

猕猴桃切片中短波红外干燥特性及动力学模型

曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 刘璇, 吴昕烨, 焦艺

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

摘要: 本试验研究了猕猴桃切片在不同的干燥温度(50、60、70、80℃)、干燥功率(675、1350、2025 W)条件下的中短波红外干燥特性试验, 结果表明: 干燥温度对猕猴桃切片干燥速率的影响较大, 干燥温度越高, 干燥用时越短; 干燥功率对猕猴桃切片干燥时间影响较小; 降速阶段为猕猴桃中短波红外干燥的主要阶段。通过对猕猴桃干燥动力学数学模型拟合发现: Page 模型对猕猴桃切片干燥过程的拟合性较好, 模型的预测值与实验值吻合性好, 可以用来描述和预测猕猴桃的中短波红外的干燥过程。通过费克第二定律求出干燥过程中的水分有效扩散系数(D_{eff}), 发现其值在 $3.3970 \times 10^{-9} \sim 1.2960 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内, 且随着温度和功率的升高而增大; 通过阿伦尼乌斯方程计算出猕猴桃切片中短波红外干燥活化能在 30.237~40.551 kJ/mol 范围内。该研究为中短波红外干燥技术应用于猕猴桃的干燥提供了技术依据。

关键词: 猕猴桃切片; 中短波红外干燥; 干燥动力学; 水分有效扩散系数; 活化能

文章编号: 1673-9078(2014)1-153-159

Drying Characteristics and Kinetics of Kiwifruit Slice under Medium and Shortwave Infrared Radiation

ZENG Mu-cheng, BI jin-feng, CHEN Qin-qin, LIU Xuan, WU Xin-ye, JIAO Yi

(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, CAAS, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: The experiment was carried out at different drying temperatures (50, 60, 70, 80 °C) and infrared powers (675, 1350, 2025 W). The results showed that drying temperature had a significant influence on the drying rate of kiwifruit. The drying time decreased with the increase of the drying temperature and infrared power. The processing time of kiwifruit was less affected by the power. According to statistical parameters. The Page model was found to be the best to simulate medium and shortwave infrared radiation drying of kiwifruit slices among the six mathematical models. There was a good agreement between the experimental and predicted values. Since the medium and shortwave infrared radiation drying of kiwifruit slices was mainly dominated by falling period, the Fick's second law of diffusion was employed to calculate the value of moisture effective diffusivity (D_{eff}), which ranged from 3.3970×10^{-9} to $1.2960 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, and increased with increasing the drying temperature and infrared power. The activation energy determined from Arrhenius equation was varied from 30.237 to 41.551 kJ/mol. This research provided the technique basis for the application of medium and shortwave infrared radiation drying technology in drying kiwifruit.

Key words: kiwifruit; medium and short wave infrared radiation drying; drying kinetics; moisture effective diffusivity; activation energy

猕猴桃又名羊桃、藤梨、基维果(kiwifruit), 属于落叶木质藤本植物果实。在我国种植十分广泛, 其中以陕西的秦岭、巴山山区、湖南的西部山区、河南的伏牛山区分布最多。猕猴桃果实中含有大量的糖、蛋白质、氨基酸等多种有机物和人体必需的多种矿物质及维生素, 具有很高的营养、保健功能, 尤以维生

收稿日期: 2013-09-24

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费资助(201303073); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD31B06)

作者简介: 曾目成(1989-), 男, 在读硕士研究生

通讯作者: 毕金峰(1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬精深加工与副产物综合利用技术

素C的含量高, 远远超过其他水果, 故有“Vc之王”之称^[1]。但在常温条件下, 猕猴桃极易因微生物和酶的作用而发生各种变化, 从而导致腐烂变质, 难以久藏, 使其货架期大大缩短^[2]。如能将新鲜猕猴桃加工成干制品, 则可以很好地延长其保存期。目前对猕猴桃的干燥方式研究有: 真空冷冻干燥、冷冻干燥、热风干燥等^[3-4], 研究多集中在对猕猴桃切片干燥工艺的探讨, 而对于干燥过程中特性研究较少。对干燥过程中的动力学研究可以很好地促进设备及生产工艺的改进。国内外对果蔬原料干燥特性进行了广泛深入的研究, 如李沛生等^[5]在对糖渍加应子样品在不同温度下热风干燥特性及模型研究, 发现加应子热风干燥是内

