

张钟元,李丽娟,李大婧,等. 莲藕片薄层真空微波干燥特性及动力学模型[J]. 江苏农业科学,2019,47(2):201-205.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.02.051

莲藕片薄层真空微波干燥特性及动力学模型

张钟元¹,李丽娟¹,李大婧^{1,2},刘春泉¹,江宁¹,聂梅梅^{1,2},王晓燕^{1,2}

(1.江苏省农业科学院农产品加工研究所,江苏南京 210014; 2.南京农业大学食品科技学院,江苏南京 210095)

摘要:为研究莲藕片真空微波干燥特性,探讨不同真空度、装载量和微波功率对莲藕片薄层真空微波干燥过程的影响。根据试验数据建立莲藕片薄层真空微波干燥水分比与干燥时间关系的动力学模型,并对模型进行拟合试验,最后计算莲藕片薄层真空微波干燥条件下的有效扩散系数。结果表明,莲藕片薄层真空微波干燥过程符合 Page 模型,经验证,模型预测值与试验值拟合良好;莲藕片薄层真空微波干燥有效扩散系数在 $0.508 \times 10^{-6} \sim 6.556 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内。Page 模型适合描述莲藕片薄层真空微波干燥过程。

关键词:莲藕片;薄层干燥特性;动力学模型;真空微波;干燥工艺;生产控制

中图分类号: TS255.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)02-0201-05

莲藕 (*Nelumbo nucifera* Gaertn), 别称荷藕、莲菜等,为睡莲科莲属多年生大型宿根水生草本植物^[1],原产于中国和印度,历史悠久,种质资源丰富,以肥嫩根状茎供食用,是我国重要的水生蔬菜。莲藕含有淀粉、膳食纤维、氨基酸、维生素等多种营养成分,营养丰富,同时又含有少量生物碱、黄酮类物质、鞣质等功能性成分,具有清热凉血、生津止渴、健脾开胃等药用价值,广受消费者喜爱^[2-3]。莲藕采收后,易氧化褐变、失水干缩以及腐烂变质,不耐贮运,而干制可有效延长其贮藏期限,且便于运输。

真空微波干燥技术把微波和真空 2 项干燥方法有效地结合起来,使二者充分发挥各自优势,具有干燥速度快、干燥时间短等优点^[4],且能较好地保留干制品的营养风味物质^[5]。在果蔬干燥方面,黄姬俊等研究了香菇微波真空干燥特性及其动力学^[6];刘春泉等研究了杏鲍菇真空微波干燥特性及动力学模型^[7];朱德泉等对菠萝片微波真空干燥特性进行了研究^[8];魏巍等以绿茶为原料,研究其微波真空薄层干燥特性,并建立干燥动力学模型^[9];Figiel 研究了蒜瓣的真空微波干燥特性^[10];Bal 等建立了竹笋微波干燥动力学模型,并进一步得到其有效扩散系数^[11];Özbek 等对薄荷叶微波干燥特性进行分析,建立了动力学模型,并分别计算了不同干燥条件下的有效扩散系数^[12]。值得一提的是,薄层干燥是常见的片状果蔬干燥方式,目前已有关于胡萝卜^[13]、萝卜丝^[14]、木瓜^[15]薄层干燥动力学方面的研究报道,但关于莲藕薄层真空微波干燥特性的研究尚未见报道。

本试验研究真空微波干燥对莲藕片干燥特性的影响,并建立莲藕片薄层真空微波干燥动力学模型,用以描述莲藕片在薄层真空微波干燥过程中的水分变化,以期对莲藕真空微

波干燥工艺的研究和生产控制提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为“美人红”莲藕,由江苏省扬州市宝应县天禾食品有限公司特供。全部试验于 2016—2017 年在江苏省农业科学院农产品加工研究所完成。挑选肉质肥嫩,色泽洁白,无明显机械伤的莲藕作为试验原料。

