

基于 Weibull 分布函数对猕猴桃切片中短波红外干燥过程模拟及应用

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: 为了探究 Weibull 分布函数中各参数的影响因素及其在干燥中的应用, 本试验以猕猴桃切片在不同的中短波红外干燥温度 (50、60、70、80 °C)、干燥功率 (675、1350、2025 W) 条件下的干燥过程为研究对象, 利用 Weibull 分布函数对其干燥动力学曲线进行模拟并分析。结果表明: Weibull 分布函数能够很好地模拟猕猴桃切片的中短波红外干燥过程; 尺度参数 α 与干燥温度和干燥功率均有关, 并且随着干燥温度和红外功率的升高而降低; 而干燥温度和红外功率对形状参数 β 的影响较小。通过计算求出干燥过程中的估算水分有效扩散系数, 其值在 $1.06 \times 10^{-7} \sim 3.51 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内随着温度的升高而增大; 通过阿伦尼乌斯方程计算出功率为 675、1350 和 2025 W 时, 干燥活化能分别为 32.55、27.02 和 28.07 kJ/mol。该研究为 Weibull 分布函数在猕猴桃中短波红外干燥技术的运用提供了技术依据。

关键词: 猕猴桃; 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)6-146-151

Weibull Distribution for Modeling Med- and Short- Wave Infrared Radiation Drying of Kiwifruit Slices

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: In this study, the kiwifruit was selected as raw material to investigate the effect of drying conditions on the parameters of Weibull distribution. The experiment was conducted at different levels of med-and short-wave infrared radiation drying temperature (50, 60, 70, 80 °C) and infrared power (675, 1350, 2025 W). The result showed that the Weibull distribution function was good in simulating the process of med-and short-wave infrared radiation drying of kiwifruit slices. The scale parameter (α) was found to be related with the drying temperature and infrared power, and was decreased with increasing drying temperature and infrared power. However, the drying conditions had little influence on the shape parameter (β). The estimated moisture effective diffusivity (D_{cal}) of kiwifruit samples were calculated to be in the range from 1.061×10^{-7} to $3.51 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, which increased with increasing drying temperature within the ranges tested. The activation energy determined from Arrhenius equation was 32.55, 27.02 and 28.07 kJ/mol at 675 W, 1350 W and 2025 W, respectively.

Key words: kiwifruit; med-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。在我国分布是十分广泛, 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

收稿日期: 2014-01-06

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”科技支撑计划课题“复合果蔬新产品创制与节能减排关键技术开发及示范” (2012BAD31B06) 资助

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

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, 尤以维生素 C 的含量高, 远远超过其他水果, 故有“Vc 之王”之称。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。如能将新鲜猕猴桃加工成干制品, 则可以很好地延长产品货架期, 同时还可降低保存和运输成本。目前对猕猴桃的干燥方式研究有: 微波真空干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、冷冻干燥、热风干燥等, 研究多集中在多干燥工艺的探讨, 而对干燥过程中特性研究较少。国内外对果蔬原料干

干燥特性进行了广泛深入的研究, 如对苹果^[1]、洋葱^[2]、苹果渣^[3]等的研究。

此外为了对干燥过程进行研究, 一些经验和半经验模型被广泛地用于描述干燥过程如: Page, Modified page, Henderson and pabis, Midilli, Two-term, Thompson, Diffusion approach, Logistic, Geomeric 以及 Logarithmic 等^[4]。尽管数学模型对干燥动力学的模拟较好, 但其对模型中各个参数的研究意义往往不是很明确, 并且也不能与干燥工艺、干燥效率以及传质传热进行有效结合, 这样就大大降低了模型的使用价值和意义。而在干燥过程中, 引入 Weibull 分布函数正好可以对干燥中的一些黑箱阶段进行分析。目前对其在干燥工艺中的应用进行了广泛地研究, 如 Uribe 等^[5]发现 Weibull 分布函数可以很好地模拟人参果的对流干燥动力学。Miranda 等^[6]发现 Weibull 分布函数可以用来描述芦荟在不同干燥条件下的对流干燥过程。Corzo 等^[7]发现 Weibull 分布函数对芒果在不同热风干燥条件下的水分含量的变化描述效果很好, 但对猕猴桃中短波红外干燥 Weibull 分布函数拟合较少。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^[8]。

本文重点研究不同干燥温度和干燥功率对猕猴桃中短波红外干燥动力学的影响, 并利用 Weibull 分布函数对干燥过程进行模拟, 探讨 Weibull 分布函数的参数的影响因素, 阐述其在干燥中的物理意义, 为 Weibull 分布函数在猕猴桃干燥加工中的广泛应用提供理论支持。