部水分扩散控制的降速干燥过程；温度越高，干燥速率越快；Page 模型适合对加应子干燥过程进行描述和预测。Sharma 等^[6]在对洋葱的红外干燥特性研究时，发现：干燥温度越高，干燥速率越快；Page 模型对其干燥动力学数学模型拟合效果最好。与传统的干燥方式如热风干燥相比，中短波红外干燥技术具有加热效率高、干燥产品品质好等特点，其原理是在中短波红外辐射加热过程中，当红外的发射波长与水分的吸收波长（水通常吸收波长 2.7~3 μm 的红外线）相一致时红外辐射会很快被水分子吸收而转化为水分子的热运动，同时水分子运动加速，导致其失水^[7]。本研究采用中短波红外技术对猕猴桃切片进行干燥，研究不同干燥温度和功率下猕猴桃切片的干燥特性，建立猕猴桃中短波红外干燥数学模型，以期为其工业化运用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜猕猴桃买自北京海淀区清河小营市场。剔除烂果，挑选大小一致的猕猴桃作为试验材料，试验前将物料贮放于 4±0.5 °C 的冷库。

1.2 仪器

德丰牌切片机：FA-200，广东省南海市德丰电热设备厂；中短波红外干燥箱：圣泰科红外科技有限公司；电子天平：AUW220 型，日本岛津公司。

1.3 方法

人工去除猕猴桃表皮，按要求进行切成 8 mm 的薄片待用，去皮后鲜样采用 105 °C 恒温干燥法得到其初始干基水分含量为 7.926 (d.b)。用电子天平称取质量为 100 g 左右的猕猴桃切片，单层平铺放入已工作稳定的中短波红外箱的托盘。按不同的干燥温度（50、60、70、80 °C）、干燥功率（675、1350、2025 W）条件下对猕猴桃进行干燥试验，每隔一定时间测定样品质量变化直至干基水分含量降到 0.1 (d.b) 时停止试验，每组试验重复三次，取均值。

1.4 干燥模型及评价标准

试验中选用的 5 个干燥动力学数学模型，见表 1。

其中水分比 (MR) 用于表示一定干燥条件下物料的剩余水分率，计算公式如下：

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

注：MR-水分比；M-样品任意时刻的干基含水率；M_e-样品的平衡干基含水率；M₀-样品的初始干基含水率。

表 1 用于干燥曲线分析的数学模型

Table 1 Mathematical models for drying kinetics

编号	模型名称	模型
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pebis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Two-term model	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$

注：此表格数据引自参考文献^[8]。

将试验得到的数据进行拟合回归分析，并用决定系数 R²、卡方检验值 χ² 和均方根误差 RMSE 来评价模型拟合的好坏，其表达式如下：

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N}} \quad (3)$$

注：R² 值越大、χ² 和 RMSE 越小，说明模型的拟合性越好。

干燥速率可用公式(4)表示：

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (4)$$

注：DR-干燥速率；M_{t+dt}-样品时刻的 t+dt 干基含水率；M_t-t 时刻的干基含水率；dt-相邻 2 次测量的时间间隔。

1.5 水分有效扩散系数的计算

当长方形、圆柱形和球形等形状的物料的干燥主要由降速阶段控制时，可以用菲克扩散方程来描述其干燥特性，方程的具体解法由 Crank^[9]在 1975 年提出。假设所有的样品都有相同的初始水分分布，那么样品的有效扩散系数满足如下方程：

