

猕猴桃切片流化床干燥特性与干燥动力学模型研究

Study on drying characteristics and drying kinetic model of kiwi fruit slices in fluidized bed

邹三全

刘显茜

赵振超

张雪波

ZOU San-quan LIU Xian-xi ZHAO Zhen-chao ZHANG Xue-bo

(昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500)

(Kunming University of Science and Technology, Mechanical and Electrical Engineering,
Kunming, Yunnan 650500, China)

摘要:为了提高猕猴桃切片制干品质、缩短干燥时间,采用流化床干燥技术对其进行干燥,研究温度(55, 65, 75, 85 °C)、风速(1.5, 2.5, 3.5, 4.5 m/s)和厚度(5, 10, 15 mm)对猕猴桃切片热风干燥曲线、水分有效扩散系数以及干燥活化能的影响。结果表明:猕猴桃切片的整个干燥过程属于降速干燥,水分有效扩散系数为 $1.296\ 39 \times 10^{-9} \sim 4.589\ 94 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 且随温度、风速的增大而升高,随切片厚度的减少而增大;猕猴桃切片活化能为 23.03 kJ/mol。对 10 种常见的干燥动力学模型进行拟合发现,Logarithmic 模型效果最佳。

关键词:猕猴桃;流化床干燥;干燥动力学;有效水分扩散系数;活化能

Abstract: In order to improve the drying quality and shorten the drying time of kiwifruit slices, the effects were studied in different temperatures (55, 65, 75, 85 °C), wind speed (1.5, 2.5, 3.5, 4.5 m/s) and thickness (5, 10, 15 mm) on the hot air drying curve, water effective diffusion coefficient and drying activation energy of kiwifruit slices. The results showed that the whole drying process of kiwifruit slices belonged to reduced-speed drying, and the effective water diffusion coefficient was $1.296\ 39 \times 10^{-9} \sim 4.589\ 94 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, which increased with the increase of temperature and wind speed, and decreased with the decrease of slice thickness. The activation energy of kiwifruit slices was 23.03 kJ/mol. After fitting 10 common drying kinetic models, it is found that the Logarithmic model is the best model.

Keywords: kiwifruit; fluidized bed drying; drying kinetics; effective water diffusion coefficient; activation energy

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51566006)

作者简介:邹三全,男,昆明理工大学在读硕士研究生。

通信作者:刘显茜(1972—),男,昆明理工大学副教授,博士。

E-mail: xianxil@sina.com

收稿日期:2020-10-29

猕猴桃又名奇异果,含有丰富的多糖、蛋白质、氨基酸等多种有机物以及人体所必需的多种矿物质及维生素^[1],具有极高的营养、保健和医用价值,尤以维生素 C 的含量高,远远超过其他水果,故有“V_C之王”之称^[2-4]。目前,全球猕猴桃产量约为 402 万 t,其中约 50% 以上产自中国^[5],并呈快速增长的趋势。猕猴桃属呼吸活跃型水果,采收后易软化腐败,营养损耗快^[6-7],低温能有效延长其贮藏期,但猕猴桃又为冷敏性果实,低温条件下很容易诱发冷害,造成出库后大量腐烂变质^[8],猕猴桃加工成干制品能极大地延长其货架期^[9],并大幅度降低运输成本。

侯培军等^[10]、魏丽红等^[11]、宋一凡等^[12]、周旭^[13]分别采用热风、真空冷冻、CO₂低温高压渗透膨化和射频技术加热等干燥方式对猕猴桃进行干燥试验研究。其中,热风干燥速度快、操作方便、成本较低,是目前干制加工生产中被广泛应用的干燥方法^[14]。但由于热风干燥时间长,长时间密闭接触高温,物料色、香、味难以保留。真空冷冻、CO₂低温高压渗透膨化和射频等高端技术成本过高,目前只停留在实验室阶段。而流化床作为一种具有较高传热、传质系数,能够提高生产能力的干燥设备,其优点在于设备简单、物料与气体接触面积大、热传递好、干燥速度快、温度分布均匀,能够有效避免物料局部过热^[15]。

干燥技术中干燥过程与设备的数学模型研究至关重要^[16]。全面研究生物材料的干燥动力学模型对于干燥设备的结构设计、优化和系统控制尤为重要^[17]。其建模原理基于一组数学方程式,可以充分表征系统,尤其是这些方程式的求解必须允许仅根据初始条件^[18]来预测干燥机中任一点的过程参数随时间的变化。目前用来描述干燥过程的数学模型较多,其中薄层干燥模型已被广泛使用^[19]。

