

芒果切片热风干燥特性及模型

Hot air drying characteristics and model of Mango slices

黄敏^{1,2} 甘婷^{1,2} 易萍^{1,3} 黄方^{1,2} 李丽^{1,2}

HUANG Min^{1,2} GAN Ting^{1,2} YI Ping^{1,3} HUANG Fang^{1,2} LI Li^{1,2}

(1. 广西壮族自治区农业科学院农产品加工研究所, 广西南宁 530007;

2. 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室, 广西南宁 530007;

3. 广西农产品贮藏保鲜与加工科技成果转化中试研究基地, 广西南宁 530007)

(1. *Institute of Agro-food Science and Technology Research, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China*; 2. *Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-Processing, Nanning, Guangxi 530007, China*; 3. *Guangxi Pilot Research Base for Transformation of Technological Achievements in Agricultural Storage and Processing, Nanning, Guangxi 530007, China*)

摘要:目的: 为对芒果热风干燥过程进行预测与控制。方法: 以新鲜金煌芒为试验材料, 研究热风温度(60, 65, 70 °C)和芒果切片厚度(0.8, 1.0, 1.2 cm)对芒果热风干燥曲线、干燥特性曲线、水分有效扩散系数等的影响, 并选取常用的适用于果蔬的6种干燥模型进行拟合、分析及验证, 选出最适合芒果热风干燥的模型。结果: 随温度的升高, 切片厚度的减小, 加快了芒果片的干燥速率, 所需的干燥时间越短。水分有效扩散系数随温度和厚度的增大而增大, 为 $1.401\ 39 \times 10^{-10} \sim 3.655\ 46 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。Logarithmic模型的 R^2 最大、 X^2 和RMSE最小, 分别为0.998 87, 0.000 124 779, 0.001 37。结论: Logarithmic模型预测值与试验值验证基本吻合, 可以较好反映芒果片在干燥过程中水分含量的变化规律。

关键词: 芒果; 热风干燥; 干燥特性; 干燥模型; Logarithmic模型

Abstract: Objective: In order to predict and control the hot air drying process of Mango. **Methods:** Using fresh *Mangifera*

indica Linn as experimental material, the effects were studied in different hot air temperatures (60, 65, 70 °C) and different thickness of Mango slices (0.8, 1.0, 1.2 cm) on the drying curve, drying characteristic curve and effective moisture diffusion coefficient of Mango. Selecting six commonly used drying models suitable for fruits and vegetables for fitting, analysis, and validation, the most suitable model for Mango hot air drying was selected. **Results:** With the increase of temperature and the decrease of slice thickness, the drying rate of Mango slices was accelerated, resulting in shorter drying times. The effective diffusion coefficient of water increases with the increase of temperature and thickness, in the range of $1.401\ 39 \times 10^{-10}$ to $3.655\ 46 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$. R^2 of Logarithmic model was the largest, and X^2 and RMSE were the smallest, which were 0.998 87, 0.000 124 779 and 0.001 37 respectively. **Conclusion:** The predicted values are basically consistent with the experimental values, accord with Mango hot air drying, it can better reflect the changing law of moisture content of Mango slices during drying.

Keywords: Mango; hot air drying; drying characteristics; drying model; Logarithmic model

基金项目: 国家重点研发计划专项(编号: 2021YFD1600105); 广西自然科学基金项目(编号: 2021GXNSFAA075035); 广西农业科学院科技发展基金项目(编号: 桂农科2022JM73)

作者简介: 黄敏, 女, 广西壮族自治区农业科学院农产品加工研究所实习研究员, 学士。

通信作者: 李丽(1983—), 女, 广西壮族自治区农业科学院农产品加工研究所研究员, 硕士。E-mail: lili@gxaas.net
易萍(1992—), 女, 广西壮族自治区农业科学院农产品加工研究所助理研究员, 硕士。

E-mail: pingyi@gxaas.net

收稿日期: 2023-06-28 **改回日期:** 2024-03-07

芒果(*Mangifera indica* L.), 又称杧果, 素有“中国第四大热带水果”称号, 是广西的特色水果之一, 富含碳水化合物、蛋白质和矿物质等多种营养成分。因其属于呼吸跃变型水果, 且水分含量高, 近84%, 在采后成熟、运输过程中易发生变质腐烂^[1]。将其进行深加工可延长货架期, 增加效益, 芒果干制品便是其中一种有效方式。