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

注：D_{eff}-有效水分扩散系数/(m²/s)；L-样品厚度的一半/m。

对于长时间的干燥，上式可简化为如下方程：

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

两边取对数便可化为如下等式：

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (7)$$

通过等式(7)便可计算出 D_{eff}。

1.6 数据分析

采用 Origin 8.0 数据分析以及绘图。

2.1 结果与分析

2.1.1 干燥温度和功率对猕猴桃切片中短波红外干燥特性的影响

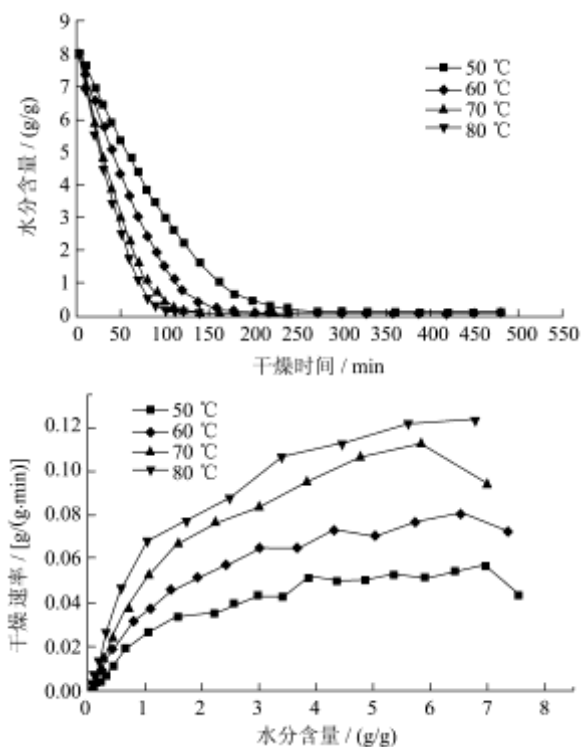


图 1 不同干燥温度对水分含量和干燥速率的影响

Fig.1 Influence of drying temperatures on the moisture content and drying rate

注：干燥功率为 1350W。

在干燥功率为 1350 W, 不同干燥温度对猕猴桃切片中短波红外干燥过程的水分含量和干燥速率的影响如图 1 所示。随着干燥的进行, 猕猴桃水分含量逐渐下降; 干燥温度对猕猴桃的干燥速率影响较大, 温度越高, 干燥速率越快。干燥温度分别为 50、60、70 和 80 °C 条件下, 猕猴桃的干燥时间分别为 450、390、240 和 140 min。类似的结果发生在对葡萄副产物的红外干燥过程^[10]。由干燥速率随水分含量的变化可知, 整个干燥除了开始的短暂升速, 降速阶段为主要的控制过程, 说明在猕猴桃的中短波红外干燥过程中, 内部水分扩散是主导因素, 直接控制了猕猴桃切片的干燥速率。试验过程中发现, 当干燥温度高于 70 °C 时, 猕猴桃产品色泽变暗, 品质不佳, 试验获得的最佳干燥温度为 60~70 °C。

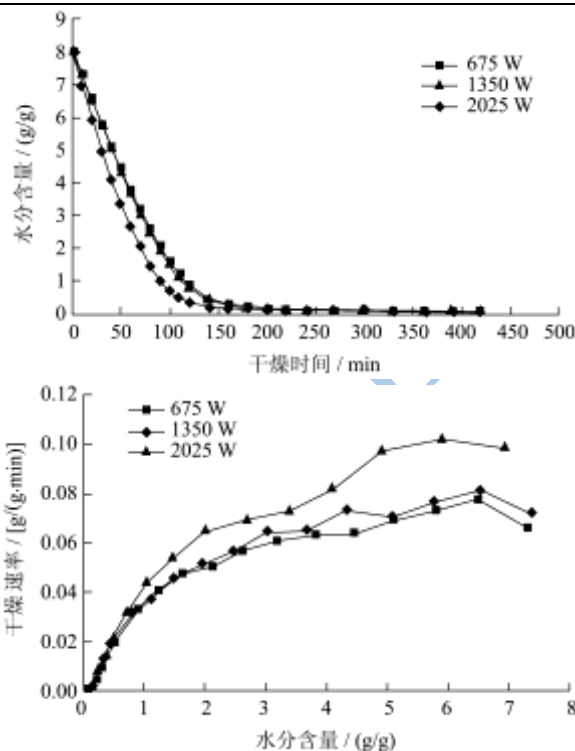


图 2 不同干燥功率对水分含量和干燥速率的影响

Fig.2 Influence of power levels on the moisture content and drying rate

注：干燥温度为 60 °C。

图 2 为干燥温度 60 °C 下, 干燥功率对猕猴桃切片中短波红外干燥过程的水分含量和干燥速率的影响图。干燥功率分别为 675, 1350 和 2025 W 条件下, 猕猴桃的干燥时间分别为 420、390 和 330 min。干燥功率对干燥速率有影响, 随着干燥功率的加大, 干燥时间缩短。这与甘薯和胡萝卜红外干燥特性结果相似^[11~12]。从图 2 干燥速率曲线不难看出, 干燥主要由降速阶段控制。由图 1 和图 2 可知, 干燥温度和干燥功率均对干燥时间有影响, 但在试验范围内干燥温度对干燥时间的影响 ($p < 0.05$) 比干燥功率对其影响更为突出。

