-\ln MR) = -3.641\ 3 + 1.277\ 2 \ln t$	0.971 4	1.29×10^{-3}	0.031 68
	9	$\ln(-\ln MR) = -3.252\ 5 + 1.138\ 8 \ln t$	0.979 5	8.17×10^{-4}	0.025 56
	11	$\ln(-\ln MR) = -3.574\ 0 + 1.207\ 7 \ln t$	0.983 1	3.90×10^{-4}	0.237 63
	13	$\ln(-\ln MR) = -3.554\ 0 + 1.168\ 2 \ln t$	0.986 6	5.39×10^{-4}	0.211 93
Parabolic 方程	5	$MR = 0.980\ 9 - 0.047\ 5t + 0.000\ 6t^2$	0.998 2	3.87×10^{-4}	0.016 06
	7	$MR = 0.981\ 8 - 0.039\ 8t + 0.000\ 4t^2$	0.998 4	3.52×10^{-4}	0.015 69
	9	$MR = 0.957\ 4 - 0.038\ 0t + 0.000\ 4t^2$	0.994 4	8.46×10^{-4}	0.024 81
	11	$MR = 0.971\ 6 - 0.035\ 6t + 0.000\ 3t^2$	0.996 8	4.12×10^{-3}	0.055 58
	13	$MR = 0.965\ 6 - 0.032\ 5t + 0.000\ 3t^2$	0.996 0	1.45×10^{-3}	0.033 39
Thompson 方程	5	$t = 0.499\ 3 - 17.045 \ln MR - 1.854\ 7 (\ln MR)^2$	0.998 4	1.51×10^{-3}	0.016 06
	7	$t = 0.794\ 7 - 20.234 \ln MR - 2.326\ 6 (\ln MR)^2$	0.997 4	2.53×10^{-4}	0.015 69
	9	$t = 0.121\ 7 - 22.564 \ln MR - 2.495\ 1 (\ln MR)^2$	0.999 3	6.19×10^{-5}	0.024 81
	11	$t = 0.032\ 3 - 23.147 \ln MR - 2.442\ 8 (\ln MR)^2$	0.999 5	8.58×10^{-5}	0.055 58
	13	$t = 0.579\ 4 - 25.856 \ln MR - 2.752\ 3 (\ln MR)^2$	0.999 7	4.55×10^{-5}	0.033 39

表 3 不同微波循环干燥时间下模型拟合结果

Table 3 Model under the conditions of different cycle of microwave drying time fitting results

模型	微波时间/s	回归方程	R^2	χ^2	RMSE
Page 方程	60	$\ln(-\ln MR) = -3.906\ 8 + 1.236\ 5 \ln t$	0.978\ 1	9.49×10^{-4}	0.026\ 67
	90	$\ln(-\ln MR) = -3.561\ 7 + 1.179\ 1 \ln t$	0.971\ 4	1.29×10^{-3}	0.031\ 68
	120	$\ln(-\ln MR) = -3.607\ 2 + 1.225\ 2 \ln t$	0.979\ 5	8.17×10^{-4}	0.025\ 56
	150	$\ln(-\ln MR) = -3.449\ 3 + 1.271\ 6 \ln t$	0.983\ 1	3.90×10^{-4}	0.237\ 63
	180	$\ln(-\ln MR) = -3.242\ 7 + 1.258\ 5 \ln t$	0.986\ 6	5.39×10^{-4}	0.211\ 93
Parabolic 方程	60	$MR = 0.977\ 9 - 0.029\ 3t + 0.000\ 2t^2$	0.997\ 9	3.46×10^{-3}	0.052\ 13
	90	$MR = 0.965\ 9 - 0.032\ 9t + 0.000\ 3t^2$	0.996\ 5	8.57×10^{-4}	0.025\ 67
	120	$MR = 0.976\ 1 - 0.036\ 3t + 0.000\ 3t^2$	0.997\ 3	4.68×10^{-3}	0.058\ 34
	150	$MR = 0.980\ 1 - 0.046\ 0t + 0.000\ 6t^2$	0.997\ 5	2.53×10^{-3}	0.041\ 08
	180	$MR = 0.985\ 6 - 0.053\ 4t + 0.000\ 7t^2$	0.998\ 8	4.91×10^{-4}	0.016\ 75
Thompson 方程	60	$t = 0.766\ 0 - 27.537 \ln MR - 3.001\ 6 (\ln MR)^2$	0.998\ 4	1.10×10^{-4}	0.009\ 10
	90	$t = 0.257\ 3 - 24.886 \ln MR - 2.579\ 2 (\ln MR)^2$	0.999\ 5	2.26×10^{-5}	0.004\ 05
	120	$t = 0.159\ 0 - 23.089 \ln MR - 2.706\ 8 (\ln MR)^2$	0.998\ 2	1.67×10^{-4}	0.010\ 56
	150	$t = 0.563\ 3 - 17.646 \ln MR - 1.994\ 4 (\ln MR)^2$	0.996\ 7	3.38×10^{-4}	0.013\ 90
	180	$t = 0.057\ 1 - 16.443 \ln MR - 2.261\ 5 (\ln MR)^2$	0.998\ 8	2.19×10^{-4}	0.009\ 36

