

即食慈姑片微波干燥特性及动力学模型研究

Study on microwave drying characteristics of instant arrowhead slices and kinetic model

唐小闲^{1,2}段振华^{1,2}任爱清^{1,2}段伟文^{1,2}TANG Xiao-xian^{1,2} DUAN Zhen-hua^{1,2} REN Ai-qing^{1,2} DUAN Wei-wen^{1,2}罗瀚森^{1,2}林承珍^{1,2}蒙丽雅^{1,2}LUO Han-sen^{1,2} LIN Cheng-zhen^{1,2} MENG Li-ya^{1,2}

(1. 贺州学院食品与生物工程学院, 广西 贺州 542899; 2. 贺州学院食品科学与工程技术研究院, 广西 贺州 542899)

(1. College of Food and Biological Engineer, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China;

2. Institute of Food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China)

摘要:以慈姑为原料,研究了慈姑片厚度、铺料密度、微波功率对微波干燥特性的影响,建立干燥动力学模型。结果表明,慈姑片微波干燥过程中主要表现为加速干燥和降速两个阶段,但当功率密度比较小时,干燥速度曲线出现恒速阶段。慈姑片越厚、铺料密度越大,干燥速率变化越小,干基含水率降低越缓慢,干燥耗时越长;微波功率密度越大,干燥速率变化越大,干基含水率下降越快,干燥时间越短;即食慈姑片微波干燥过程符合 Page 模型,模型预测值与试验值拟合良好($R^2=0.990\ 66$)。

关键词:慈姑片;微波干燥;干燥特性;动力学模型

Abstract: The microwave drying characteristics of arrowhead slices was researched, and the drying kinetics model was established on the basis of effects of thickness, lay density and microwave power on the microwave drying characteristics of arrowhead were studied. The results show that the microwave drying process of arrowhead slices is mainly characterized by accelerated drying and deceleration, but when the power density was low, the drying rate appeared a constant stage. The greater the thickness and density were, the smaller the change of drying rate it was. The slower the reduction of moisture content was, and the

longer drying time it was. The higher the microwave power density was. The higher the change of drying rate was, the faster the moisture content decreases it was, and the shorter the drying time it was. The microwave drying process of arrowhead slices was fitted with Page model, and the predicted values of the model and the experimental values were almost unanimously ($R^2 = 0.990\ 66$).

Keywords: arrowhead slices; microwave drying; drying characteristics; kinetic modeling

慈姑(*Sagittaria tnfolia*)又称茨菇,为泽泻科、慈姑属单叶子多年生沼泽宿根草本植物,在中国被广泛栽培,资源十分丰富^[1-2]。慈姑具有菜食和药用价值,其主要食用部分为球茎,球茎中富含粗纤维、脂肪、淀粉、蛋白质及铁、锌、硒等^[3],慈姑多糖具有提升免疫力功能和增强抗氧化作用^[4]、秋水仙碱有抗痛风和抗癌作用^[5]。但由于鲜食慈姑有特殊甘苦味,部分消费者难以接受,近年来慈姑价格处于低迷状态,销量不稳定、甚至出现负增长现象,严重制约了慈姑产业的发展。

近年关于慈姑加工相关研究主要集中在慈姑淀粉特性^[6]、多糖提取工艺^[4]、挥发性风味成分分析^[7]、慈姑渣粉面包^[2]和慈姑饼干^[8]等方面,关于慈姑干燥的研究集中在慈姑片的自然晾晒风干、电箱烘烤、热风干燥、微波干燥、热风—微波干燥^[1],慈姑粉的喷雾干燥^[9],关于采用微波干燥膨化方法加工经调味处理的即食慈姑片的研究未见报道。

微波干燥技术具有特殊的膨化功能,且穿透力强、利用率高,微波加热过程中,由于微波能转化热能被物料吸收,物料内部快速升温、压力增大推动水分迁移和蒸发,

基金项目:广西特聘专家专项经费支持(编号:厅发[2016]21号);广西科技基地和人才专项(编号:桂科AD17195088);广西高校中青年教师基础能力提升项目(编号:2019KY0719);贺州市创新驱动发展专项(编号:贺科创 PT1907006);一流学科培育项目(编号:GXYLXKP1809);大学生创新创业训练计划项目(编号:201811838135)