2.2 干燥模型的确定

对不同干燥温度下猕猴桃切片中短波红外干燥的 MR 数据进行分析, 选取了 5 个数学模型(表 1)进行拟合, 其结果见表 2。由表 2 可知: 所用 5 个数学模型均能很好地模拟猕猴桃切片的中短波红外干燥过程中的水分变化, 其中 Page 模型拟合程度最好, 其 R^2 均值高达 0.99841, χ^2 和 RMSE 的均值分别为 1.72×10^{-4} 、0.003267。模型的拟合值与试验值的对比如图 3 所示。在对胡萝卜的热泵真空干燥和辣椒的太阳能干燥也发

现 Page 模型拟合效果最好^[13-14]。

表 2 不同中短波红外干燥条件下猕猴桃切片的干燥模型数据拟合结果

Table 2 Statistical results of drying models for kiwifruit slices under the different medium and shortwave infrared radiation conditions

模型	温度/°C	功率/W	模型参数		χ^2	RMSE	R ²		
Newton			<i>k</i>						
		50	675		0.00837	0.00209	0.05656	0.98180	
		60	675		0.01413	0.00201	0.04830	0.98083	
		70	675		0.02060	0.00253	0.04555	0.97647	
		80	675		0.02461	0.00341	0.04427	0.97099	
		50	1350		0.01144	0.00179	0.04478	0.98342	
		60	1350		0.01906	0.00128	0.03068	0.98604	
		70	1350		0.02475	0.00177	0.03005	0.98259	
		80	1350		0.02937	0.00228	0.02962	0.97961	
		50	2025		0.01008	0.00239	0.05963	0.97914	
		60	2025		0.01486	0.00230	0.04835	0.97876	
		70	2025		0.02112	0.00229	0.04121	0.97839	
		80	2025		0.02445	0.00299	0.03886	0.97402	
	Page			<i>k</i>	<i>n</i>				
			50	675	0.00182	1.3208	1.99×10 ⁻⁴	0.00518	0.99827
			60	675	0.00292	1.36373	1.96×10 ⁻⁴	0.00450	0.99814
		70	675	0.00390	1.41361	9.72×10 ⁻⁴	0.00165	0.99910	
		80	675	0.00457	1.43398	1.56×10 ⁻⁴	0.00187	0.99867	
		50	1350	0.00277	1.31473	2.05×10 ⁻⁴	0.00492	0.99810	
		60	1350	0.00563	1.29752	1.91×10 ⁻⁴	0.00439	0.99792	
		70	1350	0.00673	1.33563	1.71×10 ⁻⁴	0.00274	0.99831	
		80	1350	0.00740	1.37030	1.36×10 ⁻⁴	0.00163	0.99878	
		50	2025	0.00187	1.36650	1.46×10 ⁻⁴	0.00350	0.99873	
		60	2025	0.00301	1.37148	1.78×10 ⁻⁴	0.00357	0.99836	
		70	2025	0.00449	1.38594	1.24×10 ⁻⁴	0.00211	0.99883	
		80	2025	0.00539	1.38833	2.62×10 ⁻⁴	0.00314	0.99773	
Henderson and Pabis				<i>a</i>	<i>k</i>				
			50	675	1.07382	0.00908	0.00150	0.03889	0.98701
			60	675	1.07868	0.01526	0.00149	0.03433	0.98578
		70	675	1.08494	0.02221	0.00191	0.03255	0.98219	
		80	675	1.07961	0.02636	0.00282	0.03386	0.97596	
		50	1350	1.07135	0.01232	0.00132	0.03157	0.98783	
		60	1350	1.06296	0.02022	0.00101	0.02323	0.98897	
		70	1350	1.06328	0.02617	0.00147	0.02351	0.98553	
		80	1350	1.06378	0.03101	0.00196	0.02353	0.98245	
		50	2025	1.08451	0.01102	0.00164	0.03942	0.98563	
		60	2025	1.07945	0.01604	0.00173	0.03450	0.98409	
		70	2025	1.07875	0.02265	0.00178	0.03018	0.98324	
		80	2025	1.07063	0.02600	0.00255	0.03063	0.97782	