1.2 仪器与设备

MVD-1 型微波真空干燥设备(南京孝马机电设备厂);FA2104 电子分析天平[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理 将莲藕洗净、去皮后,用不锈钢刀切分成厚度为 5~6 mm 的薄片,立即浸于由 0.2% 柠檬酸和 1% 氯化钠组成的护色剂中护色,0.5 h 后取出,于沸水中烫漂 3 min,流动水冷却至常温后,置于 2% 的麦芽糊精溶液中浸渍 1 h,取出沥干,置于 -18 ℃ 左右的冰箱中,冻藏备用。

1.3.2 真空微波干燥 将莲藕片解冻,按不同装载量(50、100、200 g)放入真空微波设备的物料盘中均匀铺开为薄层,启动真空泵,将真空度调至 -40、-60、-80 kPa,分别在微波功率为 800、1 200、1 600 W/g 的条件下进行微波干燥,每隔 1 min 测定 1 次水分含量并换算为干基含水率,直到干基含水率 ≤ 13% 为止。

1.3.2.1 不同真空度对莲藕片真空微波干燥特性的影响 将 100 g 解冻莲藕片放入真空微波设备的物料盘中均匀铺开为薄层,启动真空泵,将真空度调至 -40、-60、-80 kPa,在微波功率为 1 200 W/g 的条件下进行微波干燥,每隔 1 min 测定 1 次水分含量并换算为干基含水率,直到干基含水率 ≤ 13% 为止。

1.3.2.2 不同装载量对莲藕片真空微波干燥特性的影响 将莲藕片解冻,按不同装载量(50、100、200 g)放入真空微波设备的物料盘中均匀铺开为薄层,启动真空泵,将真空度调至 -80 kPa,在微波功率为 1 200 W/g 的条件下进行微波干燥,

收稿日期:2017-09-01

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0400901)。

作者简介:张钟元(1983—),女,辽宁丹东人,博士,副研究员,主要从事果蔬加工与综合利用方面的研究。Tel:(025)84391570;E-mail:zzsyz2012@163.com。

通信作者:李大婧,博士,研究员,研究方向为农产品加工与综合利用。Tel:(025)84391255;E-mail:lidajing@163.com。

每隔1 min测定1次水分含量并换算为干基含水率,直到干基含水率 $\leq 13\%$ 为止。

1.3.2.3 不同微波功率对莲藕片真空微波干燥特性的影响

将100 g解冻莲藕片放入真空微波设备的物料盘中均匀铺开为薄层,启动真空泵,将真空度调至 -80 kPa,在微波功率

为800、1 200、1 600 W/g的条件下进行微波干燥,每隔1 min测定1次水分含量并换算为干基含水率,直到干基含水率 $\leq 13\%$ 为止。

1.4 薄层干燥数学模型

果蔬干燥常用的薄层干燥数学模型如表1所示。

表1 应用于干燥曲线的薄层干燥数学模型

模型名称	方程表达式	线型表达式
指数模型	$MR = \exp(-kt)$	$\ln(MR) = -kt$
单项扩散模型	$MR = A \exp(-kt)$	$\ln(MR) = \ln A - kt$
Page方程	$MR = \exp(-kt^N)$	$\ln[-\ln(MR)] = \ln k + N \ln t$

注:水分比 $MR = (M_t - M_e)/(M_0 - M_e)$; t 为干燥时间, min; M_t 为 t 时刻物料含水率(干基), %; M_e 为平衡含水率(干基), %; M_0 为初始含水率(干基), %; A 、 k 、 N 为待定系数。