研究拟采用流化床干燥技术对猕猴桃切片进行干

燥,以干燥温度、热风风速和切片厚度为试验因素,研究各因素对干燥曲线、干燥速率和有效水分扩散系数的影响,并通过 Arrhenius 公式计算活化能。通过建立流化床干燥动力学模型探明猕猴桃切片的干燥规律,以期猕猴桃切片高品质工业化加工提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

猕猴桃:品种为徐香,产自陕西省西安市周至县,选取大小均匀,成熟度一致,无损伤新鲜果品,去皮后湿基含水率为 87.62%,试验前将猕猴桃置于冰箱中(4 ± 1)℃贮藏备用。

1.2 试验仪器与设备

流化床干燥机:M501 型,英国舍伍德科技有限公司;

电子天平:JY20001max2000 型,上海上天精密仪器有限公司;

手持风速测量器:GM816 型,深圳特安斯电子有限公司;

切片机:CP-139 型,佛山市睿特机械有限公司;

电冰箱:BCD-272WDG 型,青岛海尔股份有限公司。

1.3 试验方法

将流化床温度、风速设定为预定值,开启并预热 30 min。新鲜猕猴桃去皮,用切片机切成预定厚度,称取 40 g 左右放入干燥设备中进行干燥,床高设置为 35 mm,每 30 min 取出称重并快速放回干燥设备中,直至样品重量变化至平衡含水率时终止。按表 1 对流化床热风温度、风速和厚度进行单因素试验,探明各因素对猕猴桃切片干燥速率和干燥品质的影响程度。

1.4 指标测定与评估

1.4.1 水分比 按式(1)计算猕猴桃切片的水分比。

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

表 1 干燥试验设计与参数

Table 1 Drying test design and parameters

序号	热风温度/℃	风速/(m·s ⁻¹)	切片厚度/mm
1	55	2.5	10
2	65	2.5	10
3	75	2.5	10
4	85	2.5	10
5	75	1.5	10
6	75	2.5	10
7	75	3.5	10
8	75	4.5	10
9	75	3.5	5
10	75	3.5	10
11	75	3.5	15

式中:

M_R ——水分比;

M_t ——任意时刻干基含水率,g/g;

M_e ——平衡时刻干基含水率,g/g;

M_0 ——初始时刻干基含水率,g/g。

1.4.2 干燥速率 按式(2)计算猕猴桃切片的干燥速率。

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

式中:

D_R ——干燥速率,g/min;

M_{t_1} 、 M_{t_2} —— t_1 、 t_2 时刻的干基含水率,g/g。

1.4.3 水分有效扩散系数(D_{eff}) 猕猴桃切片干燥过程中,主要为降速干燥,可以用 Fick 第二定律表示:

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L_0^2} t\right), \quad (3)$$

将式(3)两边取对数得:

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L_0^2} t, \quad (4)$$

式中:

D_{eff} ——水分有效扩散系数;

L_0 ——切片厚度,mm;

t ——干燥时间,min。

由式(4)可知, $\ln M_R$ 与时间 t 的关系式斜率 k_0 表达为:

$$k_0 = -\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L_0^2} t. \quad (5)$$

通过拟合试验数据 M_R 与 t 的值,可以得到方程(4)的数学表达式,再通过式(5)可以计算出有效水分扩散系数 D_{eff} ,而水分有效扩散系数 D_{eff} 与活化能的关系式可根据 Arrhenius 方程建立得到。

1.4.4 活化能 猕猴桃切片流化床干燥的水分有效扩散系数与干燥温度的关系符合阿伦尼乌斯(Arrhenius)公式:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (6)$$

式中:

D_0 ——物料的扩散常数,m²/s;

E_a ——物料的干燥活化能,kJ/mol;

R ——通用气体常数,8.314 472 J/(mol·K);

T ——物料的干燥温度,K。

将式(6)两边取对数,得到 $\ln D_{\text{eff}}$ 与时间 $1/T$ 的线性关系式:

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T}. \quad (7)$$

对数据进行拟合可以得到 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/T$ 的线性关系,得活化能 E_a 。

通过 Origin 2018 软件进行模型拟合回归分析,通过

决定系数 R^2 、卡方检验值 χ^2 和均方根误差 R_{MSE} 评定模型的优劣,其表达式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R_{pre,i}} - M_{R_{exp,i}})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{R_{pre,i}} - M_{R_{exp,i}})^2}, \quad (8)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{R_{exp,i}} - M_{R_{pre,i}})^2}{N}}, \quad (9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R_{exp,i}} - M_{R_{pre,i}})^2}{N - n}. \quad (10)$$