作者简介:唐小闲,女,贺州学院助理研究员,硕士。

通信作者:任爱清(1984—),男,贺州学院助理研究员,博士。

E-mail:258032771@qq.com

收稿日期:2020-04-22

同时,物料内外压力差致使物料细胞膨胀,物料整体的膨化形成疏松孔隙结构^[10-11]。因此利用微波干燥膨化加工慈姑片制作即时休闲食品前景宽广。

研究拟以慈姑为对象,探究即食慈姑片在厚度、铺料密度和微波功率密度等条件下的微波干燥特性,利用干燥方程构建即食慈姑片微波干燥的动力学模型,以期为即食慈姑片微波干燥参数的优化及实际干燥工艺提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜慈姑:无机械损坏、大小均匀,贺州市源贸易商行;

食用盐、白砂糖、味精:市售。

1.2 主要仪器

微波炉:G70D20CN1P-D2(S0)型,广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;

分析天平:BSA124S型,德国 Sartorius 公司;

水分测定仪:MX-50型,日本 AND 公司;

电磁炉:C21-WT2118型,广东美的生活电器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 即食慈姑片加工工艺流程及前处理

(1) 加工工艺流程:

慈姑→清洗→去皮、去蒂→切片→浸渍调味→沥干→摆盘→微波脆化→冷却→装袋→检验→成品

(2) 慈姑脆片前处理:挑选、清洗、去皮、切片、沥水备用。以慈姑片 50 g、调味液按 70℃ 热水 200 mL 为基准,加入食用盐 5 g、白砂糖 45 g、食用味精 2.5 g 的量进行调配液调配,放入慈姑片调味,设置电磁炉 120 W 加热 10 min 后取出,沥水,备用。

1.3.2 厚度对即食慈姑片微波干燥特性的影响 在慈姑片铺料密度 0.20 g/cm²、微波功率密度 7.0 W/g,分别考察慈姑片厚度为 2,3,4 mm 时对慈姑片微波干燥特性的影响。干燥过程中,每加热 1 min 记录样品重量,样品干燥接近恒重为止^[12]。

1.3.3 铺料密度对即食慈姑片微波干燥特性的影响 在慈姑片厚度为 3 mm、微波功率密度 7.0 W/g,分别考察慈姑片铺料密度为 0.16,0.20,0.24 g/cm² 时对慈姑片微波干燥特性的影响。干燥过程中,每加热 1 min 记录样品重量,样品干燥接近恒重为止。

1.3.4 微波功率密度对即食慈姑片微波干燥特性的影响 在慈姑片厚度为 3 mm、铺料密度 0.20 g/cm²,分别考察慈姑片微波功率密度为 4.2,5.6,7.0,8.4,9.8 W/g 时对慈姑片微波干燥特性的影响。干燥过程中,每加热 1 min 记录样品重量,样品干燥接近恒重为止。

1.3.5 干基含水率测定 通过用 MX-50 型水分测定仪测定慈姑调味处理后湿基平均含水率,物料湿基初始含水率 $W_0 = (68.0 \pm 0.5)\%$ 。微波每加热一次结束,从分析天平读取慈姑片质量,根据式(1)计算干基含水率^[13]。

$$X_t = \frac{G_t - G}{G} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

X_t ——慈姑片干燥至 t 时刻的干基含水率,%;

G_t ——慈姑片干燥至 t 时刻的总质量,g;

G ——慈姑片绝干物料质量,g。

1.3.6 干燥速率的测定 干燥速率是指在一定的干燥条件下物料在单位时间内水分含量的变化,是研究干燥特性的一个重要参数,用来反映物料在干燥过程中脱水的快慢程度。干燥速率按(2)计算^[14-15]。

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中:

DR ——干燥速率,g/min;

Δt ——相邻 2 次测量的时间差,min;

$M_{t+\Delta t}$ —— $t + \Delta t$ 时刻慈姑片的干基含水量,g;

M_t —— t 时刻慈姑片的干基含水量,g。

1.3.7 水分比的测定 按式(3)计算^[16-17]。

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

式中:

MR ——水分比;

M_t ——干燥至 t 时刻样品的干基含水率,%;

M_0 ——样品初始干基含水率,%;

M_e ——样品平衡干基含水率,%。

由于 M_e 较 M_0 和 M_t 显得非常小,通常可以忽略不计,故可将式(3)简化成式(4)进行计算:

$$MR = \frac{M_t}{M_0}. \quad (4)$$

1.3.8 干燥模型拟合 物料干燥是一个非常复杂的传质传热过程,使用数学模型研究食品干燥特性以及预测和优化干燥工艺参数具有重要作用,建立干燥模型已成为干燥技术研究的重要内容。试验选了 6 种比较常用的干燥模型^[13,18]进行慈姑片微波干燥模型线性拟合,选用的 6 种干燥模型及其线性化处理表达式见表 1。

1.4 数据分析

试验数据采用 Origin 8.5 进行图表绘制,用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 对即食慈姑片微波干燥试验数据进行回归拟合。