转下页

接上页

		<i>a</i>	<i>k</i>	<i>c</i>					
Logarithmic	50	675	1.10241	0.00822	-0.04302	0.00119	0.02968	0.98969	
	60	675	1.09185	0.01454	-0.01988	0.00143	0.03140	0.9864	
	70	675	1.10751	0.02047	-0.03320	0.00171	0.02734	0.98411	
	80	675	1.15821	0.02073	-0.10599	0.00154	0.01696	0.98687	
	50	1350	1.08819	0.01159	-0.02560	0.00119	0.02744	0.98896	
	60	1350	1.06729	0.01989	-0.00645	0.00104	0.02282	0.98868	
	70	1350	1.08093	0.02444	-0.02620	0.00133	0.02001	0.98686	
	80	1350	1.10341	0.02687	-0.05637	0.00140	0.01542	0.98745	
	50	2025	1.11113	0.01005	-0.03974	0.00136	0.03125	0.98812	
	60	2025	1.10447	0.01469	-0.03695	0.00147	0.02784	0.98649	
	70	2025	1.10085	0.02088	-0.03262	0.00156	0.02500	0.98525	
	80	2025	1.15200	0.02025	-0.10979	0.00124	0.01360	0.98926	
		<i>a</i>	<i>k₀</i>	<i>b</i>	<i>k₁</i>				
Two-term	50	675	-0.10923	67028.914	1.10923	0.00943	0.00128	0.03084	0.98884
	60	675	-0.14764	79692.434	1.14764	0.01626	0.00109	0.02280	0.98966
	70	675	-0.20773	1.98×10 ⁸	1.20773	0.02459	0.00102	0.01524	0.99055
	80	675	-0.22752	44324.926	1.22752	0.02965	0.00162	0.01620	0.98620
	50	1350	-0.12006	168262.8	1.12006	0.01293	0.00105	0.02303	0.99031
	60	1350	-0.14293	111264.2	1.14293	0.02170	6.82×10 ⁻⁴	0.01433	0.99255
	70	1350	-0.17949	323946	1.17949	0.02881	8.84×10 ⁻⁴	0.01237	0.99129
	80	1350	-0.21960	1.60×10 ⁶	1.21960	0.03509	9.98×10 ⁻⁴	0.00998	0.99107
	50	2025	-0.13496	25036.75	1.13496	0.01158	0.00128	0.02805	0.98885
	60	2025	-0.15327	64896.91	1.15327	0.01715	0.00125	0.02242	0.98851
	70	2025	-0.19520	1.39×10 ⁸	1.19520	0.02495	0.00101	0.01508	0.99051
	80	2025	-0.19803	3.46×10 ⁷	1.19803	0.02883	0.00169	0.01694	0.98528