表 4 不同干热空气循环干燥时间下模型拟合结果

Table 4 Under the condition of different hot air circulation drying time model fitting results

模型	干热空气时间/min	回归方程	R^2	χ^2	RMSE
Page 方程	2	$\ln(-\ln MR) = -3.683\ 6 + 1.193\ 2 \ln t$	0.987\ 6	5.02×10^{-4}	0.020\ 44
	4	$\ln(-\ln MR) = -2.583\ 7 + 0.994\ 8 \ln t$	0.987\ 8	2.86×10^{-4}	0.015\ 31
	6	$\ln(-\ln MR) = -3.252\ 5 + 1.138\ 8 \ln t$	0.979\ 5	8.17×10^{-4}	0.025\ 56
	8	$\ln(-\ln MR) = -3.620\ 4 + 1.208\ 3 \ln t$	0.969\ 5	1.03×10^{-3}	0.028\ 30
	10	$\ln(-\ln MR) = -2.610\ 4 + 1.058\ 3 \ln t$	0.969\ 2	1.12×10^{-3}	0.028\ 30
Parabolic 方程	2	$MR = 0.977\ 5 - 0.031\ 9t + 0.000\ 3t^2$	0.998\ 5	3.68×10^{-3}	0.053\ 24
	4	$MR = 0.982\ 3 - 0.035\ 3t + 0.000\ 3t^2$	0.998\ 8	2.31×10^{-3}	0.041\ 67
	6	$MR = 0.957\ 4 - 0.038\ 0t + 0.000\ 4t^2$	0.994\ 4	8.46×10^{-4}	0.024\ 81
	8	$MR = 0.918\ 4 - 0.043\ 8t + 0.000\ 5t^2$	0.979\ 4	5.39×10^{-3}	0.061\ 44
	10	$MR = 0.945\ 0 - 0.054\ 5t + 0.000\ 8t^2$	0.985\ 7	2.60×10^{-4}	0.040\ 30
Thompson 方程	2	$t = 0.179\ 3 - 26.069 \ln MR - 2.820\ 3 (\ln MR)^2$	0.999\ 9	9.55×10^{-6}	0.002\ 68
	4	$t = 0.498\ 6 - 23.191 \ln MR - 2.430\ 7 (\ln MR)^2$	0.999\ 8	5.38×10^{-5}	0.006\ 25
	6	$t = 1.127\ 1 - 22.564 \ln MR - 2.495\ 1 (\ln MR)^2$	0.999\ 3	6.19×10^{-5}	0.006\ 43
	8	$t = 3.837\ 5 - 20.966 \ln MR - 2.228\ 7 (\ln MR)^2$	0.999\ 7	2.92×10^{-5}	0.004\ 41
	10	$t = 2.781\ 6 - 17.829 \ln MR - 2.097\ 5 (\ln MR)^2$	0.999\ 2	6.02×10^{-5}	0.005\ 86

10^{-5} ,均方根标准差 RMSE 为 0.002\ 68~0.006\ 43, Thompson 方程 R^2 的最小值明显大于 Page 方程和 Parabolic 方程的, χ^2 和 RMSE 的最大值明显小于 Page 方程和 Parabolic 方程的。综上,最适合描述弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片过程中失水规律的模型为 Thompson 方程。

令:

$A_1 = a_1 + b_1 \times G + c_1 \times G^2,$ (8)

$B_1 = d_1 + e_1 \times G + f_1 \times G^2,$ (9)

$C_1 = g_1 + h_1 \times G + i_1 \times G^2,$ (10)

式中:

G ——切片厚度,mm;