2 结果与分析

2.1 即食慈姑片微波干燥特性

2.1.1 厚度对即食慈姑片微波干燥特性的影响 由图 1(a)

表 1 6 种干燥数学模型[†]
Table 1 Six drying mathematical models

模型名称	模型方程	线性化表达式
Newton	$MR = e^{-kt}$	$\ln MR = -kt$
Lagarithmic	$MR = ae^{-kt} + c$	$\ln(MR - c) = \ln a - kt$
Henderson and Pabis	$MR = ae^{-kt}$	$\ln MR = \ln a - kt$
Two term	$MR = A \exp(-r_0 t) + B \exp(-r_1 t)$	$MR = A \exp(-r_0 t) + B \exp(-r_1 t)$
Wangand Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	$MR = 1 + at + bt^2$
Page	$MR = (e^{-kt})^n$	$\ln(-\ln MR) = \ln k + n \ln t$

[†] t 为干燥时间,min; k 、 n 为待定干燥方程系数。

可知,铺料密度和功率密度恒定时,慈姑片干基含水率随干燥时间的延长持续下降,慈姑片厚度越小,干燥曲线越陡峭,所需干燥时间越短,厚度为 2,3,4 mm 时,干燥时间分别为 34,38,46 min。由图 1(b)可知,即食慈姑片微波干燥过程主要表现为加速、降速 2 个阶段,没有明显的恒速阶段。干燥速率是指单位时间内物料蒸发的水分质量。厚度为 2,3,4 mm 时,物料干燥速率最大值分别为 2.135,1.940,1.655 g/min,说明慈姑片厚度越小,越缩短了热量向物料表面传递和水分从物料中心向外扩散的距离,内部水分迁移阻力变小,传质与传热的速度加快^[19],

从而干燥速度也越快。在加速阶段,物料含水率较高,干燥速率加速较快;在降速阶段,物料热能吸收能力随含水率降低而减小,干燥速率明显下降。因此,干燥条件恒定情况下,可通过减小物料厚度提高物料干燥速率。

2.1.2 铺料密度对即食慈姑片微波干燥特性的影响 由图 2(a)可知,物料厚度和功率密度恒定时,随着物料铺料密度增大,物料含水率下降缓慢,干基含水率降至平衡耗时越长。物料装载量分别为 1.96,2.94,3.93 kg/m² 的干燥时间为 26,38,44 min。由图 2(b)可知,物料厚度和功率密度恒定,物料铺料密度最大为 0.24 g/cm² 时,干燥

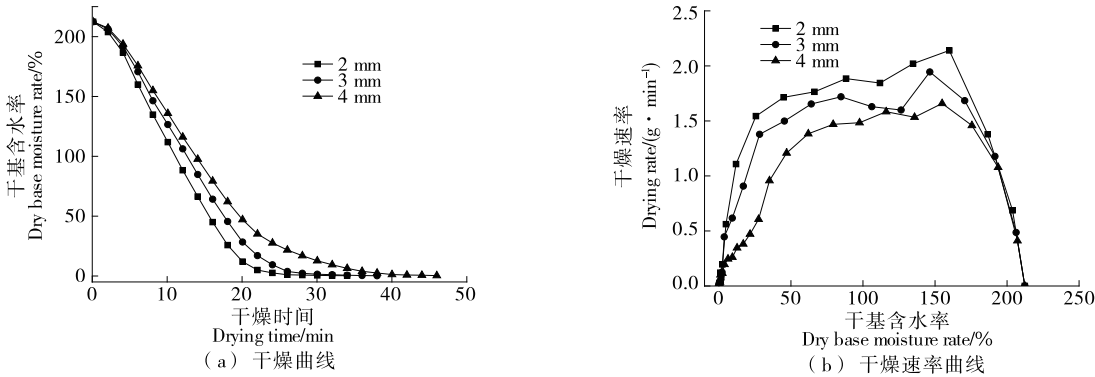


图 1 不同厚度下即食慈姑片微波干燥曲线及干燥速率曲线

Figure 1 Microwave drying curves and drying rate curves of instant arrowhead slices with different thickness