果蔬常见的干燥方式主要有自然晾晒干燥、热风干

燥、微波干燥、真空冷冻干燥等^[2]。相较于其他干燥方式,热风干燥是一种广泛使用的低成本干燥方式,其操作简便,一次产出量大,符合大部分工厂企业需求^[3]。热风干燥是以热空气为介质,利用热能使湿物料表面升温,表面水分汽化蒸发,造成物料表面与内部之间产生温度梯度差,促使物料内部的水分在梯度差作用下向表面扩散,最终达到物料各部分水分平衡,属于传热传质的干燥过程^[4]。常见的干制品如苹果、火龙果、哈密瓜、红薯等多用于热风干燥且已有学者研究出干燥模型。尤娟等^[5]研究不同干燥方式的芒果农药残留量,发现热风干燥能有效去除大部分农药残留,效果较好;郑毅等^[6]研究了热风干燥速溶芒果粉,可较好维持芒果色香味,延长贮藏时间;研究^[7]发现,热风干燥还可以提升芒果干的感官、色泽及营养特性。热风干燥芒果是一种经济效益和性价比比较高的一种方式,目前有关芒果热风干燥研究均采用组合干燥,成本高,操作复杂,不利于大批量生产,而芒果热风干燥模型方面鲜有研究。研究以新鲜芒果为原料进行热风干燥处理,拟建立与温度、切片厚度相关的芒果干燥模型,并将试验值与预测值进行验证,以期对芒果热风干燥预测和控制与芒果产业深加工提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜金煌芒:2022 年采摘于百色永乐芒果基地;

柠檬酸、抗坏血酸(V_C)、氯化钙、氯化钠:食品级,南宁越前食品添加剂有限责任公司。

1.2 仪器与设备

鼓风干燥箱:WGLL-230BE 型,上海双旭电子有限公司;

多功能切片机:KD0248 型,广东膳道厨具有限责任公司;

电子分析天平:BSA124s 型,赛多利斯科学仪器北京有限公司;

分光色差仪:CS-412 型,杭州彩谱科技有限公司;

质构仪:博勒飞 CT3 型,苏州勒丰精密仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 芒果片干燥试验 取新鲜八成熟、无病虫害的金煌芒清洗去皮、去核,初始含水率为 84.30%,用切片机按不同厚度(0.8,1.0,1.2 cm)进行切片,芒果片放置于护色液(0.1%柠檬酸+0.5% V_C+0.5%氯化钙+0.25%氯化钠^[11])中护色 3 h。护色后沥干芒果表面水分,称取 350 g 左右的芒果片平铺在烘盘上,分别在不同温度(60,65,70 ℃)的鼓风干燥箱中进行热风干燥,每间隔 1 h 取出快速称重后放回干燥箱继续干燥,直至干基含水率低于

10%,计算各项指标数值。

1.3.2 水分含量测定 参照曹建康等^[8]的方法,根据式(1)计算水分含量。

$$C = \frac{m_F - m_D}{m_F} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C ——含水率,%;

m_F ——芒果鲜重,g;

m_D ——恒重后芒果的干重,g。

1.3.3 干基含水率测定 参照张路遥等^[9]的方法,根据式(2)计算干基含水率。

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g}, \quad (2)$$

式中:

M_t —— t 时刻的干基含水率,g/g;

m_t —— t 时刻对应的物料质量,g;

m_g ——绝干时的物料质量,g。

1.3.4 干燥速率测定 参照桂青等^[10]的方法,根据式(3)计算干燥速率。

$$D_R = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t}, \quad (3)$$

式中:

D_R ——干燥速率,g/(g·h);

$M_{t+\Delta t}$ —— $t + \Delta t$ 时刻的干基含水率,g/g;

M_t —— t 时刻的干基含水率,g/g;

Δt ——相邻两次取样的时间间隔,h。

1.3.5 水分比测定 参照刘永富等^[11]的方法,根据式(4)计算水分比。

$$M_R = \frac{M_t - M_s}{M_0 - M_s}, \quad (4)$$

式中:

M_R ——水分比;

M_t —— t 时刻的干基含水率,g/g;

M_0 ——初始干基含水率,g/g;

M_s ——平衡时的干基含水率,g/g。

1.3.6 水分有效扩散系数测定 以 Fick 第二定律为理论基础对其扩散偏微分方程进行数值求解并加以分析。

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \right]. \quad (5)$$

对式(5)取对数得式(6),计算水分有效扩散系数。

$$\ln(M_R) = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{D_{\text{eff}} \times \pi^2}{H^2} \times t, \quad (6)$$

式中:

D_{eff} ——水分有效扩散系数,m²/s;

H ——芒果片厚度,m;

t ——干燥所用的时间,s。

1.3.7 试验干燥模型 选择6种常用的果蔬干燥动力学模型见表1,利用 Oringin 软件进行拟合分析,根据 R^2 、 X^2 和均方根误差(RMSE)的值决定最适模型, R^2 越大、 X^2 和 RMSE 越小,则模型拟合最适度越高^[12-14]。

表 1 干燥模型
Table 1 Drying model

模型名称	模型方程式	模型参数
Wang and Singh	$M_R = at^2 + bt + 1$	a, b
Page	$M_R = \exp(-kt^n)$	k, n
Lewis	$M_R = a \exp(-kt)$	a, k
Newton	$M_R = \exp(-kt)$	k
Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + C$	a, k, c
Henderson and pabis	$M_R = a \exp(-kt)$	a, k