由于关于平衡含水率 M_e 的资料很少,且其相对于 M_t 和 M_0 较小,因此将上述水分比 MR 简化为 $MR = M_t/M_0$ 。

1.5 试验指标计算

1.5.1 水分含量 根据GB 5009.3—2010《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[16],通过定时取样、迅速称质量后烘干测定各时期水分含量,并计算湿基、干基含水率。

$$\text{湿基含水率} = (m_t - m_s)/m_t \times 100\%; \quad (1)$$

$$\text{干基含水率} = (m_t - m_s)/m_s \times 100\%。 \quad (2)$$

式中: m_t 为 t 时刻物料的对质量, g; m_s 为绝干物料质量, g。

1.5.2 干燥速率

$$\text{干燥速率} = \Delta M / \Delta t。 \quad (3)$$

式中: ΔM 为失水质量, g; Δt 为相邻2次测量的时间间隔, min。

1.5.3 有效扩散系数 扩散系数反映物料在一定干燥条件下的脱水能力,由于降速干燥过程受内部扩散的控制,因此物料的内部水分扩散系数是果蔬干燥过程数学模型中的主要参数。Fick扩散方程经常被用来描述生物产品降速干燥阶段的干燥特性。本试验采用公式(3)、公式(4)计算莲藕片的有效扩散系数。

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}; \quad (4)$$

$$\text{斜率} = -\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2}。 \quad (5)$$

式中: D_{eff} 是有效扩散系数, m^2/s ; L 是物料层厚度的1/2, m。

1.6 统计分析

采用SPSS 20.0分析软件对表1中各干燥方程的参数进行线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 莲藕片薄层真空微波干燥特性分析

2.1.1 真空度对莲藕片真空微波干燥特性的影响 由图1可知,真空微波干燥莲藕片时,在微波功率为1 200 W、装载量为100 g的条件下,真空度越高,达到目标含水率所需时间越短。当真空度为 -40 、 -60 、 -80 kPa时,莲藕片干基含水率降至13%以下所需干燥时间分别为27、20、14 min。可能原因是真空度越高,水的沸点越低,汽化所需时间越短,蒸发速率越快^[17]。

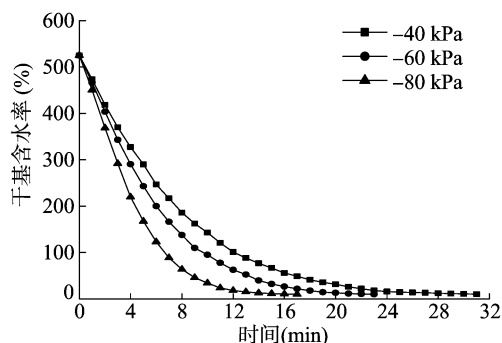


图1 不同真空度下莲藕片的真空微波干燥曲线

由图2可知,在微波功率为1 200 W、装载量为100 g的条件下,真空度为 -40 、 -60 、 -80 kPa时,莲藕片的真空微波干燥过程均整体分为加速干燥、恒速干燥和降速干燥3个阶段。在加速干燥阶段和恒速干燥阶段,3条干燥速率曲线均区分明显,且真空度越高,相同干基含水率所对应的干燥速率越大,真空度为 -80 kPa时的干燥速率优势最为明显,可能是由于在其他条件相同的情况下,真空度越高,腔体内温度达到水沸点的耗时越短,进而使真空度的优势得以体现。这与魏巍等通过分析不同真空度下绿茶真空微波干燥特性所得结论^[9]一致。

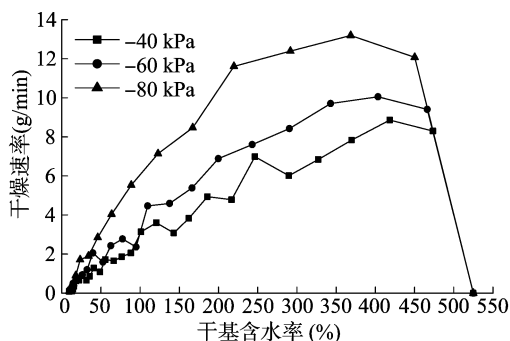


图2 不同真空度下莲藕片的真空微波干燥速率曲线

2.1.2 装载量对莲藕片真空微波干燥特性的影响 由图3可知,设定真空度为 -80 kPa、微波功率为1 200 W时,装载量越小,干燥曲线越陡峭,达到目标含水率所需干燥时间越短。装载量为50、100、200 g时,莲藕片干基含水率降至13%以下所对应的干燥时间分别为11、14、20 min。主要是因为真空度、微波功率一定的条件下,装载量越大,单位质量水分