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, 挑选直径大小为 20~30 mm 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, 按要求切成 8 mm 的薄片待用, 去皮后鲜样的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)、功率 (675、1350、2025 W) 条件下对猕猴桃进行干燥试验, 干燥前 2 小时每隔 10 min 测定样品的质量, 而后两小时每隔 20 min 测定样品的质量, 然后每隔 30 min 测定样品质量变化直至干基水分含量降到 0.10 (d.b) 时停止试验, 每组试验重复三次, 取均值。

1.4 Weibull 分布函数对干燥曲线进行模拟

在干燥过程中, 用水分比 (MR) 来表示其水分含量的变化, 具体的意义是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; M_0 -样品的初始干基含水率
干燥速率可用公式(2)表示:

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

注: DR-干燥速率, g/(g·min); $M_{t+\Delta t}$ -样品时刻的 $t+\Delta t$ 干基含水率; M_t - t 时刻的干基含水率; Δt -相邻 2 次测量的时间间隔, min。

菲克扩散方程可以用来描述物料降速干燥特性, 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:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (3)$$

注: D_{eff} -有效水分扩散系数, (m^2/s); L-样品厚度的一半, m; t-干燥时间, min。

对于长时间的干燥, 上式可简化为如下方程:

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

两边取对数便可化为如下等式:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (5)$$

通过等式(5)便可计算出 D_{eff} 。

Weibull 分布函数由公式(6)^[6]表示:

$$MR = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (6)$$

注: 猕猴桃在 t 时刻的水分比由尺度参数 α 和形状参数 β 来进行确定。尺度参数 α 表示干燥过程中的速率常数, min, 其值大约等于将物料由初始水分含量 M_0 干燥至平衡水分 M_e 过程完成 63% 时所需的时间^[6]。形状参数 β 与物料在传质过程中开始阶段的速率有关, 其值越小表示物料在起始阶段的干燥速率越大。

试验得到的数据用 Origin 8.0 进行数据拟合回归分析,并用决定系数 R^2 、卡方检验值 χ^2 和均方根误差 RMSE 来评价模型拟合的好坏,其表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-n} \quad (8)$$

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

注: R^2 值越大、 χ^2 和 RMSE 越小,说明模型的拟合性越好^[3]。 $MR_{exp,i}$ 为干燥试验实测的第 i 个水分比; $MR_{pre,i}$ 为模型预测的第 i 个水分比; N 为试验测定数据的个数。

1.5 数据处理与分析

采用 Origin 8.0 进行数据拟合回归分析及图的绘制。

2 结果与分析

2.1 猕猴桃中短波红外干燥动力学曲线

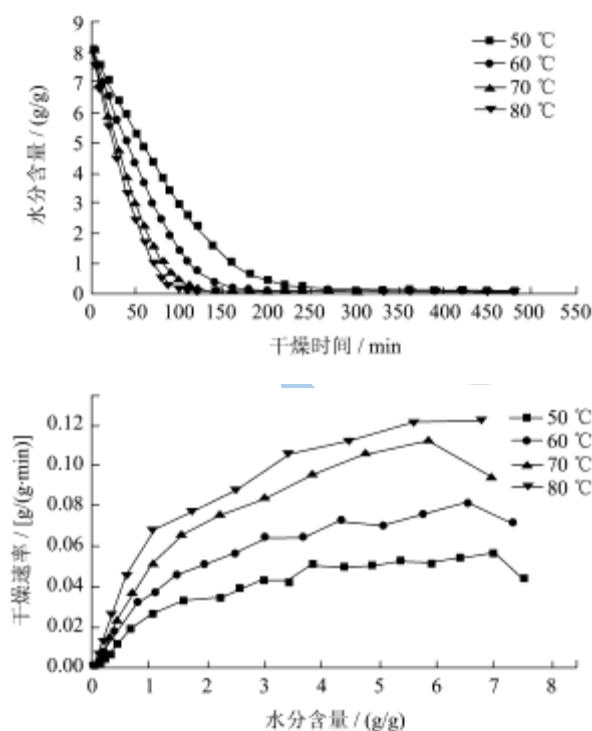


图 1 不同干燥温度对水分含量和干燥速率的影响
Fig.1 Effect of drying temperature on the moisture content and drying rate