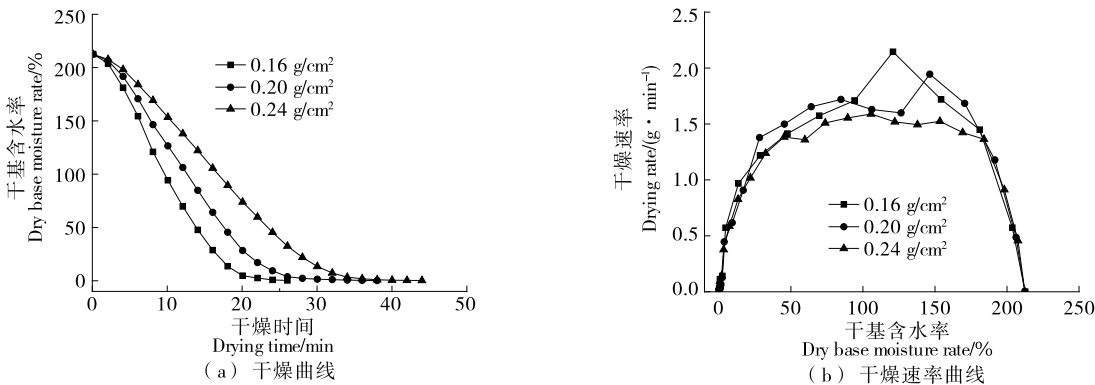


图 2 不同铺料密度下即食慈姑片微波干燥曲线及干燥速率曲线

Figure 2 Microwave drying curves and drying rate curves of instant arrowhead slices with different paving densities

曲线加速、恒速、降速各阶段均较明显,干燥速率变化越小,含水率降低越缓慢;而物料铺料密度较小时,如 0.16 g/cm^2 和 0.20 g/cm^2 ,干燥曲线加速和降速阶段的干燥速率变化越剧烈,含水率下降越快,但未显现恒速阶段。原因是在相同微波功率密度下,铺料密度越大,总含水量越大,单位时间内物料所吸收的微波能越小^[20],物料水分蒸发量越小,物料干燥速率越小,干燥时间越长。

2.1.3 微波功率密度对慈姑片微波干燥特性的影响 由图 3(a)可知,在物料厚度和铺料密度恒定下,微波功率密度越大,干燥曲线越陡峭,干基含水率降至平衡所经历的时间越短,微波功率密度为 9.8, 8.4, 7.0, 5.6, 4.2 W/g 时,干燥时间分别为 26, 30, 38, 48, 62 min,原因是微波干燥中物料实际吸收的能量是按单位质量物料吸收的微波能(即能量密度)计算的^[21],铺料密度恒定,微波能量密度越大,微波能耗越大,单位时间内迁移的水分越大。由图 3(b)可知,当微波功率密度较大,为 5.6~9.8 W/g 时,干燥速率曲线只存在加速和降速两个阶段;当功率密度较小,为 4.2 W/g 时,干燥速率曲线存在加速、恒速、降速阶段。慈姑片微波干燥过程呈现出加速、恒速和降速 3 个阶段,功率密度比较小,干燥速度曲线存在恒速阶段。在

恒定的干燥条件下,微波功率密度越大,物料吸收的能量密度越大,物料水分迁移动力和蒸发量增加使干燥速率增大,缩短干燥时间;加速阶段主要表现在干燥初期,物料流动水多,自由度低,含水率较大,物料吸收微波能后较容易迁移排出^[22],物料干燥速率加速迅速;恒速阶段和降速阶段,物料含水率慢慢变小,物料流动水较少,水分被物料组织紧密锁住,物料干燥速率也逐渐减少。但是,微波干燥功率密度过高会造成慈姑片焦化使其品质下降。因此,通过增加微波功率密度来提高物料干燥速率需要根据实际生产来设计参数。

2.2 即食慈姑片微波干燥动力学

2.2.1 即食慈姑片微波干燥动力学模型的选择 干燥模型的正确选择对研究干燥工艺参数和预测干燥质量具有极其重要作用^[23]。Newton、Henderson and Pabis 和 Lagarithmic 3 种模型的 $-\ln MR - t$ 均为线性关系,Two term 和 Wang and Singh 干燥模型的 $MR - t$ 均为线性关系,Page 模型的 $\ln(-\ln MR) - \ln t$ 线性关系,根据物料干燥过程水分比的变化验证这 6 种模型在即食慈姑片干燥过程的相关性,绘制不同厚度、铺料密度和功率密度下 $-\ln MR - t$ 、 $MR - t$ 和 $\ln(-\ln MR) - \ln t$ 关系图,见图 4~12。