所吸收的微波能越少,汽化时间越长,蒸发速率越低,导致干燥时间相应延长^[18]。

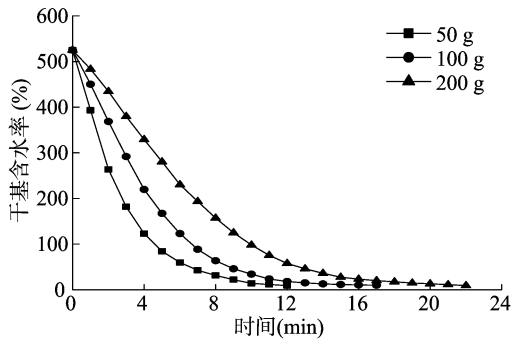


图3 不同装载量下莲藕片的真空微波干燥曲线

由图4可知,在真空度为 -80 kPa ,微波功率为 $1\ 200\text{ W}$ 的条件下,装载量为 50 、 100 、 200 g 时,莲藕片的干燥过程均整体分为升速干燥阶段、恒速干燥阶段和降速干燥阶段。装载量越小,恒速干燥阶段持续时间越短。在整个干燥过程中,随着装载量的增大,相同干基含水率所对应的干燥速率加快。

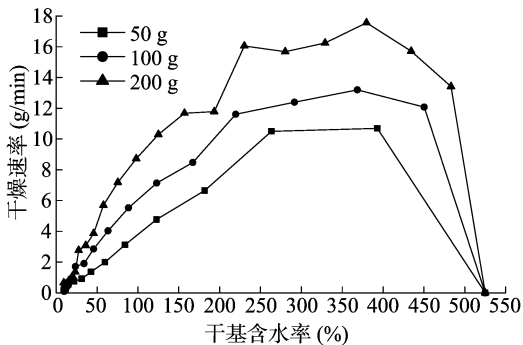


图4 不同装载量下莲藕片的真空微波干燥速率曲线

2.1.3 微波功率对莲藕片真空微波干燥特性的影响 由图5可知,在真空度为 -80 kPa ,装载量为 100 g 的条件下,微波功率为 800 、 $1\ 200$ 、 $1\ 600\text{ W}$ 时,莲藕片干基含水率降至 13% 以下所需时间分别为 24 、 14 、 8 min ,说明随着微波功率的降低,达到目标含水率所需干燥时间相应延长,干燥曲线也趋于平缓。可能是由于微波功率越低,所提供的微波能越低,物料中的水分汽化时间延长,蒸发速率降低。

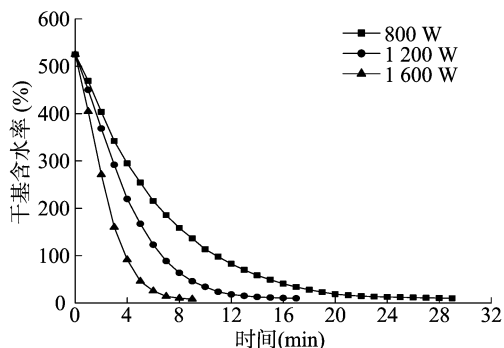


图5 不同微波功率下莲藕片的真空微波干燥曲线

由图6可以看出,在真空度为 -80 kPa ,装载量为 100 g 的条件下,当微波功率为 800 、 $1\ 200\text{ W}$ 时,莲藕片的真空微波干燥过程整体分为升速干燥、恒速干燥和降速干燥3个阶段,而当微波功率达到 $1\ 600\text{ W}$ 时,莲藕片的干燥过程不经恒速