$a_1、b_1、c_1、d_1、e_1、f_1、g_1、h_1、i_1$ ——待定系数。

根据 Thompson 方程拟合结果,

当切片厚度为 5 mm 时,

$$t = 0.4993 - 17.045 \ln MR - 1.8547 (\ln MR)^2, \quad (11)$$

当切片厚度为 9 mm 时,

$$t = 1.1217 - 22.564 \ln MR - 2.4951 (\ln MR)^2, \quad (12)$$

当切片厚度为 13 mm 时,

$$t = 0.5794 - 25.856 \ln MR - 2.7523 (\ln MR)^2. \quad (13)$$

将式(11)、式(12)、式(13)中相应的 A_1 值、 B_1 值、 C_1 值代入式(8)、式(9)、式(10)中,再将 3 个不同切片厚度的 G_1 值、 G_2 值、 G_3 值代入式(8)、式(9)、式(10)中,得到三元一次方程组,对其求解得:

$$a_1 = -2.92, b_1 = 0.95, c_1 = -0.05, d_1 = -5.59, e_1 = -2.80, f_1 = 0.10, g_1 = -0.52, h_1 = -0.33, i_1 = 0.01.$$

得到参数 A 、 B 、 C 的值为:

$$A = -2.92 + 0.95G - 0.05G^2,$$

$$B = -5.59 - 2.80G + 0.10G^2,$$

$$C = -0.52 - 0.33G + 0.01G^2.$$

最终得到甜瓜片在不同切片厚度(G)下的动力学模型:

$$t = -2.92 + 0.95G - 0.05G^2 + (0.10G^2 - 2.80G - 5.59) \ln MR + (0.01G^2 - 0.33G - 0.52) (\ln MR)^2. \quad (14)$$

同理,甜瓜片在不同微波循环时间(H)下的动力学模型:

$$t = 1.88 - 0.02H + 0.0007H^2 + (0.0003H^2 + 0.02H - 29.79) \ln MR + (0.0002H^2 + 0.0012H - 3.15) (\ln MR)^2. \quad (15)$$

不同干热空气循环时间(S)下动力学模型为:

$$t = -0.03 + 0.06S + 0.02S^2 + (0.02S^2 + 0.72S - 27.59) \ln MR + (0.0011S^2 + 0.07S - 2.97) (\ln MR)^2. \quad (16)$$

不同干燥条件下 $\ln MR$ 与干燥循环次数的关系见图 8~图 10。

2.2.2 最优模型验证 为了检验模型的拟合度是否准确,选择切片厚度 9 mm、微波循环时间 120 s、干热空气循环时间 6 min 对模型进行验证实验,将 Thompson 方程

预测值与真实值进行对比,结果见图 11,模型决定系数 R^2 为 0.995 0,卡方 χ^2 为 3.93×10^{-4} ,均方根标准差 RMSE 为 0.016 58,说明模型能够较好地反映弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片的干燥特性和规律,可用于预测弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片干燥过程的水分变化规律。

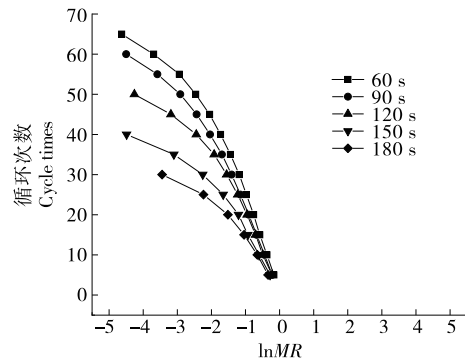


图 9 不同微波循环时间下 $\ln MR$ 与干燥循环次数的关系

Figure 9 The cycle time of different microwave $\ln MR$ relationship with dry cycles

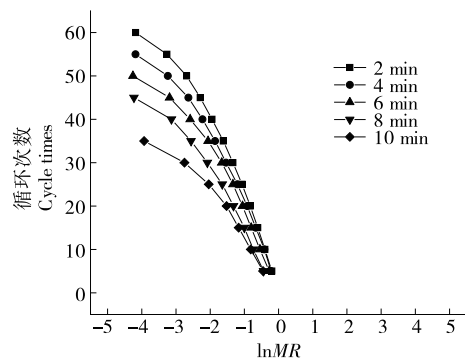


图 10 不同干热空气循环时间下 $\ln MR$ 与干燥循环次数的关系

Figure 10 Different hot air circulation time $\ln MR$ relationship with dry cycles