1.3.8 色泽测定 采用手持分光色差仪测定芒果片的 L^* 、 a^* 、 b^* 值,试验重复 6 次。

1.3.9 硬度测定 采用质构仪测定。选择 2 mm 的圆柱形探头,速度为 2 mm/s,探头检测深度为 2 mm,对芒果片上中下分别测定,取平均值,试验重复 6 次。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2017 进行汇总整理,Origin 2018 软件进行拟合分析,SPSS 26.0 软件进行回归分析处理。未作说明的试验均重复 3 次,试验结果以平均值±标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 芒果片热风干燥特性分析

2.1.1 温度对芒果热风干燥特性的影响 由图 1 可知,在干燥进行过程中水分含量呈下降趋势,温度越高,斜率越大,65、70℃的干燥速率明显高于 60℃的,60℃需要 16 h 达到绝干物质,而 70℃仅需 13 h,比 60℃的提前 3 h 结束干燥,这是因为高温降低了热空气的相对湿度,芒果片表面温度升高,水分蒸发速度加快,与内部形成温

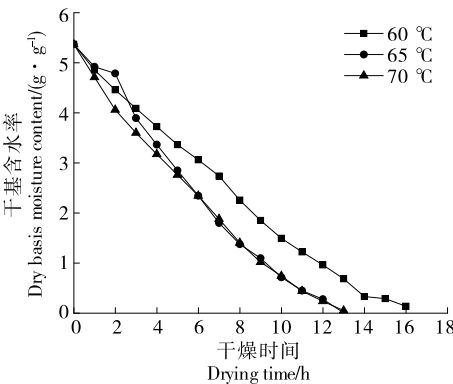


图 1 不同热风温度的干燥曲线

Figure 1 Drying curves of different hot air temperatures

度差,提高内部水分向外迁移扩散的动力和速度^[15]。由图 2 可知,芒果片干燥速率过程可分为两个阶段,即干燥初期干燥速率迅速升高的升速阶段,和达到速率最高峰后逐渐缓慢下降的降速阶段,无明显恒速阶段。在干燥前 2 h,70℃的干燥速率最快,2~8 h 中 65℃的干燥速率最快,60℃的干燥速率最慢。

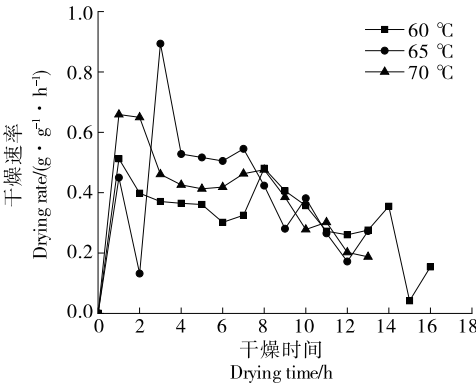


图 2 不同热风温度的干燥速率曲线

Figure 2 Drying rate curves of different hot air temperatures

2.1.2 切片厚度对芒果热风干燥特性的影响 由图 3 可知,切片厚度会影响芒果干燥特性。干基含水率随干燥时间的延长而降低,切片厚度为 0.8、1.0、1.2 cm 时达到绝干物质所需的时间分别为 11、13、16 h,厚度越薄,干燥越快。这是因为切片厚度越小,水分由内部向表面迁移的距离变小,传质传热过程加快,水分蒸发越快,达到绝干物质所需时间就越短,切片厚度越大则与之相反^[16]。由图 4 可知,干燥速率分为升速和降速两个过程,芒果片干燥过程可认为是降速干燥过程。0.8 cm 的干燥速率最快,1.2 cm 的最慢,这是因为前期表面水分向热空气蒸发,干燥速率呈升速阶段,当表面水分被蒸发和内部水分向外迁移达不到平衡时,干燥速率开始呈较长时间的下

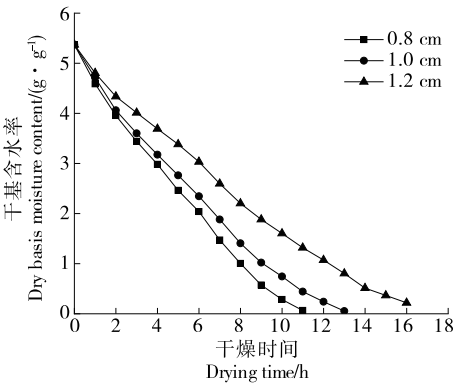


图 3 切片厚度对干燥曲线的影响

Figure 3 Effects of different slice thickness on drying curve

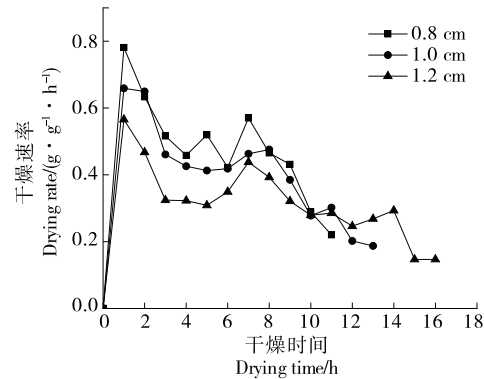


图 4 切片厚度对干燥速率曲线的影响
Figure 4 Effects of different slice thickness on drying rate curve