注:干燥功率为 1350 W。

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和薄荷叶的红外干燥过程^[10-11]。其可能原因是当采用红外对物料进行干燥时,红外辐射能穿至物料内部,使红外能转化为热能。水蒸汽蒸发需要的压力通常受干燥温度和水分含量两个因素共同制约。红外功率越大,物料吸收红外能转化为热能的能量越大,物料的表面温度越高,提高物料内部水分蒸发的压力差,从而加快干燥速率,缩短干燥时间。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加速,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。

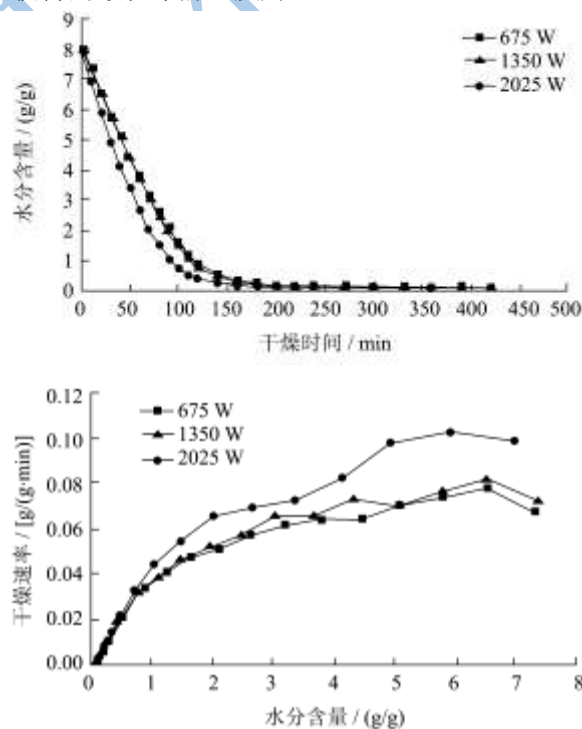


图 2 不同干燥功率对水分含量和干燥速率的影响
Fig.2 Effect of power level on the moisture content and drying rate

注:干燥温度为 60 °C。

图 2 为干燥温度 60 °C,干燥功率对猕猴桃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^[12-13]。从图2干燥速率曲线看出,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,通过采用方差分析研究干燥温度和红外功率对干燥时间的影响分析,得知在

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 利用 Weibull 分布函数模拟干燥曲线

2.2.1 尺度参数 α 的物理意义和影响因素

表1 Weibull 分布函数模型猕猴桃中短波红外干燥结果

Table 1 Results of modeling of med-and short-wave infrared radiation drying of kiwifruit slices by Weibull distribution function

模型	干燥温度/°C	干燥功率/W	尺度参数 α /min	形状参数 β	χ^2	RMSE	R^2
Weibull	50	675	118.7±1.06	1.32±0.023	1.99±0.51	0.0052	0.99
	60	675	72.18±0.69	1.37±0.028	1.95±0.15	0.0045	0.99
	70	675	50.64±0.39	1.42±0.023	0.98±0.32	0.0017	0.99
	80	675	42.84±0.45	1.44±0.032	1.56±0.69	0.0019	0.99
	50	1350	99.22±0.76	1.37±0.022	1.46±0.20	0.0035	0.99
	60	1350	68.94±0.64	1.38±0.028	1.78±0.13	0.0036	0.99
	70	1350	49.46±0.44	1.39±0.026	1.24±0.47	0.0021	0.99
	80	1350	43.07±0.59	1.39±0.040	2.62±0.96	0.0031	0.99
	50	2025	88.06±0.84	1.32±0.026	2.05±0.12	0.0049	0.99
	60	2025	54.17±0.59	1.30±0.029	1.92±0.42	0.0042	0.99
	70	2025	42.29±0.49	1.34±0.031	1.71±0.74	0.0027	0.99
	80	2025	35.87±0.39	1.37±0.031	1.36±0.24	0.0016	0.99

利用 Weibull 分布函数对不同干燥条件下的猕猴桃的中短波红外干燥的 MR 数据进行分析,结果见表1。由表可知, R^2 均值高达 0.99, χ^2 和 RMSE 的均值分别为 1.72×10^{-4} 、0.0033, 模型的拟合值与试验值的对比如图3所示,由图可以看出,试验值与预测值的拟合性较好。因此 Weibull 分布函数能够较好的模拟猕猴桃切片在不同中短波红外干燥条件下的水分比的变化规律。