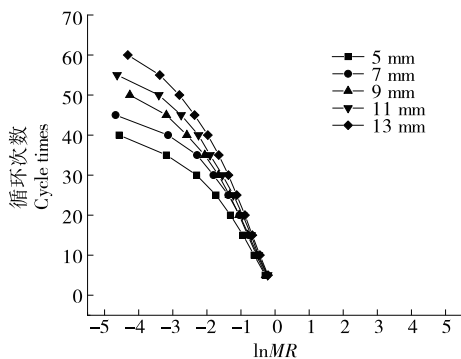


图 8 不同切片厚度下 $\ln MR$ 与干燥循环次数的关系

Figure 8 Different slice thickness $\ln MR$ relationship with dry cycles

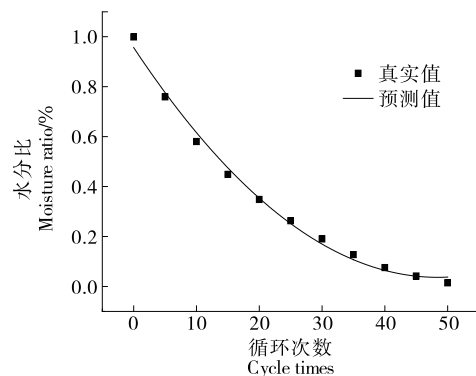


图 11 Thompson 方程验证曲线

Figure 11 Thompson model verification curve

3 结论

由弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片的干燥曲线和速率曲线可知,不同干燥条件下,甜瓜片的干燥速率曲线均为先加速干燥后减速干燥两个阶段,随着干燥循环次数的增加,甜瓜片的水分比呈下降趋势;甜瓜片越薄,微波循环干燥时间越长,干热空气循环干燥时间越长,甜瓜片干燥循环次数越少;前期、中期甜瓜片干燥速率随干燥循环次数的增加而加快,接近干燥终点时,干燥速率减慢。最佳干燥参数为切片厚度 9 mm,微波循环时间 120 s,干热空气循环时间 6 min。

对 5 种干燥模型进行线性模型拟合发现,Page 方程、Parabolic 方程和 Thompson 方程适合弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片模型拟合,Thompson 方程最适合描述弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片干燥特性及规律,其 R^2 为 0.992 9~0.999 9, χ^2 为 $9.55 \times 10^{-6} \sim 1.51 \times 10^{-3}$,RMSE 为 0.002 68~0.027 47。通过验证实验,Thompson 方程的预测值与真实值的线性结果相似 R^2 为 0.995 0, χ^2 为 3.93×10^{-4} ,RMSE 为 0.016 58,可用于预测弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片的干燥特性。试验未对弱微波辅助干热空气干燥甜瓜片干燥能耗及水分扩散情况进行研究,接下来可对设备干燥甜瓜片的干燥能耗,以及水分扩散情况进行研究。

参考文献

- [1] 董丹丹,王尉,张经华,等.新疆特色林果业食品发展现状[J].广东化工,2015,42(10): 102-103.
DONG Dan-dan, WANG Wei, ZHANG Jing-hua, et al. The development status of characteristic forestry and fruit food in Xinjiang[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(10): 102-103.
- [2] 常安太,郑霞,肖红伟,等.哈密瓜干燥技术现状与装备研究展望[J].包装与食品机械,2020,38(6): 61-67.
CHANG An-tai, ZHENG Xia, XIAO Hong-wei, et al. The current situation of Hami-melon drying technology and the prospect of equipment research[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(6): 61-67.
- [3] 江亿,谢晓云,于向阳.间接蒸发冷却技术:中国西北地区可再生干空气资源的高效应用[J].暖通空调,2009,39(9): 1-4, 57.
JIANG Yi, XIE Xiao-yun, YU Xiang-yang. Indirect evaporative cooling technology: High-performance application of renewable dry air energy in northwest China[J]. Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2009, 39(9): 1-4, 57.
- [4] 王童,杨慧,朱广成,等.热风、微波及其联合干燥对花生营养特性及感官品质的影响[J].核农学报,2021,35(9): 2 102-2 110.
WANG Tong, YANG Hui, ZHU Guang-cheng, et al. Effects of hot air, microwave and combined drying on nutritional properties and sensory quality of peanut[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(9): 2 102-2 110.