2.1.3 水分有效扩散系数 由表 2 显示,芒果片的水分有效扩散系数随温度和厚度的变化而变化,其值在 $1.401\ 39\times 10^{-10}\sim 3.655\ 46\times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。温度升高, D_{eff} 值越大,厚度为 1.0 cm 时,70 ℃ 的水分有效扩散系数是 60 ℃ 的 1.5 倍,这是因为高温中热空气的相对湿度较低,水分蒸发快,内部水分向外迁移的动力和速度加快;相同温度下,切片越厚, D_{eff} 值越大,切片越薄, D_{eff} 值越小,这是因为薄片在干燥过程中水分散失较快,表面出现硬化,

表 2 芒果片的水分有效扩散系数
Table 2 Effective water diffusion coefficient of Mango slices

厚度/cm	温度/℃	平均水分有效扩散系数/ ($\times 10^{-10}\ \text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
0.8	60	1.401 39
	65	2.064 16
	70	2.673 88
1.0	60	2.400 55
	65	3.564 94
	70	3.646 58
1.2	60	2.905 25
	65	3.655 46
	70	3.291 90

水分由内向外迁移受阻,水分有效扩散系数变小,与张记等^[19]和白冰玉等^[20]的研究结果类似。

2.2 干燥模型的建立与验证

以芒果片干燥的不同温度 and 不同切片厚度为变量,根据水分比随干燥时间的变化情况,对表 1 中的 6 种模型进行拟合分析,结果如表 3 所示。

表 3 6 种模型的拟合结果与分析
Table 3 Fitting results and analysis of six models

模型	温度/℃	厚度/cm	R^2	X^2	RMSE	模型参数
Wang and Singh	60	0.8	0.998 56	0.000 123 101	0.001 35	$a=0.001\ 27$ $b=-0.089\ 16$
		1.0	0.996 83	0.000 291 846	0.004 09	$a=0.001\ 29$ $b=-0.083\ 19$
	60	1.2	0.995 30	0.000 407 402	0.005 70	$a=0.001\ 61$ $b=-0.085\ 16$
		65	0.8	0.994 58	0.000 557 011	0.005 01
	65		1.0	0.988 77	0.001 220 000	0.013 45
		65	1.2	0.996 90	0.000 277 978	0.003 61
	70		0.8	0.997 17	0.002 585 490	0.002 33
		70	1.0	0.997 89	0.000 189 490	0.002 08
	70		1.2	0.997 83	0.000 181 217	0.002 54
		平均值		0.995 98	0.000 389 622	0.004 46

续表 3

模型	温度/℃	厚度/cm	R^2	X^2	RMSE	模型参数
Page	60	0.8	0.992 17	0.000 794 415	0.009 53	$k=0.053\ 82$
						$n=1.440\ 90$
	60	1.0	0.988 06	0.001 280 000	0.019 27	$k=0.043\ 51$
						$n=1.480\ 19$
	60	1.2	0.995 99	0.000 406 719	0.006 10	$k=0.048\ 72$
						$n=1.409\ 07$
	65	0.8	0.988 03	0.001 460 000	0.014 63	$k=0.054\ 48$
						$n=1.606\ 71$
	65	1.0	0.995 79	0.000 537 152	0.006 45	$k=0.046\ 64$
						$n=1.632\ 81$
	65	1.2	0.990 00	0.001 060 000	0.014 83	$k=0.054\ 04$
						$n=1.417\ 16$
	70	0.8	0.983 95	0.001 870 000	0.018 72	$k=0.091\ 74$
						$n=1.395\ 74$
	70	1.0	0.987 40	0.001 410 000	0.016 95	$k=0.080\ 99$
						$n=1.369\ 47$
	70	1.2	0.988 80	0.001 110 000	0.016 67	$k=0.054\ 97$
						$n=1.364\ 95$
Lewis	平均值		0.990 00	0.001 310 000	0.013 68	
	60	0.8	0.964 55	0.003 600 000	0.043 14	$a=1.075\ 36$
						$k=0.141\ 01$
	60	1.0	0.955 87	0.004 750 000	0.071 23	$a=1.078\ 94$
						$k=0.132\ 10$
	60	1.2	0.972 62	0.002 780 000	0.041 64	$a=1.081\ 51$
						$k=0.127\ 64$
	65	0.8	0.945 06	0.006 720 000	0.067 17	$a=1.092\ 19$
						$k=0.180\ 14$
	65	1.0	0.953 12	0.005 990 000	0.071 85	$a=1.115\ 37$
						$k=0.173\ 88$
	65	1.2	0.964 95	0.003 710 000	0.051 98	$a=1.076\ 84$
						$k=0.139\ 29$
	70	0.8	0.959 84	0.004 680 000	0.046 85	$a=1.057\ 13$
						$k=0.195\ 38$
	70	1.0	0.965 67	0.003 850 000	0.046 18	$a=1.060\ 36$
						$k=0.173\ 49$
	70	1.2	0.966 57	0.003 320 000	0.049 75	$a=1.059\ 19$
$k=0.128\ 07$						
Newton	平均值		0.960 92	0.004 380 000	0.054 42	
	60	0.8	0.954 08	0.004 300 000	0.055 89	$k=0.129\ 66$
						$k=0.121\ 85$
	60	1.0	0.946 36	0.005 410 000	0.086 58	$k=0.117\ 07$
						$k=0.163\ 84$
	60	1.2	0.961 82	0.003 630 000	0.058 08	$k=0.155\ 68$
						$k=0.128\ 61$
	65	0.8	0.931 40	0.007 620 000	0.083 87	
	65	1.0	0.935 06	0.007 650 000	0.099 51	
	65	1.2	0.955 63	0.004 390 000	0.065 82	