由表1可以看出,不同干燥条件下分布函数中的尺度参数 α 值不同。在红外功率一定时,尺度参数 α 值随着干燥温度的升高而减小,如在功率为 1350 W 时,随着干燥温度从 50 °C 升高到 80 °C,尺度参数 α 由 99.22 min 减小到 43.07 min, Corzo 等^[7]在研究芒果的热风干燥和 Miranda 等^[6]芦荟的对流干燥也发现干燥温度越高,尺度参数 α 值越小;当干燥温度在 60 °C,随着红外的功率从 675 W 升高到 2025 W,尺度参数 α 由 72.18 min 减小到 54.17 min。可见提高干燥温度和红外功率可以缩短干燥时间,提高干燥效率,这与图1和图2的干燥水分变化曲线图表述是一致的。

2.2.2 形状参数 β 的物理意义和影响因素

由表1可以看出,不同干燥条件下的形状参数 β 值的范围在 1.30 到 1.44 之间,干燥条件不同,其值的大小也不同,但干燥参数对其影响很小, Corzo 等^[7]在研究芒果的热风干燥也发现类似结果。此外,还可

看出不管干燥温度和红外功率如何变化,形状参数 β 值均大于 1, 而由 Bantle 等^[14]研究表明:形状参数 β 值在 0.3~1 之间时,说明物料的干燥过程是由内部水分扩散控制,即表现的是降速干燥的特点;形状参数 β 值大于 1 时,干燥曲线呈“Z 字”形态,表示物料在干燥前期存在升速阶段,即干燥速率出现先升高而降低的形态。因此,可以看出猕猴桃中短波红外在干燥前期有一个滞后阶段,干燥过程并不是完全由内部水分扩散控制,这与图1和图2的干燥速率曲线图的分析是一致的。干燥前期,物料表面吸收的红外能,并快速转化为热能,从而使干燥速率增大;随着干燥的进行,表面被干透,能量渗入物料内部,干燥速率减慢。

2.3 猕猴桃有效扩散系数的计算

干燥过程中水分迁移是一个十分复杂的过程,其可能包括毛细管流动、蒸汽扩散以及液体扩散等多种现象共同作用的结果。为了综合考虑这些因素,通过试验方法来测量和计算干燥过程中的水分有效扩散系数,对描述物料干燥过程特征及优化干燥工艺均有很重要的意义。作为常用的 Fick 第二定律,其缺陷是整个干燥过程必须始终处于降速干燥过程,但通过将 Weibull 分布函数应用在干燥工艺中就可以估算出过程的水分有效扩散系数 D_{cal} , 且对水分迁移特点可不

计, 其计算公式^[5-7]如下:

$$D_{cal} = \frac{r^2}{\alpha} \quad (10)$$

注: D_{cal} 表示干燥过程中的估算的水分有效扩散系数, m^2/s ; r 表示猕猴桃的体积等效半径, 在本实验中其值约为

0.0275m; α 表示 Weibull 分布函数中尺度参数, min.

$$D_{eff} = \frac{D_{cal}}{R_g} \quad (11)$$

注: D_{eff} 表示干燥过程中的水分有效扩散系数, m^2/s ; R_g 是一个与几何尺寸有关的常数。

表 2 不同干燥条件下猕猴桃中短波红外干燥水分有效扩散系数

Table 2 Moisture effective diffusivity of kiwifruit slices under different drying conditions

干燥功率/W	干燥温度/°C	估算的水分有效扩散系数 D_{cal}	水分有效扩散系数 D_{eff}	几何参数
675	50	$(1.06 \pm 0.52) \times 10^{-7}$	$(3.40 \pm 0.65) \times 10^{-9}$	31.24 ± 0.13
675	60	$(1.75 \pm 0.25) \times 10^{-7}$	$(4.08 \pm 0.67) \times 10^{-9}$	42.84 ± 0.54
675	70	$(2.49 \pm 0.76) \times 10^{-7}$	$(7.13 \pm 0.20) \times 10^{-9}$	34.89 ± 0.32
675	80	$(2.94 \pm 0.14) \times 10^{-7}$	$(1.22 \pm 0.14) \times 10^{-8}$	24.06 ± 0.19
1350	50	$(1.27 \pm 0.21) \times 10^{-7}$	$(4.00 \pm 0.40) \times 10^{-9}$	31.74 ± 0.23
1350	60	$(1.83 \pm 0.56) \times 10^{-7}$	$(5.67 \pm 0.67) \times 10^{-9}$	32.27 ± 0.43
1350	70	$(2.55 \pm 0.35) \times 10^{-7}$	$(7.51 \pm 0.30) \times 10^{-9}$	33.93 ± 0.21
1350	80	$(2.93 \pm 0.41) \times 10^{-7}$	$(1.26 \pm 0.23) \times 10^{-8}$	23.22 ± 0.77
2025	50	$(1.43 \pm 0.76) \times 10^{-7}$	$(4.70 \pm 0.86) \times 10^{-9}$	30.48 ± 0.43
2025	60	$(2.33 \pm 0.41) \times 10^{-7}$	$(6.74 \pm 0.12) \times 10^{-9}$	34.54 ± 0.82
2025	70	$(2.98 \pm 0.32) \times 10^{-7}$	$(7.81 \pm 0.33) \times 10^{-9}$	38.15 ± 0.58
2025	80	$(3.51 \pm 0.73) \times 10^{-7}$	$(1.30 \pm 0.62) \times 10^{-8}$	27.11 ± 0.35