1.4.5 数学模型 为了准确分析与计算猕猴桃切片流化床干燥过程中的水分有效扩散系数,从经典的干燥动力学模型中选出 10 个数学模型(表 2),优化出最佳数学模型并进行验证。

1.5 数据处理

利用 Matlab R2014a 软件进行数据处理,采用 Origin 2018 软件绘图及模型拟合。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 温度对猕猴桃干燥特性的影响 由图 1 可知,干燥时间与热风温度呈反比,热风温度越高,所需干燥时间越少。随着干燥温度的升高,促进了猕猴桃切片内部水分子由内到外的迁移速率,物料干燥时间减少。当干燥温度为 85,75,65,55℃时,干燥时间分别为 390,420,540,660 min,较 55℃的干燥时间分别缩短了 40.91%,36.36%,18.18%,因此干燥温度对猕猴桃切片干燥速率的影响极显著($P<0.01$)。

干燥初期,物料的干燥速率最高,随后不断下降,整个阶段属于降速干燥过程,并且随着温度的升高,降速过程表现得越明显,可能是由于猕猴桃切片是高含水率物料,水分相对于介质的湿度梯度差较大,物料中的水分向表面介质扩散迁移水分能力较强。干燥过程中,猕猴桃切片表面水分率先扩散迁移进入空气介质,随后,物料表

表 2 干燥动力学模型

Table 2 Drying kinetic model

序号	模型名称	模型方程
1	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$
2	Newton	$M_R = \exp(-kt)$
3	Herderson-Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$
4	Midilli	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$
5	Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$
6	Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$
7	Two term	$M_R = a \exp(k_0 t) + b \exp(k_1 t)$
8	Modified page	$M_R = \exp[-(kt^n)]$
9	Weibull distribution	$M_R = a - b \exp[-(kt^n)]$
10	Werma	$M_R = a e^{-kt} + (1-a)e^{-gt}$

面开始慢慢由外向里收缩,增加了内部水分向外迁移的阻力,从而影响干燥速率。随着热风介质与物料传热的不断进行,物料内部水分向外部环境扩散迁移的能力增强。

通过观察 4 个不同温度下的猕猴桃切片流化床干燥试验成品发现,85℃下的样品偏黑,无光泽,而新鲜猕猴桃切片为透绿色,颜色变化差距较大,75℃下的样品色泽保留也较好,光泽较亮,65℃下的样品色泽保留也较好,但相比于 75℃下的样品色泽亮度更暗淡一些,55℃下的样品色泽较暗,无光泽,颜色品质较差,说明颜色品质并不是干燥温度越低越好。综合考虑,兼顾颜色品质与干燥速率,选取干燥温度为 75℃ 较为合适。

2.1.2 热风风速对猕猴桃干燥特性的影响 由图 2 可知,当热风风速为 1.5,2.5,3.5,4.5 m/s 时,试验样品重量达平衡时所需的干燥时间分别为 600,480,420,360 min,较 1.5 m/s 的干燥时间分别缩短了 20%,30%,40%,说明热风风速对干燥时间的影响较明显。

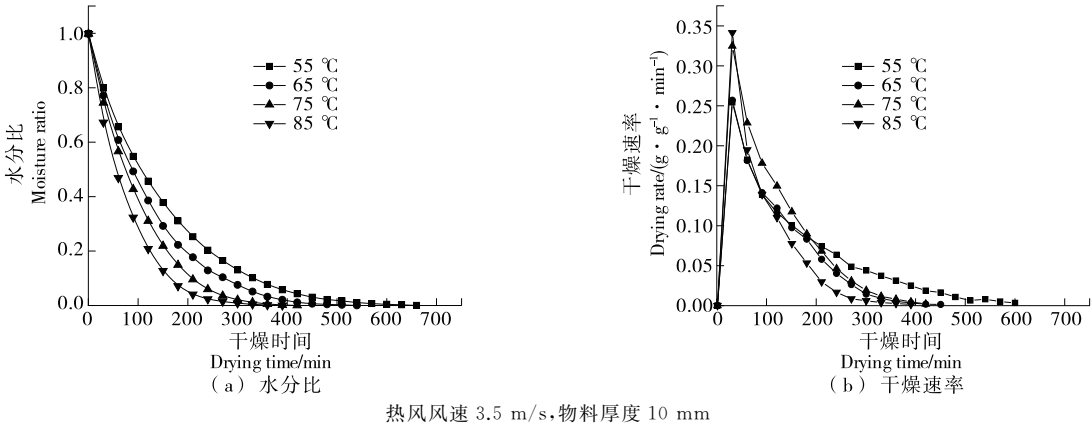


图 1 不同热风温度下猕猴桃切片的干燥特性及干燥速率曲线

Figure 1 The drying characteristics and drying rate curves of kiwifruit slices under different hot air temperatures