续表 3

模型	温度/℃	厚度/cm	R^2	X^2	RMSE	模型参数
Newton	70	0.8	0.954 62	0.004 810 000	0.052 94	$k=0.184\ 42$
	70	1.0	0.960 15	0.004 120 000	0.053 59	$k=0.163\ 34$
	70	1.2	0.960 76	0.003 650 000	0.058 40	$k=0.120\ 27$
	平均值		0.951 10	0.005 060 000	0.068 30	
Logarithmic	60	0.8	0.998 87	0.000 124 779	0.001 37	$a=2.480\ 44$ $k=0.037\ 20$ $c=-1.473\ 89$
	60	1.0	0.997 12	0.000 332 384	0.004 65	$a=2.138\ 94$ $k=0.039\ 76$ $c=-1.137\ 71$
	60	1.2	0.996 00	0.000 434 176	0.006 08	$a=1.612\ 06$ $k=0.058\ 39$ $c=-0.589\ 30$
	65	0.8	0.996 07	0.000 533 664	0.004 80	$a=3.255\ 53$ $k=0.033\ 99$ $c=-2.241\ 65$
	65	1.0	0.992 80	0.001 000 000	0.011 03	$a=1.855\ 80$ $k=0.065\ 70$ $c=-0.811\ 13$
	65	1.2	0.997 45	0.000 290 901	0.003 78	$a=1.860\ 05$ $k=0.050\ 80$ $c=-0.852\ 97$
	70	0.8	0.998 26	0.000 225 370	0.002 03	$a=1.945\ 75$ $k=0.065\ 02$ $c=-0.957\ 19$
	70	1.0	0.998 36	0.000 201 123	0.002 21	$a=1.659\ 03$ $k=0.071\ 22$ $c=-0.664\ 68$
	70	1.2	0.998 32	0.000 178 371	0.002 50	$a=1.858\ 63$ $k=0.045\ 96$ $c=-0.868\ 31$
	平均值		0.997 03	0.000 368 974	0.004 27	
Henderson and pabis	60	0.8	0.964 55	0.003 600 000	0.043 14	$a=1.075\ 36$ $k=0.141\ 01$
	60	1.0	0.955 87	0.004 750 000	0.071 23	$a=1.078\ 94$ $k=0.132\ 10$
	60	1.2	0.972 62	0.002 780 000	0.041 64	$a=1.081\ 51$ $k=0.127\ 64$
	65	0.8	0.945 06	0.006 720 000	0.067 17	$a=1.092\ 19$ $k=0.180\ 14$
	65	1.0	0.953 12	0.071 850 000	0.005 99	$a=1.115\ 37$ $k=0.173\ 88$
	65	1.2	0.964 95	0.003 710 000	0.051 98	$a=1.076\ 84$ $k=0.139\ 29$

续表 3

模型	温度/℃	厚度/cm	R^2	X^2	RMSE	模型参数
Henderson and pabis	70	0.8	0.959 84	0.004 680 000	0.046 85	$a=1.057\ 13$ $k=0.195\ 38$
	70	1.0	0.965 67	0.003 850 000	0.046 18	$a=1.060\ 36$ $k=0.173\ 49$
	70	1.2	0.966 57	0.003 320 000	0.049 75	$a=1.059\ 19$ $k=0.128\ 07$
平均值			0.960 92	0.011 700 000	0.047 10	