猕猴桃在不同的干燥条件下的水分有效扩散系数结果见表 2。由公式(10)和(11)计算得到, 干燥过程的估算水分有效扩散系数 D_{cal} 在 $1.06 \times 10^{-7} \sim 3.51 \times 10^{-7} m^2/s$ 之间变化, 此外, 由表中数据可以得到, 估算水分有效扩散系数随着干燥温度和红外功率的升高而增大。而由图 1 和图 2 的干燥速率曲线图可以看出, 猕猴桃切片的中短波红外干燥是一个由降速阶段占主导的内部水分扩散控制过程, 可直接运用公式(5)计算其水分有效扩散系数, 其值见表 2, 由表可以看出, 干燥过程的猕猴桃切片的水分有效扩散系数随着干燥温度和功率的升高而升高。此外通过计算还发现, 几何参数 R_g 值, 作为与物料几何尺寸有关的常数, 其值的变化趋势并不随着水分有效扩散系数的变化趋势相关。

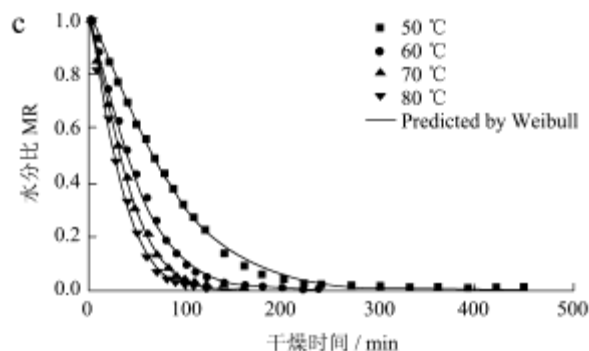
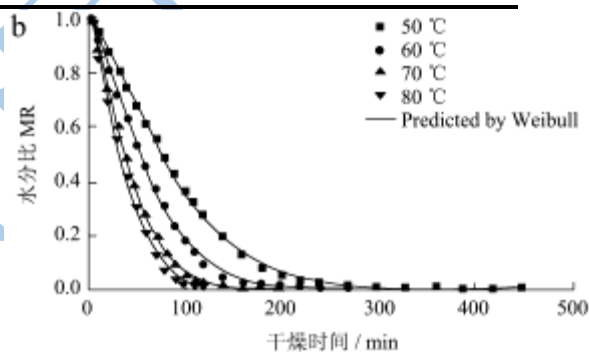
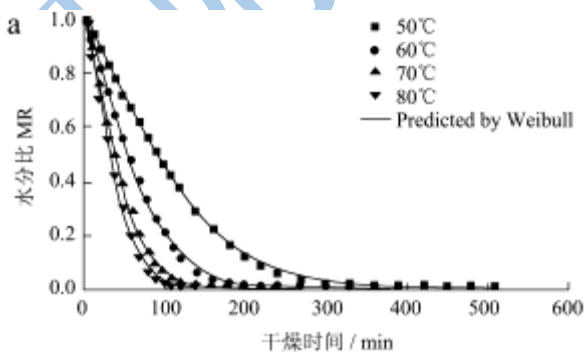


图 3 不同干燥条件下 Weibull 分布函数预测值与试验值比较

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

注: a: 675 W, b: 1350 W, c: 2025 W.