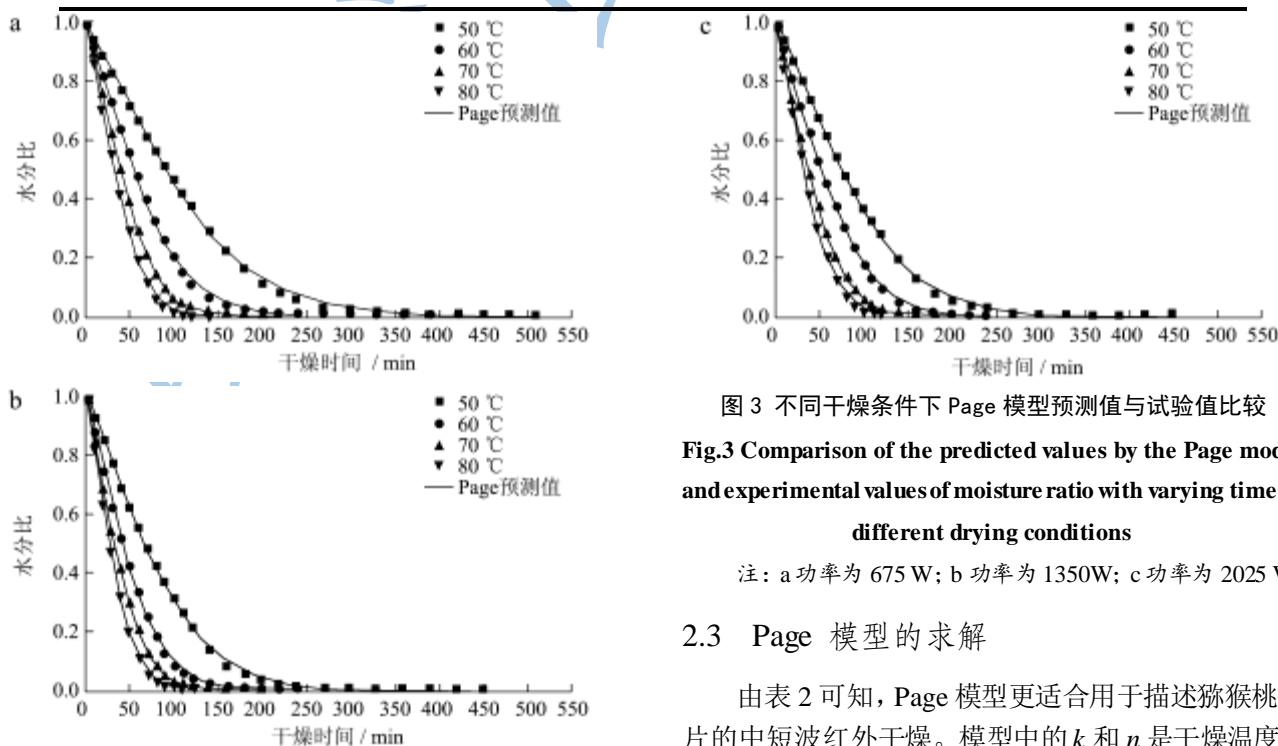


图3 不同干燥条件下 Page 模型预测值与试验值比较

Fig.3 Comparison of the predicted values by the Page model and experimental values of moisture ratio with varying time at different drying conditions

注: a 功率为 675 W; b 功率为 1350W; c 功率为 2025 W。

2.3 Page 模型的求解

由表 2 可知, Page 模型更适合用于描述猕猴桃切片的中短波红外干燥。模型中的 *k* 和 *n* 是干燥温度和

功率的函数,采用二次多项式来拟合 Page 方程中的干燥常数,除了考虑每个独立变化因素的一次和二次作用外,还需考虑各个因素之间的交互作用。设定

$$k = a_0 + a_1T + a_2P + a_3TP + a_4T^2 + a_5P^2 \quad (8)$$

$$n = b_0 + b_1T + b_2P + b_3TP + b_4T^2 + b_5P^2 \quad (9)$$

对以上两方程进行回归分析,分别求出 Page 模型中参数 k 和 n 的回归方程,结果如下:

$$k = -0.0185 + 4.09175 \times 10^{-4}T + 9.68312 \times 10^{-6}P \quad (10)$$

$$R^2 = 0.93$$

$$n = 1.2797 + 0.00211T - 1.24735 \times 10^{-4}P \quad (11)$$

$$R^2 = 0.889$$

将式(7)和(8)代入 Page 模型中,得到

$$MR = \exp[-0.0185 + 4.09175 \times 10^{-4}T + 9.68312 \times 10^{-6}P]$$

$$t^{(1.2797 + 0.00211T - 1.24735 \times 10^{-4}P)} \quad (12)$$

2.4 Page 模型的验证

选取干燥温度为 65 °C、功率为 1575 W 的干燥条件下猕猴桃切片中短波红外干燥试验值和 Page 模型预测值进行验证比较,如图 4 所示,可以看出,试验值和预测值的一致性较好,模型能够预测猕猴桃切片中短波红外水分变化规律。

2.5 猕猴桃切片中短波红外干燥水分有效扩散系数和活化能

由图 1 和图 2 可知,整个过程除了开始阶段的短暂升速,主要过程属于降速阶段控制,因此干燥过程

中的水分有效扩散系数可以用费克第二定律计算。

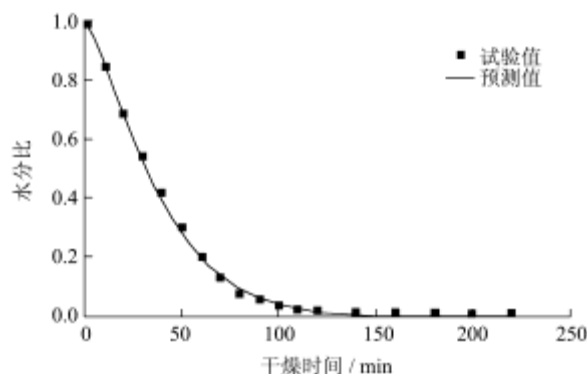


图 4 温度为 65 °C、功率为 1575 W 下 Page 模型预测值与试验值比较

Fig.4 Comparison of the predicted values by the Page model and experimental values of moisture ratio with varying time at the drying temperature of 65 °C and power of 1575 W