根据表 3 各模型的 R^2 、 X^2 和 RMSE 值发现,Wang and Singh 模型、Page 模型和 Logarithmic 模型的拟合度较高,均在 0.98 以上,其中 Logarithmic 模型的 R^2 最大,有 0.998 87, X^2 和 RMSE 值也最小, X^2 在 0.000 124 779~0.001 范围, RMSE 在 0.001 37~0.011 03 范围内,可见 Logarithmic 模型的适配度最高,可以较好地描述、预测芒果片热风干燥情况^[21-22]。

由以上数据可知,模型参数 a 、 k 、 c 随温度和厚度的变化而变化,为检验热风干燥温度(T)和切片厚度(H)对 Logarithmic 模型参数 a 、 k 、 c 的影响效果,对 a 、 k 、 c 与 T 、 H 进行方程拟合得一次方程:

$$a=X_0+X_1T+X_2H, \quad (7)$$

$$k=Y_0+Y_1T+Y_2H, \quad (8)$$

$$c=Z_0+Z_1T+Z_2H。 \quad (9)$$

根据表 3 中 Logarithmic 模型参数 a 、 k 、 c 的值,利用 SPSS 对其进行回归分析可求出:

$$a=0.668\ 55+0.017\ 3T-0.033\ 868H, \quad (10)$$

$$k=0.178\ 858-0.000\ 901T-0.056\ 203H, \quad (11)$$

$$c=0.540\ 983-0.020\ 456T+0.036\ 082H。 \quad (12)$$

将 a 、 k 、 c 表达式代入 Logarithmic 模型方程得:

$$M_R=(0.668\ 55+0.017\ 3T-0.033\ 868H)\times\exp[-(0.178\ 858-0.000\ 901T-0.056\ 203H)\times t]+(0.540\ 983-0.020\ 456T+0.036\ 082H), \quad (13)$$

式中:

M_R ——水分比;

T ——热风温度,℃;

H ——切片厚度,cm。

为检验 Logarithmic 模型和试验结果拟合的配适度,对模型进行验证检验。选择厚度为 1.2 cm,70 ℃ 芒果片的水分比随干燥时间的变化情况进行拟合验证。由图 5 可知,试验值与预测值基本吻合,说明通过 Logarithmic 模型可以推算实际芒果片所需的干燥时间以及监控芒果片的水分比情况,避免干燥过久导致芒果干褐变僵硬影

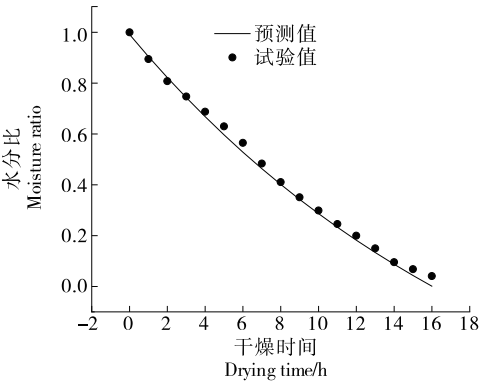


图 5 相同条件下芒果片干燥水分比的预测值和试验值

Figure 5 Predicted and experimental values of moisture ratio for Mango slices drying under the same conditions

响口感或者干燥不够导致的口感不佳、贮藏期变短^[6]。因此,Logarithmic 模型是可以较好地预测和描述芒果片的热风干燥过程。

2.3 热风干燥对芒果片色泽和硬度的影响

由表 4 可知,不同厚度的芒果干的 L^* 、 a^* 以及 b^* 差异不显著;0.8 cm 的芒果干硬度值较高,可能是因为厚度越小水分散失迅速,易导致芒果干硬化^[7],但 3 组厚度间的差异不显著。

表 4 芒果干的色泽与硬度值

Table 4 Color and hardness value of dried mango				
厚度/cm	L^*	a^*	b^*	硬度/N
0.8	68.91±1.91	9.33±1.04	36.23±1.41	0.66±0.06
1.0	62.11±1.81	11.68±0.58	29.85±2.31	0.46±0.06
1.2	66.74±2.53	10.30±0.25	28.64±3.84	0.50±0.07

3 结论

试验研究了温度和切片厚度对芒果热风干燥模型的作用效果,结果表明,温度和厚度都对芒果热风干燥起到影响作用。干基含水率、水分含量与干燥时间成反比;整

个干燥过程可以分为两个阶段,即升速阶段和降速阶段,芒果热风干燥以降速阶段为主;从 60 ℃ 到 70 ℃,随温度的升高,干燥速率加快,干燥所需的时间缩短,从 0.8 cm 到 1.2 cm,随切片厚度的增大,干燥所需的时间变长。水分有效扩散系数随温度和厚度发生改变,从 60 ℃ 到 70 ℃ 呈上升,从 0.8 cm 到 1.2 cm 呈上升,成正比,其值在 $1.401\ 39 \times 10^{-10} \sim 3.655\ 46 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。