热风风速越大,干燥时间越少。随着干燥风速的增大,最大干燥速率增大,是因为越大的干燥风速对猕猴桃切片表面水分汽化速率影响越显著,但在干燥中后期,干燥速率与热风风速呈反比,风速越大,干燥速率下降越快。这可能是热风风速对于猕猴桃切片表面水分汽化有显著影响,但其对猕猴桃切片的内部水分迁移的影响较小;风速越大可能导致猕猴桃切片表面结壳越严重,增大猕猴桃切片内部的水分向外部环境迁移的阻力,从而降低了干燥速率。

综合考虑,干燥前中期,热风风速与干燥速率呈正相关,因此干燥初期可以使用较大的热风风速;干燥中后期,热风风速对干燥速率的影响很小,此时可以适当降低干燥风速,不仅能够达到较高的干燥速率,还可以降低干燥机器的能耗,从而降低生产成本。

2.1.3 物料厚度对干燥特性的影响 由图3可知,当切片厚度为15,10,5 mm时,干燥时间分别为630,420,240 min,随着猕猴桃切片厚度的增大,所需干燥时间越

长。试验发现,随着物料切片厚度的增大,物料色泽更暗黄,可能是由于干燥时间变长导致美拉德反应增多。5 mm时的干燥样品偏黄绿,10 mm时的干燥样品更接近透绿色,感官效果较其他厚度好。综合考虑,物料切片厚度为10 mm时更佳。

2.2 猕猴桃片的水分有效扩散系数

由表3可知,当热风风速及样品切片厚度恒定,热风温度为55,65,75,85℃时,猕猴桃切片的水分有效扩散系数为 $1.296\ 39 \times 10^{-9} \sim 2.598\ 08 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,水分有效扩散系数随温度的增加而极显著变大($P < 0.001$)。85℃时的水分有效扩散系数约为55℃时的2倍,可能是因为温度增加使水分子的动能增加,水分子扩散运动变得剧烈,因此水分有效扩散系数随热风温度的上升而变大,由式(6)可知水分有效扩散系数与温度呈指数型正相关,所以随着热风温度的升高,高温段比低温段水分有效扩散系数增幅更大^[20]。

由表4可知,当热风温度及样品切片厚度恒定,热风

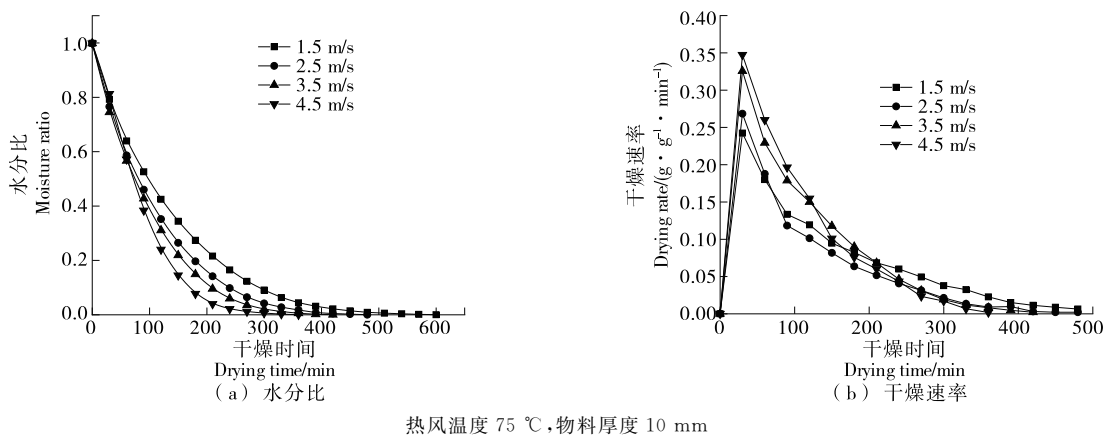


图2 不同热风风速下猕猴桃切片的干燥特性及干燥速率曲线

Figure 2 Drying characteristics and drying rate curves of kiwifruit slices under different hot wind speeds