干燥阶段直接进入降速干燥阶段。整个干燥过程中,微波功率越大,相同干基含水率所对应的干燥速率越高。

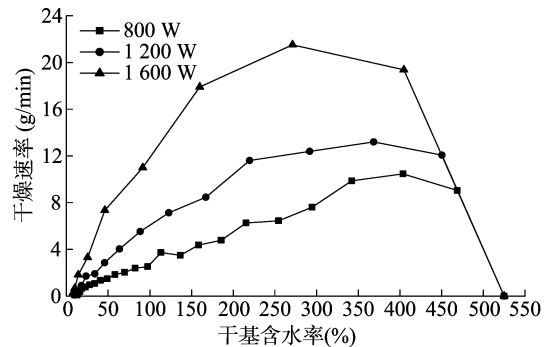


图6 不同微波功率下莲藕片的真空微波干燥速率曲线

2.2 莲藕片薄层真空微波干燥动力学

2.2.1 莲藕片真空微波干燥模型选择 根据干燥特性试验数据,分别绘制不同真空度、装载量和微波功率下的 $-\ln(MR) - t$ 曲线和 $\ln[-\ln(MR)] - \ln t$ 曲线(图7至图12)。从图7、图9、图11可以看出, $-\ln(MR)$ 与 t 呈非线性相关关系,从图8、图10、图12可以看出, $\ln[-\ln(MR)]$ 与 $\ln t$ 呈线性相关关系,表明莲藕片的真空微波干燥动力学模型满足Page方程,因此可以选择Page模型作为莲藕片真空微波干燥的动力学模型。

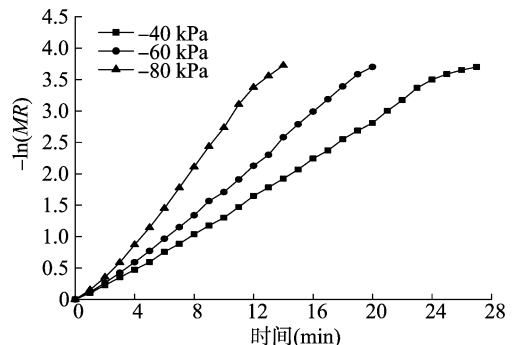


图7 不同真空度下的 $-\ln(MR)-t$ 关系曲线

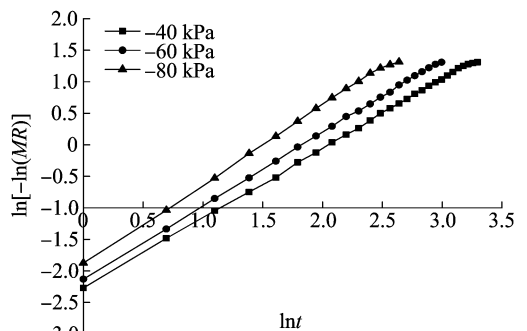


图8 不同真空度下的 $\ln[-\ln(MR)]-\ln t$ 关系曲线

2.2.2 莲藕片薄层真空微波干燥方程拟合 采用SPSS 20.0分析软件对不同真空度、装载量和微波功率下对应的 $\ln[-\ln(MR)]$ 与 $\ln t$ 值进行一元线性回归分析,得出干燥常数 $\ln k$ 和 N 值,并发现相关系数(R)均大于 0.95 ,表明方程与实际操作参数拟合度良好。令:

$$\ln k = g + hX_1 + iX_2 + jX_3; \quad (6)$$

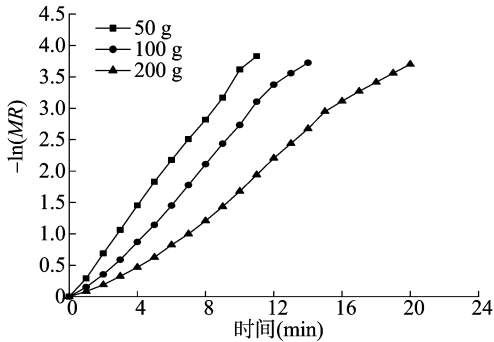
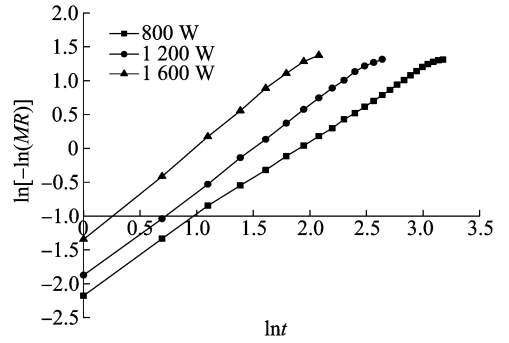
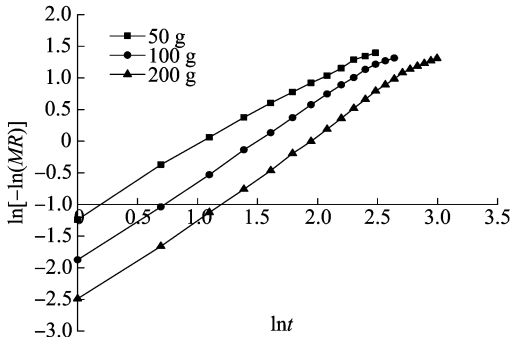
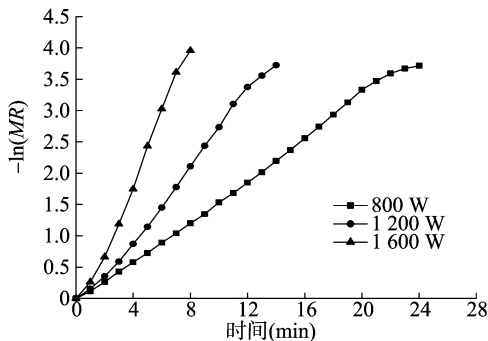
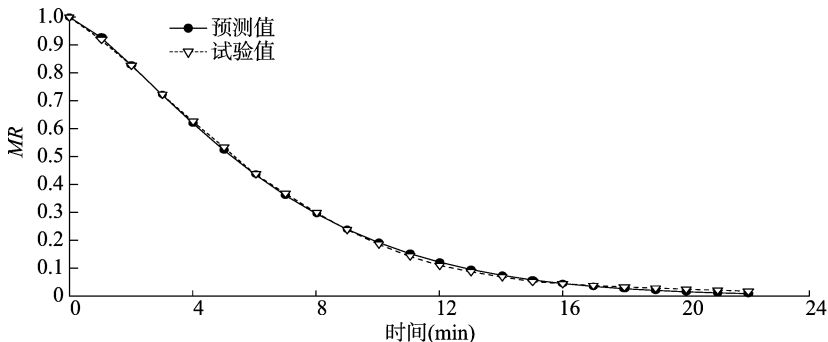
图9 不同装载量下的 $-\ln(MR)-t$ 关系曲线图12 不同微波功率下的 $\ln[-\ln(MR)]-\ln t$ 关系曲线图10 不同装载量下的 $\ln[-\ln(MR)]-\ln t$ 关系曲线图11 不同微波功率下的 $-\ln(MR)-t$ 关系曲线

图13 相同条件下真空微波干燥试验值与预测值的比较

2.2.4 莲藕片薄层真空微波干燥条件下的有效扩散系数
在不同真空微波干燥条件下所得的 $-\ln(MR)-t$ 关系图中,采用 Excel 软件对干燥曲线添加线性趋势线,从趋势线方程读出其斜率。由公式(5)即可求出不同干燥条件下莲藕片的有效扩散系数(表2)。