- [5] BUNUSHREE B, PARAMASIVAN B. Experimental and modelling studies of convective and microwave drying kinetics for microalgae[J]. Bioresource Technology, 2021, 340(7): 13-25.
- [6] HOU Li-xia, LI Rui, WANG Shao-jin, et al. Numerical analysis of heat and mass transfers during intermittent microwave drying of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller)[J]. Food and Bioprocess Processing, 2021, 129(6): 10-23.
- [7] MERVE D, ÖZGE S, MERIC S. Determination of microwave drying and rehydration kinetics of green peppers with the bioactive and textural properties[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(8): 37-50.
- [8] 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].食品与机械,2020,36(10): 177-182, 227.
TANG Xiao-xian, DUAN Zhen-hua, REN Ai-qing, et al. Study on microwave drying characteristics of instant arrowhead slices and kinetic model[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 177-182, 227.
- [9] 廉苗苗,段续,黄略略,等.猕猴桃片冻干真空微波联合干燥过程中品质变化及收缩模型[J].食品与机械,2020,36(5): 140-145, 210.
LIAN Miao-miao, DUAN Xu, HUANG Lue-lue, et al. Quality change and shrinkage model of kiwi during freeze drying and vacuum microwave combined drying[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 140-145, 210.
- [10] WANG Hui, DUAN Xu, DUAN Liu-liu, et al. Mutual transformation of the water binding state and moisture diffusion characteristics of Chinese yams during microwave freeze drying[J]. Drying Technology, 2020, 39(1): 66-67.
- [11] ARASH R, MOHSEN A. The shrinkage of orange slices during microwave drying and ohmic pretreatment[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(5): 15-22.
- [12] GOU De-zhi, HUANG Ka-ma, LIU Ying, et al. Influence of weak microwaves on spatial collision and energy distribution of water molecules[J]. Chemical Physics, 2021, 540(1): 11-16.
- [13] 付文欠,白羽嘉,王开升,等.干燥方式对新疆汤饭方便面片干燥特性、品质及微观结构的影响[J].食品工业科技,2022,47(7): 170-180.
FU Wen-qian, BAI Yu-jia, WANG Kai-sheng, et al. Effects of drying methods on drying characteristics, quality and microstructure of Xinjiang soup and rice surface patch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 47(7): 170-180.
- [14] 张记,孟国栋,彭桂兰,等.稻谷热风-真空联合干燥工艺参数优化[J].食品与发酵工业,2019,45(18): 155-161.
ZHANG Ji, MENG Guo-dong, PENG Gui-lan, et al. Optimization of process parameters for hot air and vacuum combined drying for rice[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(18): 155-161.
- [15] 武华文.哈密瓜片远红外干燥特性及品质工艺试验研究[D].阿拉尔:塔里木大学,2020: 11.
WU Hua-wen. Experimental study on far-infrared drying characteristics and quality technology of cantaloupe slices [D]. Alar: Tarim University, 2020: 11.