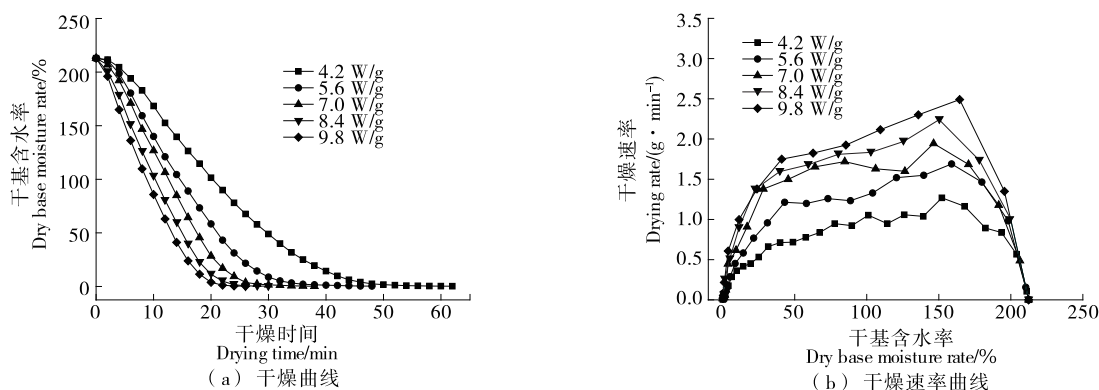


图 3 不同微波功率密度下即食慈姑片微波干燥曲线及干燥速率曲线

Figure 3 Microwave drying curves and drying rate curves of instant arrowhead slices under different microwave power density

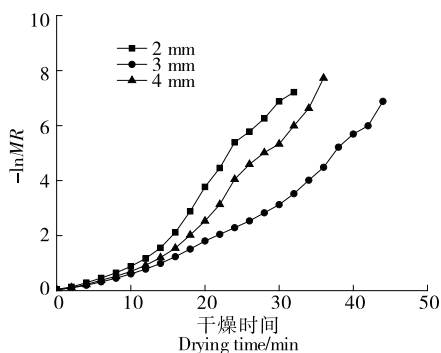


图 4 不同厚度条件下 $-\ln MR - t$ 关系

Figure 4 $-\ln MR - t$ relationship under different thickness conditions

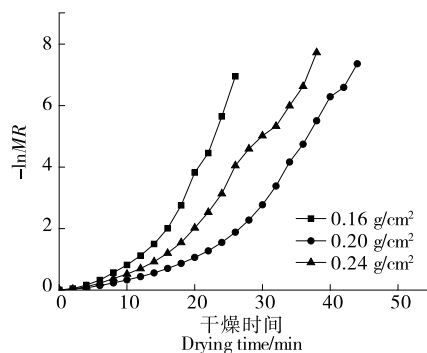


图 5 不同铺料密度条件下 $-\ln MR - t$ 关系

Figure 5 $-\ln MR - t$ relationship under different paving density

由图4~6可知,相关变量下,即食慈姑片微波干燥过程 $-\ln MR-t$ 是非线性关系,说明 Newton、Henderson and Pabis 和 Lagarithmic 模型不符合即食慈姑片干燥动力学模型的选择要求。

由图7~9可知,相关变量下慈姑片微波干燥过程 $MR-t$ 的二次曲线是非线性关系,说明 Two term 和 Wang and Singh 模型不符合即食慈姑片干燥动力学模型的选择要求。

由图10~12可知,相关变量下即食慈姑片微波干燥过程的 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ 是线性关系,说明Page模型可

以描述即食慈姑片微波干燥的过程,故选 $MR = e^{-kt^n}$ 作为即食慈姑片微波干燥动力学模型。

采用Page模型 $\ln(-\ln MR) = \ln k + n \ln t$ 建立即食慈姑片微波干燥动力学模型:

$$\ln k = a + bH + cL + dP, \quad (5)$$

$$n = e + fH + gL + hP, \quad (6)$$

式中:

H ——厚度, mm;

L ——铺料密度, g/cm²;

P ——微波密度, W/g;

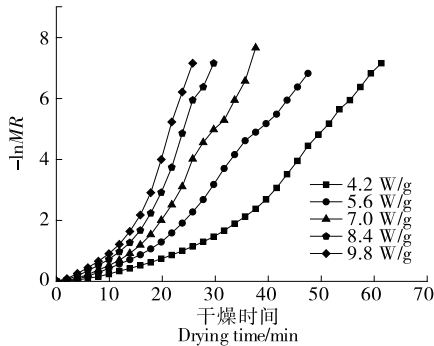


图6 不同微波功率密度条件下 $-\ln MR-t$ 关系
Figure 6 $-\ln MR-t$ relationship under different microwave power density

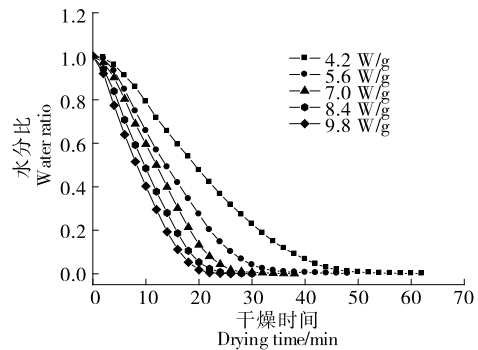


图9 不同微波密度下 $MR-t$ 关系图
Figure 9 $MR-t$ relationship under different microwave densities