由表2可以看出,在真空微波干燥条件下莲藕片的有效扩散系数在 $0.508 \times 10^{-6} \sim 6.556 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内。真空

$$N = l + mX_1 + nX_2 + oX_3 \quad (7)$$

式中: X_1 为真空度, kPa; X_2 为装载量, g; X_3 为微波功率, W;
 g, h, i, j, l, m, n, o 为待定系数。

利用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行多元线性回归拟合,求得方程各待定系数,得到 $\ln k$ 和 N 的回归方程,为

$$\ln k = -3.191 + 0.0149X_1 - 0.00887X_2 + 0.000973X_3; \quad (8)$$

$$N = 0.495 + 0.00230X_1 + 0.00151X_2 + 0.000306X_3. \quad (9)$$

2方程的 P 值分别为0.012和0.049,均小于0.05,因此可认为, $\ln k, N$ 与变量真空度、装载量及微波功率的线性关系成立。因此,莲藕片真空微波干燥方程为

$$MR = \exp(-kt^N). \quad (10)$$

式中: $k = \exp(-3.191 + 0.0149X_1 - 0.00887X_2 + 0.000973X_3)$; $N = 0.495 + 0.00230X_1 + 0.00151X_2 + 0.000306X_3$ 。

2.2.3 莲藕片薄层真空微波干燥模型方程的验证 选取试验中的1组数据验证莲藕片真空微波干燥动力学模型的准确性。试验条件为真空度 -80 kPa ,装载量 200 g ,微波功率 1200 W 。由图13可知,Page模型的预测曲线与试验曲线基本拟合,表明Page方程能较准确地反映莲藕片真空微波干燥过程中水分的变化规律。

微波干燥条件下莲藕片的有效扩散系数随着真空度和单位质量微波功率的增加而增大,随着装载量的增加而降低。当装载量和微波功率相同时,真空度为 -80 kPa 时,有效扩散系数最大,最高可达真空度为 -40 kPa 的2.9倍,充分体现了真空干燥的优势。

Sharma等分别采用不同的微波功率与不同热风风速、温度同时组合干燥蒜片,得到蒜片的 D_{eff} 值在 $1.29 \times 10^{-10} \sim$

$31.68 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内,且随微波功率的增大而升高^[19]; Evin 研究了薊的薄层微波干燥特性,并得到其微波功率为 90~800 W 时,有效扩散系数为 $5.5 \times 10^{-8} \sim 3.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,且随微波功率的增加而增大^[20];胡庆国在不同的真空度和单位质量微波功率条件下真空微波干燥毛豆,分析得出,有效扩散系数在 $1.306 \times 10^{-9} \sim 4.573 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内,且随真空度和单位质量微波功率的增加而增大^[21],与本试验结论一致。本试验中莲藕片的 D_{eff} 值远大于上述研究,可能是由于蒜片和薊是在常压下进行微波干燥,而毛豆虽然在真空状态下进行微波干燥,但其组织结构致密,且单位质量微波功率低于本试验,因此内部水分扩散较慢。

表 2 真空微波干燥条件下莲藕片有效扩散系数数值的比较

真空度 (kPa)	装载量 (g)	微波功率 (W)	D_{eff} ($\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
-40	50	800	0.720
-40	50	1 200	1.717
-40	50	1 600	3.407
-40	100	800	0.630
-40	100	1 200	1.477
-40	100	1 600	2.746
-40	200	800	0.508
-40	200	1 200	1.065
-40	200	1 600	1.939
-60	50	800	1.204
-60	50	1 200	2.602
-60	50	1 600	4.865
-60	100	800	1.019
-60	100	1 200	1.960
-60	100	1 600	3.911
-60	200	800	0.776
-60	200	1 200	1.524
-60	200	1 600	2.651
-80	50	800	2.078
-80	50	1 200	3.747
-80	50	1 600	6.556
-80	100	800	1.670
-80	100	1 200	2.914
-80	100	1 600	5.174
-80	200	800	1.149
-80	200	1 200	2.078
-80	200	1 600	3.486