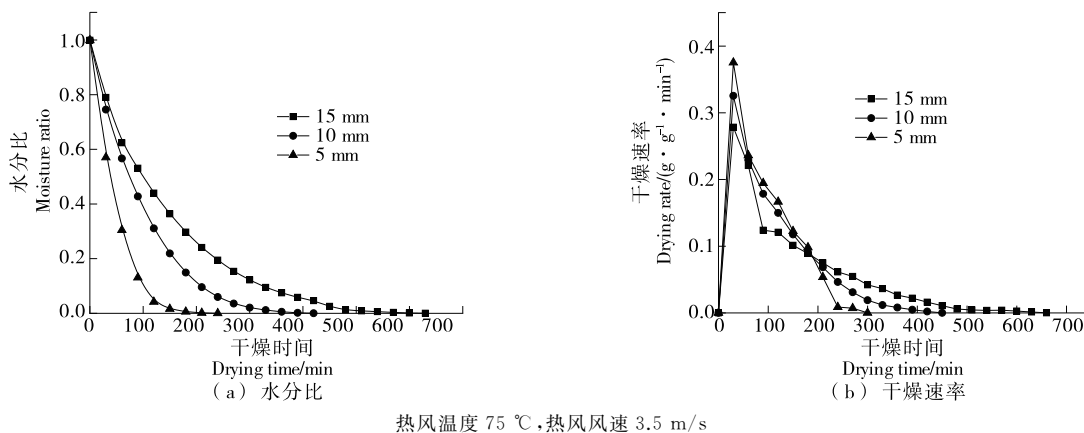


图3 不同物料厚度下猕猴桃切片的干燥特性及干燥速率曲线

Figure 3 The drying characteristics and drying rate curves of kiwifruit slices with different material thicknesses

风速为 1.5、2.5、3.5、4.5 m/s 时,水分有效扩散系数为 $1.296\ 39\times 10^{-9}\sim 2.605\ 71\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$,热风风速越大,水分有效扩散系数越大($P<0.01$),表明热风风速对水分有效扩散系数的影响显著。

由表 5 可知,当热风温度与热风风速恒定,物料切片厚度为 5、10、15 mm 时,水分有效扩散系数为 $4.589\ 94\times 10^{-9}\sim 1.413\ 19\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$,表明样品切片厚度对水分有效扩散系数的影响不显著。

2.3 干燥活化能

由图 4 可知, $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/T$ 的线性拟合良好,猕猴桃切片流化床干燥的活化能为 23.03 kJ/mol,低于稻谷(47.1 kJ/mol)^[21]和姜片(35.23 kJ/mol)^[22]的,但高于马铃薯(19.107 kJ/mol)^[23]和海鳗(15.23 kJ/mol)^[24]的,与莲子的(24.269 kJ/mol)相近^[25]。

表 3 热风温度对物料水分有效扩散系数的影响

Table 3 The effect of hot air temperature on the effective moisture diffusion coefficient of materials

热风温度/℃	斜率 k_0	决定系数 R^2	水分有效扩散系数 $D_{\text{eff}}/(\times 10^{-9}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
55	$-1.506\ 7\times 10^{-4}$	0.973 1	1.296 39
65	$-1.916\ 7\times 10^{-4}$	0.969 4	1.638 07
75	$-2.567\ 4\times 10^{-4}$	0.959 5	2.152 69
85	$-2.932\ 2\times 10^{-4}$	0.986 1	2.598 08

表 4 热风风速对猕猴桃切片水分有效扩散系数的影响

Table 4 Effect of hot wind speed on effective water diffusion coefficient of kiwifruit slices

热风风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	斜率 k_0	决定系数 R^2	有效水分扩散系数 $D_{\text{eff}}/(\times 10^{-9}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
1.5	$-1.813\ 8\times 10^{-4}$	0.964 8	1.535 27
2.5	$-2.187\ 3\times 10^{-4}$	0.967 3	1.853 64
3.5	$-2.567\ 4\times 10^{-4}$	0.959 5	2.152 69
4.5	$-3.109\ 7\times 10^{-4}$	0.979 5	2.605 71

表 5 切片厚度对猕猴桃切片有效水分扩散系数的影响

Table 5 Effect of slice thickness on effective water diffusion coefficient of kiwifruit slices