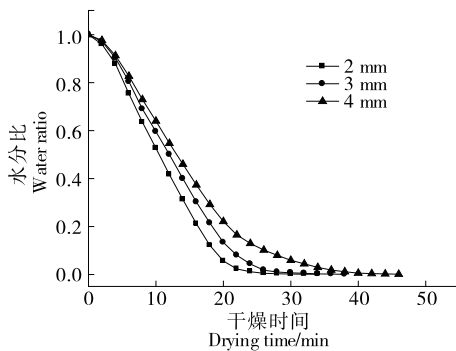


图7 不同厚度下 $MR-t$ 关系图
Figure 7 $MR-t$ diagram with different thickness

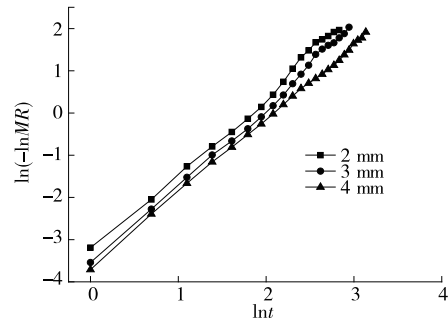


图10 不同厚度条件下 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ 曲线
Figure 10 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ curves with different thicknesses

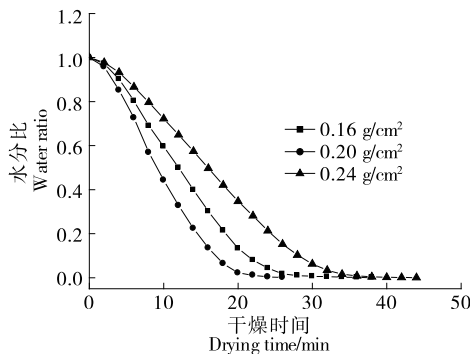


图8 不同铺料密度下 $MR-t$ 关系图
Figure 8 $MR-t$ relationship under different paving density

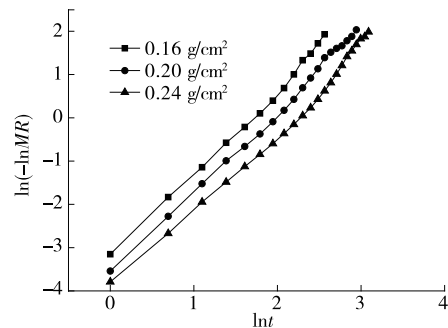


图11 不同铺料密度条件下 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ 曲线
Figure 11 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ curves under different paving densities

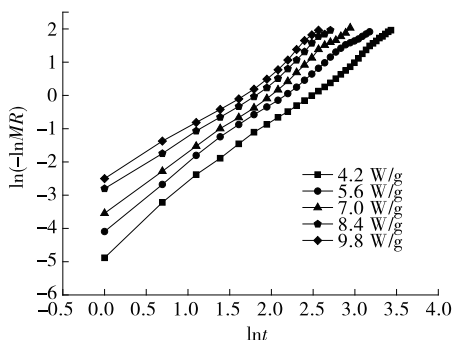


图 12 不同微波功率密度条件下 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ 曲线
Figure 12 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ curves under different microwave power densities

a, b, c, d, e, f, g, h ——待定系数。

将 $\ln k = a + bH + cL + dP, n = e + fH + gL + hP$ 代入 $\ln(-\ln MR) = \ln k + n \ln t$, 可得到:

$$\ln(-\ln MR) = a + bH + cL + dP + (e + fH + gL + hP) \ln t. \quad (7)$$

对试验数据进行多元线性回归,求得方程线性拟合待定系数 $a = -4.866\ 57, b = -0.060\ 97, c = -0.045\ 56, d = 0.006\ 81, e = 2.227\ 89, f = -0.086\ 77, g = -0.000\ 14, h = -0.000\ 21$ 。拟合方程为 $\ln(-\ln MR) = -4.866\ 57 - 0.060\ 97H - 0.045\ 56L + 0.006\ 81P + (2.227\ 89 - 0.086\ 77H - 0.000\ 14L - 0.000\ 21P) \ln t$ 即:

$$MR = e^{-kt^n}, \quad (8)$$

式中:

$$k = e^{-4.866\ 57 - 0.060\ 97H - 0.045\ 56L + 0.006\ 81P};$$

$$n = 2.227\ 89 - 0.086\ 77H - 0.000\ 14L - 0.000\ 21P.$$

该拟合方程 $F = 3\ 136.907\ 03, P < 0.000\ 1$, 表明所求得的回归方程显著;回归方程的决定系数 $R^2 = 0.990\ 66$, 说明模型的拟合度良好,试验误差较小。