由公式(7)可知:猕猴桃切片在干燥过程中的水分比的自然对数值 $\ln MR$ 随着干燥时间 t 呈线性关系,通过回归计算出猕猴桃切片不同干燥温度下水分有效扩散系数 D_{eff} 如表 3 所示。由表 3 可知,猕猴桃切片的水分有效扩散系数随着干燥温度的升高而升高。此外,干燥功率的增加,水分有效扩散系数也加大。当干燥功率为 675 W,干燥温度分别为 50、60、70 和 80 °C 时,猕猴桃切片的水分有效扩散系数分别为 $3.3970 \times 10^{-9} \sim 1.2229 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$;当干燥功率为 1350 W,干燥温度分别为 50、60、70 和 80 °C 时,猕猴桃切片的水分有效扩散系数分别为 $4.0020 \times 10^{-9} \sim 1.2603 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$;当干燥功率为 2025 W,干燥温度分别为 50、60、70 和 80 °C 时,猕猴桃切片的水分有效扩散系数分别为 $4.6970 \times 10^{-9} \sim 1.2960 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

表 3 不同干燥温度和功率下猕猴桃切片中短波红外干燥水分有效扩散系数

Table 3 Moisture effective diffusivity of kiwifruit slices under different drying temperature and power

干燥功率/W	干燥温度/°C	线性回归拟合方程	决定系数 R^2	有效扩散系数 D_{eff}
675	50	$\ln MR = -0.01006t + 0.04898$	0.95491	3.3970×10^{-9}
675	60	$\ln MR = -0.01245t + 0.35820$	0.87565	4.0760×10^{-9}
675	70	$\ln MR = -0.02161t + 0.14966$	0.92088	7.1340×10^{-9}
675	80	$\ln MR = -0.03662t + 0.33955$	0.97505	1.2229×10^{-8}
1350	50	$\ln MR = -0.01178t$	0.94433	4.0020×10^{-9}
1350	60	$\ln MR = -0.01668t + 0.06013$	0.92620	5.6660×10^{-9}
1350	70	$\ln MR = -0.02211t + 0.16637$	0.91603	7.5110×10^{-9}
1350	80	$\ln MR = -0.01178t + 0.37138$	0.97380	1.2603×10^{-8}
2025	50	$\ln MR = -0.01391t + 0.25741$	0.89665	4.6970×10^{-9}
2025	60	$\ln MR = -0.019951t + 0.81969$	0.89278	6.7370×10^{-9}
2025	70	$\ln MR = -0.023138t + 0.30079$	0.89647	7.8130×10^{-9}
2025	80	$\ln MR = -0.03838t + 0.11964$	0.96326	1.2960×10^{-8}

由等式 (7) 可知水分有效扩散系数的自然对数

$\ln D_{eff}$ 与 $\frac{1}{T + 273.15}$ 呈线性关系,其斜率为 $-\frac{E_a}{R}$,二者

的关系如下图所示。

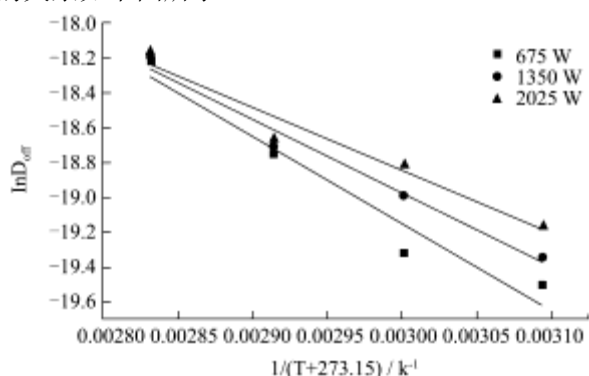


图5 水分有效扩散系数与干燥温度的关系曲线

Fig.5 The relation curves of moisture effective diffusion coefficients and drying temperatures