2.4 干燥活化能的计算

干燥活化能表示的是干燥过程中脱除单位摩尔的水分所需的启动能量，其值越大表明其越难干燥。由于物料的水分有效扩散系数和干燥温度的关系可以用阿伦尼乌斯（Arrhenius equation）表示为：

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right] \quad (12)$$

注：D₀-物料中的扩散系数，为定值，m²/s；E_a-物料的干燥活化能，KJ/mol；R-气体摩尔常数，其值为8.3141J/(mol·K)；T-物料的干燥温度，℃

将公式(11)代入到公式(12)中，然后再取对数，即得到：

$$\ln D_{\text{cal}} = \ln R_g + \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T+273.15)} \quad (13)$$

由等式(13)可知水分有效扩散系数的自然对数 ln D_{cal} 与 1/(T+273.15)呈线性关系，其斜率为-E_a/R，二者的关系如下图所示。

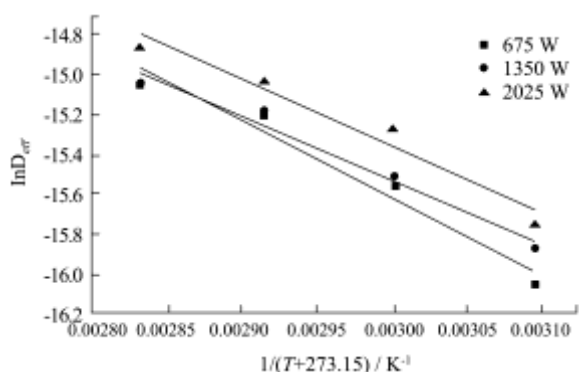


图4 水分有效扩散系数与干燥温度的关系曲线

Fig.4 The relation curves of moisture effective diffusivity and drying temperatures

其在干燥功率为 675、1350 和 2025 W 下的直线回归方程分别为

$$Y = -3915.10X - 3.87541 (R^2 = 0.94792)$$

$$Y = -3249.55X - 5.78481 (R^2 = 0.96188)$$

$$Y = -3376.72X - 5.2333 (R^2 = 0.92923)$$

经计算得到其活化能分别为 32.55、27.016 和 28.074 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 32.55、27.02 和 28.07 KJ，说明在一定温度范围内，干燥功率越大，单位时间内红外能转化为热能值越高，因而除去 1 mol 水分，克服的阻力越小。而当功率为 2025 W 时，活化能比其他功率下较高，可能原因是物料内部结构已经发生变化，且表面也发生一定的硬化，导致干燥脱水的阻力加大。

3 结论

3.1 Weibull 分布函数可以用来描述猕猴桃切片中短波红外干燥过程。

3.2 尺度参数 α 与干燥温度和干燥功率均有关，尺度参数 α 随着干燥温度和功率的升高而降低；而形状参数 β 随着干燥参数的变化很小。

3.3 由尺度参数 α 计算出猕猴桃切片在中短波红外干燥过程中的估算水分有效扩散系数 D_{cal}，其值在 1.06×10⁻⁷~3.51×10⁻⁷ m²/s，根据阿伦尼乌斯计算出其在功率为 675、1350 和 2025 W 时，其值分别为 32.55、27.02 和 28.07 kJ/mol。

3.4 此研究为利用 Weibull 分布函数对猕猴桃中短波红外干燥模拟提供理论支撑。

参考文献

- [1] 林喜娜,王相友.苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价[J].农业机械学报,2010,41(6):128-132
LIN Xi-na, WANG Xiang-you. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 128-132
- [2] 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(3): 282-286
- [3] Wang Z, Sun J, Chen F, et al. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 536-544
- [4] Cihan A, Kahveci K, Hachafizoğlu O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 293-298
- [5] Uribe E, Vega-Gálvez A, Di Scala K, et al. Characteristics of convective drying of pepino fruit (*Solanum muricatum* Ait.): application of weibull distribution [J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(8): 1349-1356
- [6] Miranda M, Vega-Gálvez A, García P, et al. Effect of temperature on structural properties of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel and Weibull distribution for modelling drying process [J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 88(2): 138-144
- [7] Corzo O, Bracho N, Pereira A, et al. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 2023-2028
- [8] 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 [A]. The 13th national infrared heating and infrared medical development seminar papers and abstract sets [C]. 2011
- [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 Bioproducts Processing, 2009, 87(4): 247-253
- [11] Ertekin C, Heybeli N. Thin-layer infrared drying of mint leaves [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2013
- [12] Doymaz İ. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(6): 760-766
- [13] Kocabiyik H, Tezer D. Drying of carrot slices using infrared radiation [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(5): 953-959
- [14] Bantle M, Kolsaker K, Eikevik T M. Modification of the Weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food [J]. Drying Technology, 2011, 29(10): 1161-1169