2.2.2 动力学模型验证 为检验动力学模型的准确性,设定试验条件为慈姑片厚度 3 mm,铺料密度 $0.20\ \text{g}/\text{cm}^2$,微波功率密度 $7.0\ \text{W}/\text{g}$ 进行验证。由图 13 可知,Page 模型预测值与试验值拟合度较好,说明 Page 模型能够较好反映和预测即食慈姑微波干燥过程中的水分变化情况。

3 结论

试验表明,即食慈姑片微波干燥过程呈现出加速、恒速和降速 3 个阶段,物料厚度越大、铺料密度越大,干燥速率变化越小,含水率降低越缓慢,干燥耗时越长;微波功率密度越大,干燥速率越大,含水率下降越快,加速、恒速、降速阶段干燥时间越短。通过 6 种干燥模型拟合分析,发现慈姑片微波干燥动力学模型满足 Page 模型: $MR = e^{-kt^n}$, 其中 $k = e^{-4.866\ 57 - 0.060\ 97H - 0.045\ 56L + 0.006\ 81P}, n = 2.227\ 89 - 0.086\ 77H - 0.000\ 14L - 0.000\ 21P$, 该模型能够较准确地表征和预测即食慈姑片微波干燥过程的水分

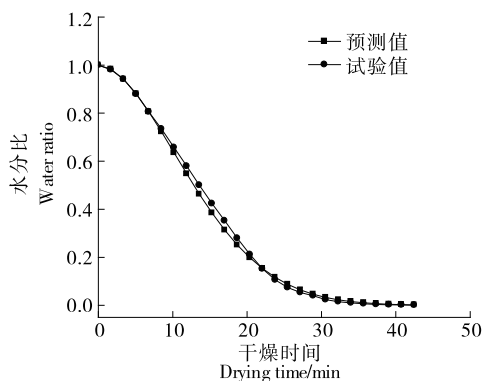


图 13 即食慈姑片微波干燥的动力学模型检验曲线
Figure 13 Kinetic model test curve of instant Arrowhead tablet during microwave drying

变化规律,描述预测干燥过程某时刻慈姑片水分比的含量。试验在研究微波功率密度对即食慈姑片微波干燥特性的影响时,仅做了单一微波功率密度,并未考虑不同大小组合的、多段式的微波功率密度的影响。后续可寻求一种以计算机算法来达到优化多微波功率密度组合的微波干燥加工即食慈姑片工艺的数值模拟模型,以更好地为即食慈姑片微波干燥参数的优化及实际干燥工艺提供参考。

参考文献

- [1] 林晓彤,何潮安,李育军,等. 华南地区慈姑的栽培与应用[J]. 长江蔬菜, 2019(20): 35-37.
- [2] 钟艳,戴得蓉,何江红,等. 慈菇渣粉面包制备工艺及其配方研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(7): 75-78.
- [3] 戴得蓉,乔明锋,何江红,等. 慈姑全粉对曲奇饼干品质影响及配方研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 130-136.
- [4] 杨雪帆,吴小南,陈洁,等. 慈菇多糖对 S180 荷瘤小鼠的抑瘤作用[J]. 海峡预防医学杂志, 2020, 26(2): 37-39.
- [5] 石瑶,杨亚玲,李晚谊,等. 双水相萃取丽江山慈菇中的秋水仙碱[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24(10): 1412-1416.
- [6] 赵力超,曹素芳,刘欣,等. 慈菇、荸荠和菱角淀粉共混物的凝胶特性研究[J]. 现代食品科技, 2014(2): 17-22.
- [7] 陈梦,段玉清,罗孝平,等. 慈姑粉的喷雾干燥工艺优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 136-140.
- [8] 陈旭. 慈姑的采收贮藏保鲜及慈姑饼干的开发[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014: 19-24.
- [9] 陈梦,段玉清,罗孝平,等. 慈姑粉的喷雾干燥工艺优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 136-140.
- [10] 苏晓琳. 树莓脆片微波膨化机理与工艺研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 4-5.
- [11] 刘晗. 黑加仑整果微波辅助脱水及膨化工艺[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 4.
- [12] 田华,韩艳婷. 苦瓜微波干燥特性及动力学模型[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(23): 125-129.