在选定的 6 种薄层干燥模型中,Logarithmic 模型拟合结果最好,最适合描述热风芒果干燥过程中的水分比、所需干燥时间等情况,模型方程为 $M_R = (0.668\ 55 + 0.017\ 3T - 0.033\ 868H) \times \exp[-(0.178\ 858 - 0.000\ 901T - 0.056\ 203H) \times t] + (0.540\ 983 - 0.020\ 456T + 0.036\ 082H)$ 。热风干燥芒果片操作简单,性价比高,是一种经济实惠的生产加工方式,后续可对热风干燥设备耗能以及热风结合多种干燥方式开展更深入的研究,进一步优化芒果切片的干燥工艺。

参考文献

- [1] 宋璐瑶, 刘东红. 芒果片真空预处理联合超声辅助渗透脱水的传质动力学及品质分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 231-238, 230.
SONG L Y, LIU D H. Mass transfer kinetics and quality analysis of mango under vacuum pretreated and ultrasound assisted osmotic dehydration[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 231-238, 230.
- [2] 杨伊琳, 丁俊雄, 吴小华, 等. 香菇热风干燥特性及动力学模型[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 135-144.
YANG Y L, DING J X, WU X H, et al. Characteristics of Lentinus edodes hot-air drying and its kinetic model[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(4): 135-144.
- [3] 张雪波, 刘显茜, 邹三全, 等. 哈密瓜切片热风干燥特性及数学模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 130-136, 142.
ZHANG X B, LIU X X, ZHOU S Q, et al. Hot-air drying characteristics and mathematical model of cantaloupe slices[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 130-136, 142.
- [4] 黄燕婷, 罗朝丹, 黎新荣, 等. 浅析芒果干生产中干燥技术及装备[J]. 农业研究与应用, 2022, 35(2): 48-53.
HUANG Y T, LUO Z D, LI X R, et al. Analysis of drying technology and equipment in dried mango production [J]. Agricultural Research and Application, 2022, 35(2): 48-53.
- [5] 尤娟, 郭宏斌, 曾绍东, 等. 加工方式对芒果干制过程中保鲜类农药残留量的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(12): 2 420-2 426.
YOU J, GUO H B, ZENG S D, et al. Effect of processing methods on preservatives pesticide residues in dried mango [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(12): 2 420-2 426.
- [6] 郑毅, 伍斌, 黄德毅. 热风干燥加工速溶芒果粉工艺[J]. 农村新技术, 2020(10): 61-62.
ZHENG Y, WU B, HUANG H D. Processing technology of instant mango powder by hot-air drying[J]. New Rural Technology, 2020(10): 61-62.
- [7] 梁秋萍, 严学迎. 超声辅助热风干燥对芒果干品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(12): 205-210.
LIANG Q P, YAN X Y. Effects of ultrasonic-assisted hot-air drying on the quality of dried mango[J]. China Food Additives, 2022, 33(12): 205-210.
- [8] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工出版社, 2007: 31-32.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 31-32.
- [9] 张路遥, 楚玉柔, 杜玉青, 等. 馒头切片热风干燥特性及其动力学模型[J]. 现代食品, 2022, 28(1): 162-169.
ZHANG L Y, CHU Y R, DU Y Q, et al. Hot air drying characteristics and dynamic model of steamed bread slices[J]. Modern Food, 2022, 28(1): 162-169.
- [10] 桂青, 周立军, 王秀全, 等. 五指毛桃的热风干燥特性及动力学模型[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 58-63.
GUI Q, ZHOU L J, WANG X Q, et al. Hot air drying characteristics and dynamics model of Ficus hirta var. [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 58-63.
- [11] 刘永富, 周颖, 张晓娟, 等. 化橘红热风干燥动力学模型及品质特性[J]. 农机化研究, 2023, 45(2): 148-155.
LIU Y F, ZHOU Y, ZHANG X J, et al. Kinetics model and quality characteristics of exocarpium citri grandis using hot air drying[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 148-155.
- [12] SWAIN S, SAMUEL D V K, BAL L M, et al. Modeling of microwave assisted drying of osmotically pretreated red sweet pepper (Capsicum annum L.) [J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(4): 969-978.
- [13] DASORE A, KONIJETI R, PUPPAIA N. Method for determining the appropriate thin layer drying model for a feedstock [J]. International Journal of Recent Technology and Engineering, 2019, 8(3): 3 627-3 632.
- [14] DOYMAZ I. Effect of dipping treatment on air drying of plums[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 64(4): 465-467.
- [15] 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 H Y, LIU D, SONG Y J, 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.