- [16] MBEGBU N N, NWAJINKA C O, AMAEFULE D O. Thin layer drying models and characteristics of scent leaves (*Ocimum gratissimum*) and lemon basil leaves (*Ocimum africanum*)[J]. *Heliyon*, 2021, 7(1): 45-59.
- [17] MATA M E R M C, DUARTE M E M, LIRA V V, et al. A new approach to the traditional drying models for the thin layer drying kinetics of chickpeas[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(12): 9-11.
- [18] 刘冬. 新疆红肉苹果对流式热风干燥动力学及品质控制研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017: 22.
LIU Dong. Dynamics and quality control of convection-drying of Xinjiang red-fleshed apple[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017: 22.
- [19] 谢辉, 张恒, 王敏, 等. 不同干燥工艺对新疆主要制干葡萄干干燥特性的影响[J]. *新疆农业科学*, 2021, 58(7): 1 332-1 341.
XIE Hui, ZHANG Heng, WANG Min, et al. Effects of different drying techniques on drying characteristics of main raisins in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2021, 58(7): 1 332-1 341.
- [20] 易丽, 杨薇, 王晨. 番木瓜片热风微波耦合干燥条件及干燥模型建立[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(9): 221-227.
YI Li, YANG Wei, WANG Chen. Drying conditions and drying model of papaya slices during combined microwave-convective hot air dehydration[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2017, 38(9): 221-227.
- [21] 汤小红, 李程懿, 黄丹, 等. 油茶籽微波真空干燥特性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(6): 139-146, 166.
TANG Xiao-hong, LI Cheng-yi, HUANG Dan, et al. Microwave vacuum drying characteristics of oil camellia seed[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(6): 139-146, 166.
- [22] 黄纪民, 吴钊龙, 李浩, 等. 西林火姜片微波间歇干燥特性及品质变化[J]. *食品工业科技*, 2021, 10(5): 1-20.
HUANG Ji-min, WU Zhao-long, LI Hao, et al. Westwood fire ginger intermittent microwave drying characteristics and quality change[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 10(5): 1-20.
- [23] 温家豪, 董继先, 王栋, 等. 马铃薯片间歇微波真空干燥工艺优化[J]. *食品工业*, 2021, 42(1): 130-135.
WEN Jia-hao, DONG Ji-xian, WANG Dong, et al. Optimization of intermittent microwave-vacuum drying of potato slices[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(1): 130-135.
- [24] 代建武, 杨升霖, 王杰, 等. 微波真空干燥对香蕉片干燥特性及品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 493-500.
DAI Jian-wu, YANG Sheng-lin, WANG Jie, et al. Effect of microwave vacuum drying conditions on drying characteristics and texture structure of banana chips[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 493-500.
- [25] 谢辉, 张雯, 韩守安, 等. 传统干燥工艺条件下葡萄制干特性及干燥模型研究[J]. *新疆农业科学*, 2018, 55(11): 2 035-2 041.
XIE Hui, ZHANG Wen, WANG Shou-an, et al. Study on the drying characteristics and drying model of grapes in traditional drying process[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2018, 55(11): 2 035-2 041.
- [26] 李湘利, 刘静, 朱乐乐, 等. 热风、微波及其联合干燥对蒜片品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 136-140, 146.
LI Xiang-li, LIU Jing, ZHU Le-le, et al. Effect of hot air, microwave and combined drying on the quality of garlic (*Allium sativum*) slices[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(15): 136-140, 146.
- [27] LI Lin-lin, ZHANG Min, ZHOU Le-qun. A promising pulse-spouted microwave freeze drying method used for Chinese yam cubes dehydration: quality, energy consumption, and uniformity[J]. *Drying Technology*, 2021, 39(2): 148-161.
- [28] 程丽君, 蔡敬民, 胡勇, 等. 蓝莓微波干燥动力学模型的研究[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(05): 78-82.
CHENG Li-jun, CAI Jing-min, HU Yong, et al. Study on the dynamic model of microwave drying of blueberry[J]. *Storage and Process*, 2020, 20(5): 78-82.
- [29] 张鸿. 微波和红外处理对紫薯片干燥特性及品质的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020: 22.
ZHANG Hong. Study on drying characteristics and quality of purple potato chips by microwave and infrared treatment[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020: 22.
- [30] ŞEN S, AYDIN F. Experimental investigation of drying kinetics of apple with hot air, microwave and ultrasonic power[J]. *Sādhanā: Published by the Indian Academy of Sciences*, 2020, 45(6): 189-211.
- [31] 侯燕杰, 刘冬, 杨曦, 等. 红肉苹果片穿流式热风薄层干燥特性及数学模型[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(8): 141-148.
HOU Yan-jie, LIU Dong, YANG Xi, et al. Mathematical model of thin-layer drying process for red-fleshed apple slices[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(8): 141-148.
- [32] 满晓兰. 面向核桃破壳的热风与微波真空协同干燥工艺参数优化[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021: 20.
MAN Xiao-lan. Optimization of the process parameters of hot-air and microwave-vacuum synergistic drying for walnut[D]. Alar: Tarim University, 2021: 20.
- [33] 王汉羊, 刘丹, 宋业君, 等. 树莓热风干燥特性及动力学模型[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2021, 33(3): 85-92.
WANG Han-yang, LIU Dan, SONG Ye-jun, et al. Drying characteristics and kinetic model of hot air drying for raspberry[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2021, 33(3): 85-92.
- [34] 周崇银, 范方宇, 赵国瑜, 等. 无籽刺梨干燥特性及动力学模型[J]. *食品科技*, 2020, 45(6): 39-45.
ZHOU Chong-yin, FAN Fang-yu, ZHAO Guo-yu, et al. Drying characteristics and kinetic model of rosa sterilis[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(6): 39-45.
- [35] 苑亚. 洋葱片热风干燥特性[D]. 北京: 京建筑大学, 2017: 18.
YUAN Ya. Characteristics of onion slices in hot-air drying process[D]. Beijing: Beijing university, 2017: 18.