(下转第 227 页)

- sidase: A review[J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45(8): 1 226-1 235.
- [79] LEE J H, HWANG C E, SON K S, et al. Comparisons of nutritional constituents in soybeans during solid state fermentation times and screening for their glucosidase enzymes and antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 362-371.
- [80] HUYNH N T, SMAGGHE G, GONZALES G B, et al. Bioconversion of Kaempferol and Quercetin glucosides from plant sources using *Rhizopus spp*[J]. *Fermentation*, 2018 (4): 102.
- [81] 邓小云, 丁登峰, 戴美红, 等. 植物多糖药理作用研究进展[J]. *中医药导报*, 2006, 12(9): 86-88.
- [82] 黄依佳, 吴剑荣, 朱莉, 等. 蓝藻多糖的分离、结构表征及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(2): 176-180.
- [83] 王园, 史俊祥, 段云霄, 等. 麸皮多糖微生物发酵工艺优化及其抗炎活性[J]. *食品科学*, 2018, 39(14): 192-198.
- [84] 张海芸, 贺亮, 李琴, 等. 降解对植物多糖理化性质以及生物活性影响的研究[J]. *食品与发酵科技*, 2019(3): 15-19.
- [85] 叶水英. 色素植物与植物色素的应用探析[J]. *现代农业科技*, 2018(14): 236-238.
- [86] BUZZINI P. Batch and fed-batch carotenoid production by *Rhodotorula glutinis*-*Debaryomyces castellii* co-cultures in corn syrup[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, 90 (5): 843-847.
- [87] MIURA Y, KONDO K, SAITO T, et al. Production of the carotenoids lycopene, β -carotene, and astaxanthin in the food yeast *Candida utilis* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(4): 1 226-1 229.
- [88] NASSERI A T, RASOUL-AMINI S, MOROWVAT M H, et al. Single cell protein: Production and process[J]. *American Journal of Food Technology*, 2011, 6(2): 103-116.
- [89] 钟瑾, 刘一达, 肖愈. 辣椒籽中生物活性成分及其功能活性研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 231-236.
- [90] KHAN M, KHAN S S, AHMED Z, et al. Production of single cell protein from *Saccharomyces cerevisiae* by utilizing fruit wastes[J]. *Nanobiotechnica Universale*, 2010 (2): 127-132.
- [91] DESGRANGES C, VERGOIGNAN C, LEREEC A, et al. Use of solid state fermentation to produce *Beauveria bassiana* for the biological control of European corn borer[J]. *Biotechnology Advances*, 1993, 11(3): 577-587.

(上接第 182 页)

- [13] 刘艳, 段振华, 唐小闲, 等. 大果山楂片热风干燥特性及其动力学模型[J]. *食品工业*, 2017, 38(3): 82-87.
- [14] 宋树杰, 张舒晴, 姚谦卓, 等. 熟化甘薯片微波干燥特性及其动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(3): 199-205.
- [15] 刘兵, 李川, 段振华, 等. 罗非鱼片渗透-真空微波干燥特性及动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 30-35.
- [16] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 150-155.
- [17] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空-蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 206-210, 216.
- [18] 盘喻颜, 段振华, 刘艳, 等. 火龙果片微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 195-201.
- [19] 刘旺星, 陈雄飞, 余佳佳, 等. 胡萝卜微波干燥特性及动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(9): 68-72, 77.
- [20] 李婧怡, 段振华, 刘怡彤, 黄秋葵真空微波干燥特性及其动力学研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(22): 285-289.
- [21] 安可婧, 徐玉娟, 魏来, 等. 龙眼间歇真空微波干燥动力学研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(9): 30-36.
- [22] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 116-123.
- [23] 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.

(上接第 189 页)

- [29] LYKOMITROS D, DEN BOER L, HAMOEN R, et al. A comprehensive look at the effect of processing on peanut (*Arachis spp.*) texture[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(10): 3 962-3 972.
- [30] LING Bo, OU-YANG Shao-hui, WANG Shao-jin. Radio-frequency treatment for stabilization of wheat germ: Storage stability and physicochemical properties[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 158-165.

(上接第 218 页)

- [40] 刘雪梅, 陈文学, 杨铭, 等. 人参糖肽结合耐力运动对高脂血症大鼠血脂和抗氧化功能的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(17): 255-259.
- [41] 田建明, 韦康, 陈英红, 等. 人参糖肽对大鼠的抗炎和镇痛作用[J]. *中国新药杂志*, 2018, 27(14): 1 658-1 662.
- [42] 狄良娇. 人参糖肽对 A β 25-35 诱导的认知障碍大鼠抗炎与抗凋亡机制研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015: 1-3.
- [43] LI Cai, LI Xiang-jun, MIAO Chun-sheng, et al. Ameliorative effect of ginseng glycopeptide on cross-linking of rat tail tendon collagen[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2005, 30(7): 544-547.