切片厚度/mm	斜率 k_0	决定系数 R^2	有效水分扩散系数 $D_{\text{eff}}/(\times 10^{-9}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
5	$-5.252\ 0\times 10^{-4}$	0.981 2	4.589 94
10	$-2.567\ 3\times 10^{-4}$	0.956 1	2.152 62
15	$-1.689\ 3\times 10^{-4}$	0.935 2	1.413 19

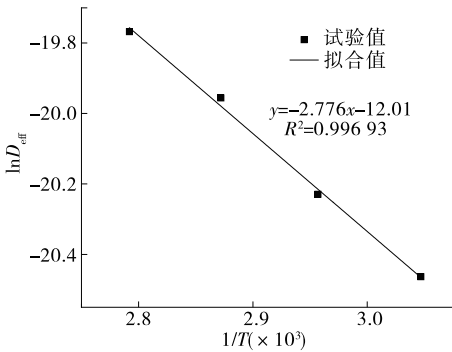


图 4 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/T$ 之间的关系

Figure 4 The relationship between $\ln D_{\text{eff}}$ and $1/T$

3 流化床干燥动力学模型

3.1 干燥模型的选择标准

R^2 越大、 χ^2 和 R_{MSE} 越小表明拟合效果越好。由表 6 可知,10 种模型中 Midilli 模型的 R^2 最小,为 0.653 8~0.763 8,说明 Midilli 模型不适合描述该干燥过程;Weibull distribution 模型的 R^2 最大,为 0.999 2~0.999 6, R_{MSE} 为 0.005 80~0.008 18, χ^2 为 0.000 04~0.000 07,其 R_{MSE} 和 χ^2 均小于其他模型,表明该模型能够很好地预测和描述猕猴桃切片流化床干燥过程,该模型参数 k 、 a 和 n 均随热风温度的增加而变大。Logarithmic 模型的拟合效果仅次于 Weibull distribution 模型,其决定系数为 0.998 9~0.999 6,两者的 R_{MSE} 与 χ^2 值较接近,其模型参数 k 和 n 随热风温度的增加而增大,说明该模型参数受温度影响。为了优化流化床干燥工艺、方便控制,在保证较高拟合结果不受影响或影响很小的情况下,应使数学模型尽可能简单^[21]。由于 Logarithmic 模型参数更少,因此认为 Logarithmic 模型是描述与预测猕猴桃切片流化床干燥过程的最佳模型,与员冬玲等^[26]的结论一致。

3.2 Logarithmic 模型验证

由图 5 可知,Logarithmic 模型的试验值与预测值几乎一致, R^2 达 0.999 5, χ^2 为 0.000 05, R_{MSE} 为 0.006 73,说明该模型可以较好地预测猕猴桃切片流化床干燥过程的水分比变化规律。

4 结论

试验表明,猕猴桃切片流化床干燥属于降速干燥过程,温度越高,风速越大,切片厚度越薄,干燥所需时间越短,风速对干燥前中期影响明显,对干燥中后期影响较小,因此选择流化床干燥温度 75 ℃,干燥前中期风速 4.5 m/s,中后期风速 1.5 m/s,切片厚度 10 mm 的干燥条件为宜。通过 10 种模型与猕猴桃切片流化床干燥试验数据拟合求得决定系数为 0.653 8~0.999 8,其中

表 6 猕猴桃切片流化床干燥数学模型及其拟合结果

Table 6 Fluidized bed drying mathematical model and fitting results of kiwifruit slices