其干燥功率为 675、1350 和 2025W 下的直线回归方程分别为 $Y=-4997.75X-4.1529$ ($R^2=0.9506$)、 $Y=-4232.60X-6.2757$ ($R^2=0.9764$)、 $Y=-3636.93X-7.9376$ ($R^2=0.9538$) 经计算得到其活化能分别为 41.551、35.189 和 30.23 kJ/mol, 说明干燥过程干燥功率为 675、1350 和 2025 W 中从猕猴桃切片中去除 1 mol 的水分需要的最低的能量分别为 41.551、35.189 和 30.237 kJ, 功率越大, 所需能量越低。

3 结论

3.1 猕猴桃切片中短波红外干燥过程中, 干燥温度和干燥功率对猕猴桃切片干燥速率的均有影响较显著, 但干燥温度对干燥速率的影响比干燥功率更为突出, 干燥时间随着干燥温度和干燥功率的升高而降低。

3.2 在试验范围内, Page 模型对干燥过程的拟合性最好, 通过确定模型的相关参数与干燥温度和功率的函数关系式, 能准确预测不同时刻的猕猴桃水分比的变化。

3.3 猕猴桃切片的中短波红外干燥主要由降速阶段控制, 在试验范围内水分有效扩散系数随着干燥温度的提高而增大, 其范围为 $3.3970 \times 10^{-9} \sim 1.2960 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 猕猴桃切片中短波红外干燥活化能在功率为 675、1350 和 2025 W 时, 其值分别为 41.551、35.189 和 30.237 kJ/mol。

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
Li Jia Xing, Sun Jin Yu, Chen Shuang Ping, et al. Kiwifruit comprehensive processing utility [J]. Food Science, 2006, 27(11): 575-578
- [2] 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

Gao Yuan Jun, Hao Li Hua, Zhang Xin, et al. Degradation kinetics of ascorbic acid in kiwifruit juice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 157-160

- [3] 彭帮柱,岳田利,袁亚宏.猕猴桃切片真空冷冻干燥工艺参数优化[J].农业机械学报,2007,38(4):98-102

Peng Bang Zhu, Yue Tian Li, Yuan Ya Hong. Optimization of Technical Parameters on Vacuum Freeze-dry Kiwifruit Slice [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 98-102

- [4] 周国燕,陈唯实,叶秀东,等.猕猴桃热风干燥与冷冻干燥的实验研究[J].食品科学,2007,28(8):164-167

Zhou Guo Yan, Chen Wei Shi, Ye Xiu shi, et al. Study on freeze-drying and hot-air drying kiwifruit slice [J]. Food Science, 2007, 28(8): 164-167

- [5] 李汴生,刘伟涛,李丹丹,等.糖渍加应子的热风干燥特性及其表达模型[J].农业工程学报,2009,25(11):330-335

Li Bian Sheng, Liu Wei Tao, Li Dan Dan, et al. Characteristic of hot air drying of candied prunes and representation model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 330-335

- [6] Sharma G P, Verma R C, Pathare P. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71: 282-286

- [7] 高云.中短波红外辐射技术在工业加热中的运用[C].第十三届全国红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集,2011

Gao Yun. The use of med-shortwave infrared radiation technology in industrial heating [C]. The 13th national infrared heating and infrared medical development seminar papers and abstract sets

- [8] Wang Z F, Sun J H, Liao X J, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. Food Research International, 2007, 40: 39-46

- [9] Crank J. The mathematics of diffusion [M]. Oxford, England: Clarendon Press, 1975

- [10] Celma A R, López-Rodríguez F, Blázquez F C. Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products [J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 87(4): 247-253

- [11] Doymaz İ. Infrared drying of sweet potato (Ipomoea batatas L.) slices [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(6): 760-766

- [12] Kocabiyik H, Tezer D. Drying of carrot slices using infrared radiation [J]. International Journal of Food Science &

- Technology, 2009, 44(5):953-959
- [13] Luampon R, Theerakulpisut S, Artnaseaw A. Thin Layer Drying of Carrot Slices by Heat Pump Vacuum Dryer [J]. Advanced Science Letters, 2013, 19(11): 3342-3345
- [14] Tunde-Akintunde T Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper [J]. Renewable Energy, 2011, 36(8):2139-2145