3 结论

莲藕片薄层真空微波干燥过程可基本分为升速干燥、恒速干燥、降速干燥 3 个阶段;莲藕片薄层真空微波干燥过程符合 Page 模型,模型方程为 $MR = \exp(-kt^N)$, 其中, $k = \exp(-3.191 + 0.0149X_1 - 0.00887X_2 + 0.000973X_3)$, $N = 0.495 + 0.00230X_1 + 0.00151X_2 + 0.000306X_3$; R 值均大于 0.95, P 值均小于 0.05, 说明拟合显著。经验证,模型的预测值与试验值拟合良好;莲藕片薄层真空微波干燥条件下的有效扩散系数在 $0.508 \times 10^{-6} \sim 6.556 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内,且真空度和微波功率越高、装载量越低,有效扩散系数越大。

参考文献:

- [1] 寿森炎,宰文珊,黄锡志. 莲藕膨大过程中褐变酶活性的变化[J]. 核农学报,2005,19(4):279-281.
- [2] Xing Y G, Li X H, Xu Q L, et al. Effects of chitosan-based coating and modified atmosphere packaging (MAP) on browning and shelf life of fresh-cut lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaerth) [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(4): 684-689.
- [3] 刘建学. 全藕粉喷雾干燥工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 229-231.
- [4] Cui Z W, Xu S Y, Sun D W. Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(2): 157-164.
- [5] 江 宁,刘春泉,李大婧,等. 甘薯片真空微波干燥工艺的优化[J]. 中国食品学报,2011,11(7):81-88.
- [6] 黄姬俊,郑宝东. 香菇微波真空干燥特性及其动力学[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2010,39(3):319-324.
- [7] 刘春泉,严启梅,江 宁,等. 杏鲍菇真空微波干燥特性及动力学模型[J]. 核农学报,2012,26(3):494-499.
- [8] 朱德泉,曹成茂,朱 琳,等. 菠萝片微波真空干燥特性及工艺参数优化[J]. 粮油食品科技,2009,17(1):52-55,59.
- [9] 魏 巍,李维新,何志刚,等. 绿茶微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报,2010,26(10):367-371.
- [10] Figiel A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1): 98-104.
- [11] Bal L M, Kar A, Satya S, et al. Drying kinetics and effective moisture diffusivity of bamboo shoot slices undergoing microwave drying [J]. Food Science & Technology, 2010, 45(11): 2321-2328.
- [12] Özbek B, Dadali G. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(4): 541-549.
- [13] 种翠娟,朱文学,刘云宏,等. 胡萝卜薄层干燥动力学模型研究[J]. 食品科学,2014,35(9):24-29.
- [14] 彭桂兰,吴文福,陈晓光,等. 萝卜丝薄层干燥试验及其数学模型的建立[J]. 农业机械学报,2005,36(3):79-81,94.
- [15] 唐伟琴. 木瓜的薄层微波干燥特性实验研究[D]. 南宁:广西大学,2006:18-20.
- [16] 中华人民共和国卫生部. 食品中水分的测定:GB 5009.3—2010 [S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [17] 雷小琴. 香蕉片微波真空干燥特性及干燥工艺的研究[D]. 福州:福建农林大学,2010:8-17.
- [18] 胡庆国,卜召辉,陆 宁. 金针菇真空微波干燥动力学模型的研究[J]. 食品与机械,2010,26(5):48-50,77.
- [19] Sharma G P, Prasad S, Chahar V K. Moisture transport in garlic cloves undergoing microwave-convective drying [J]. Food and Bioproducts Processing, 2009, 87(1): 11-16.
- [20] Evin D. Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L [J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(2): 323-332.
- [21] 胡庆国. 毛豆热风与真空微波联合干燥过程研究[D]. 无锡:江南大学,2006:72-74.