模型序号	温度/℃	模型参数	R^2	R_{MSE}	χ^2
1	55	$k=0.006, n=1.03$	0.998 3	0.011 87	0.000 16
	65	$k=0.007, n=1.05$	0.998 7	0.010 16	0.000 12
	75	$k=0.006, n=1.12$	0.998 4	0.011 92	0.000 16
	85	$k=0.009, n=1.07$	0.998 9	0.009 94	0.000 12
2	55	$k=0.007$	0.998 1	0.012 30	0.000 17
	65	$k=0.008$	0.998 2	0.012 29	0.000 17
	75	$k=0.010$	0.995 5	0.020 08	0.000 47
	85	$k=0.013$	0.997 9	0.013 45	0.000 21
3	55	$k=0.007, a=0.99$	0.998 1	0.012 29	0.000 17
	65	$k=0.008, a=1.01$	0.998 2	0.012 15	0.000 17
	75	$k=0.010, a=1.02$	0.995 9	0.019 18	0.000 42
	85	$k=0.013, a=1.01$	0.998 0	0.013 20	0.000 20
4	55	$k=-0.004, a=0.57, b=-0.001 1, n=2.12 \times 10^{-8}$	0.763 8	0.135 40	0.020 08
	65	$k=-0.004, a=0.56, b=-0.001 3, n=2.22 \times 10^{-8}$	0.748 8	0.143 20	0.022 92
	75	$k=-0.004, a=0.57, b=-0.001 7, n=2.19 \times 10^{-8}$	0.752 2	0.149 63	0.025 83
	85	$k=-0.004, a=0.48, b=-0.001 6, n=2.61 \times 10^{-8}$	0.653 8	0.173 54	0.035 14
5	55	$a=-0.004, b=4.37 \times 10^{-6}$	0.954 3	0.059 57	0.003 89
	65	$a=-0.005, b=6.54 \times 10^{-6}$	0.956 9	0.039 99	0.001 79
	75	$a=0.007, b=1.04 \times 10^{-5}$	0.975 0	0.047 52	0.002 61
	85	$a=-0.008, b=1.38 \times 10^{-5}$	0.940 5	0.071 92	0.006 04
6	55	$k=0.006, a=1.010$	0.999 5	0.006 56	0.000 05
	65	$k=0.008, a=1.019$	0.999 6	0.005 79	0.000 04
	75	$k=0.009, a=1.042$	0.998 9	0.009 94	0.000 11
	85	$k=0.013, a=1.020$	0.999 1	0.009 04	0.000 95
7	55	$k_0=0.006, k_1=0.002, a=1.062, b=-0.077 0$	0.999 5	0.006 38	0.000 05
	65	$k_0=0.007, k_1=0.003, a=1.164, b=-0.170 9$	0.999 7	0.005 35	0.000 03
	75	$k_0=0.010, k_1=0.010, a=0.659, b=0.359 5$	0.995 9	0.019 18	0.000 42
	85	$k_0=0.013, k_1=0.013, a=0.451, b=0.557 5$	0.998 0	0.013 20	0.000 20
8	55	$k=0.007, n=1.03$	0.998 3	0.011 61	0.000 15
	65	$k=-0.000 03, n=1.05$	0.998 7	0.010 20	0.000 12
	75	$k=0.009, n=1.12$	0.998 4	0.011 92	0.000 16
	85	$k=0.013, n=1.07$	0.998 9	0.009 94	0.000 12
9	55	$k=0.007, a=-0.029, b=-1.02, n=0.97$	0.999 5	0.006 21	0.000 04
	65	$k=0.008, a=-0.023, b=-1.01, n=0.99$	0.999 6	0.005 80	0.000 04
	75	$k=0.007, a=-0.023, b=-1.02, n=1.07$	0.999 3	0.007 96	0.000 07
	85	$k=1.042, a=-0.012, b=-1.01, n=1.04$	0.999 2	0.008 18	0.000 07
10	55	$k=0.000 3, a=-0.025, b=0.006$	0.999 3	0.007 39	0.000 06
	65	$k=0.002 3, a=-0.079, b=0.007$	0.999 6	0.005 68	0.000 04
	75	$k=2.508 7, a=-0.065, b=0.011$	0.996 8	0.016 91	0.000 33
	85	$k=1.582 0, a=-0.041, b=0.013$	0.998 3	0.013 23	0.000 18

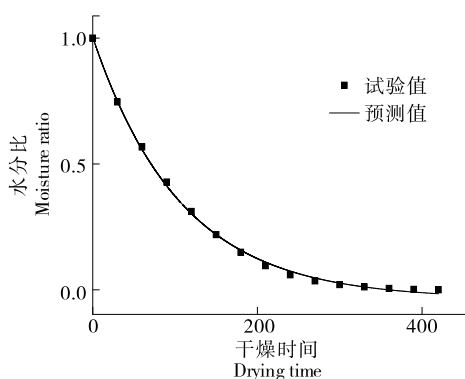


图 5 Logarithmic 模型验证

Figure 5 Validation of Logarithmic model

Logarithmic 模型是最佳模型,所需求解参数较少,适合描述与预测猕猴桃切片流化床干燥过程,该模型的决定系数 $>0.998\ 9$,卡方检验值为 $3.7\times10^{-5}\sim3.33\times10^{-5}$,均方根误差为 $5.795\times10^{-3}\sim9.943\times10^{-3}$ 。根据 Fick 扩散定律可知,水分有效扩散系数随温度升高、风速增大、切片厚度减小而增大,其中温度和风速的影响显著($P<0.05$)。根据 Arrhenius 公式计算得出猕猴桃切片流化床干燥的活化能为 23.03 kJ/mol ,较其他果蔬干燥所需的活化能小,更易于干燥。试验仅对猕猴桃切片流化床干燥特性及动力学模型进行了研究,后续可对干燥工艺进行参数优化或对综合产品品质进行优化。