(下转第 209 页)

- ZHANG J F. Analysis of nutritional components and health care function of edible fungi[J]. *Edible Fungi of China*, 2020, 39(7): 185-187.
- [11] SCHARLAU D, BOROWICKI A, HABERMANN N. Mechanisms of primary cancer prevention by butyrate and other products formed during gut flora-mediated fermentation of dietary fibres[J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2009, 682(1): 39-53.
- [12] 高虹, 程薇, 史德芳, 等. 香菇柄复合酶解工艺研究[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(23): 5 823-5 827.
- GAO H, CHENG W, SHI D F, et al. Hydrolysis effects of cellulase and neutral protease on *Lentinus edodes* Stipe [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(23): 5 823-5 827.
- [13] 揭广川, 陈红杰, 李必金. 微波辅助复合酶法提取草菇中的风味物质[J]. *食品与机械*, 2015, 31(1): 164-166, 243.
- JIE G C, CHEN H J, LI B J. Preparation of flavor compounds from *Volvarella volvacea* by microwave-composite enzyme synergistic extraction[J]. *Food & Machinery*, 2015, 31(1): 164-166, 243.
- [14] 刘涛, 杨焱, 冯涛, 等. 响应面法优化酶法水解香菇子实体中氨基酸的工艺[J]. *食用菌报*, 2017, 24(2): 93-98.
- LIU T, YANG Y, FENG T, et al. Optimization of enzyme-mediated release of flavor-enhancing amino acids from *Lentinula edodes* fruit bodies using response surface methodology[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2017, 24(2): 93-98.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定: GB 5009.235—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-5.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National standards for food safety, determination of amino acid nitrogen in food: GB 5009.235—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-5.
- [16] 陈海强, 胡汝晓, 黄晓辉, 等. 复合酶法水解香菇工艺的研究[J]. *微生物学报*, 2012, 39(1): 62-67.
- CHEN H Q, HU R X, HUANG X H, et al. Study on hydrolysis technology of *Lentinula edodes* degraded by composite enzyme[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, 39(1): 62-67.
- [17] 张婷婷, 丁婧微, 张宾乐. 香菇酶法制备调味品基料的工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 199-205.
- ZHANG T T, DING N W, ZHANG B L. Process optimization of enzymatic preparation of condiment base material by *Lentinus edodes*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(8): 199-205.
- [18] 薛淑静, 李露, 杨德, 等. 响应面优化双孢菇预煮液酶解工艺研究[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(22): 5 926-5 930.
- XUE S J, LI L, YANG D, et al. Optimization of the enzymatic hydrolysis process of blanching liquid from *Agaricus bisporus* by response surface analysis[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(22): 5 926-5 930.
- [19] 王雨生, 陈海华, 王莹钰, 等. 超声波协同酶法制备香菇酶解液及其鲜味物质研究[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(9): 134-141.
- WANG Y S, CHEN H H, WANG Y Y, et al. Preparation of mushroom hydrolysate by ultrasonic-enzyme synergistic method and studies on its umami substances [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(9): 134-141.
- (上接第 186 页)
- [16] 付冬雪, 罗旋飞, 谢蓝华, 等. 昭通苹果脆片热风干燥特性及动力学模型研究[J]. *食品工业*, 2022, 43(11): 128-134.
- FU D X, LUO X F, XIE L H, et al. Study on hot air drying characteristics and kinetic model of Zhaotong apple chips[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(11): 128-134.
- [17] 孟岳成, 王君, 房升, 等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 387-392.
- MENG Y C, WANG J, FANG S, et al. Drying characteristics and mathematical modeling of hot air drying of cooked sweet potatoes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7): 387-392.
- [18] 刘鹤, 田友, 焦俊华, 等. 甘薯切片热风干燥特性及模型研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(8): 30-36.
- LIU H, TIAN Y, JIAO J H, et al. Study on hot air drying characteristics and model of sweet potato slices[J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(8): 30-36.
- [19] 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 J, PENG G L, ZHANG X F, et al. Study on hot-air drying characteristics and kinetics model of *Astragalus slice*[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(8): 22-28, 56.
- [20] 白冰玉, 傅鑫程, 丁胜华, 等. 切片厚度对苦瓜片热风干燥特性及相关品质的影响研究[J]. *农产品加工*, 2019(17): 1-5.
- BAI B Y, FU X C, DING S H, et al. Effect of slice thickness on drying characteristics and related quality of balsam pear slices[J]. *Farm Products Processing*, 2019(17): 1-5.
- [21] 孟淑真, 马飞, 吴拥军, 等. 细菌型豆豉热风干燥特性及干燥模型[J/OL]. *中国食物与营养*. (2023-06-08) [2023-10-07]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20230607.002>.
- MENG S Z, MA F, WU Y J, et al. Hotair drying characteristics and drying model of bacterial douchi[J/OL]. *Food and Nutrition in China*. (2023-06-08) [2023-10-07]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20230607.002>.
- [22] ŞAHİN U, ÖZTURK H K. Comparison between artificial neural network model and mathematical models for drying kinetics of osmotically dehydrated and fresh figs under open sun drying[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(5): e12804.