参考文献

- [1] 李加兴,孙金玉,陈双平,等.猕猴桃综合加工利用[J].食品科学,2006,27(11):575-578.
- [2] COLLINS B H, HORSKÁ A, HOTTEN P M, et al. Kiwifruit protects against oxidative DNA damage in human cells and *in vitro* [J]. Nutrition & Cancer, 2001, 39(1): 148-153.
- [3] 孙宇宁.长白山野生软枣猕猴桃的成分分析及保鲜研究[D].长春:吉林农业大学,2007:1-2.
- [4] 邵信儒,孙海涛,刘颖.超声提取野生软枣猕猴桃多糖工艺优化[J].食品科学,2012,33(14):64-68.
- [5] FAOSTAT. Food and agriculture organization of the United States[DB/OL].(2020-10-20) [2020-11-27]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- [6] 高愿军,郝莉花,张鑫,等.猕猴桃汁维生素 C 降解动力学的研究[J].农业工程学报,2006,22(5):157-160.
- [7] 王明召,阳廷密,张素英,等.‘红阳’猕猴桃不同时期采收果实品质及贮藏效果研究[J].中国果树,2018(4):31-33.
- [8] JIN Peng, WANG Kai-tuo, SHANG Hai-tao, et al. Low-temperature conditioning combined with methyl jasmonate treatment reduces chilling injury of peach fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89: 1 690-1 696.
- [9] ALIBAS I. Microwave, air and combined microwave-air-

- drying parameters of pumpkin slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(8): 1 445-1 451.
- [10] 侯培军,刘怡菲,孟凡金,等.不同干燥方式对软枣猕猴桃品质的影响[J].辽宁林业科技,2019(2):14-17.
- [11] 魏丽红,翟秋喜.软枣猕猴桃真空冷冻干燥条件的筛选[J].辽宁农业职业技术学院学报,2019,21(5):7-9.
- [12] 宋一凡,陈海峰,袁越锦.猕猴桃 CO_2 -低温高压渗透膨化干燥工艺优化[J].食品科学,2020,41(4):229-234.
- [13] 周旭.猕猴桃切片的射频真空及热风联合干燥研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019:31-46.
- [14] 张萌,段续,任广跃,等.预处理方式对热风干燥玫瑰花瓣品质特性的影响[J].食品与机械,2020,36(1):204-209,229.
- [15] FALADE K O, SOLADEMI O J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(2): 278-288.
- [16] AKPINAR E K, BICER Y, CETINKAYA F. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75: 308-315.
- [17] SACLILIK K, KESKIN R, ELICIN A K. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73: 231-238.
- [18] GUNHAN T, DEMIR V, HANCIOGLU E, et al. Mathematical modeling of drying of bay leaves[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46: 1 667-1 679.
- [19] OZDEMIR M, DEVRES Y O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting [J]. Journal of Food Engineering, 1999, 42: 225-233.
- [20] 王凤贺,丁治春,陈鹏泉,等.油茶籽热风干燥动力学研究[J].农业机械学报,2018,49(增刊):426-432.
- [21] 尹晓峰,杨明金,李光林,等.稻谷薄层热风干燥工艺优化及数学模型拟合[J].食品科学,2017,38(8):198-205.
- [22] 孟岳成,王雷,陈杰,等.姜片热风干燥模型适用性及色泽变化[J].食品科学,2014,35(21):100-105.
- [23] 尹慧敏,聂宇燕,沈瑾,等.基于 Weibull 分布函数的马铃薯丁薄层热风干燥特性[J].农业工程学报,2016,32(17):252-258.
- [24] 郑海波,江美都,傅玉颖,等.低温低湿条件下海鳗冷风干燥动力学特性[J].中国食品学报,2012,34(2):73-80.
- [25] 徐建国,张森旺,徐刚,等.莲子薄层热风干燥特性与水分变化规律[J].农业工程学报,2016,32(13):303-309.
- [26] 员冬玲,耿文广,杜锐,等.南美白对虾过热蒸汽干燥特性及干燥数学模型[J].食品科学,2020,41(3):62-67.