

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.058

油茶籽热风干燥动力学研究

王凤贺¹ 丁冶春^{2,3} 陈鹏皋¹ 谢为俊¹ 李小强¹ 杨德勇¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 赣南医学院药学院, 赣州 341000;
3. 赣南医学院赣南油茶产业开发协同创新中心, 赣州 341000)

摘要: 为研究油茶籽热风干燥特性,探讨热风温度、初始干基含水率对油茶籽干燥速率的影响,在不同初始干基含水率、不同热风温度条件下分别对油茶籽进行干燥,并比较了9种数学模型在油茶籽热风干燥中的适用性。结果表明,油茶籽热风干燥过程并没有出现恒速干燥段,干燥主要发生在降速干燥阶段。物料初始干基含水率、温度是影响干燥的主要因素,初始干基含水率越低、干燥温度越高,干燥到目标含水率所用时间越短。干燥过程中,有效水分扩散系数随温度升高而增大,热风温度从50℃升高到80℃,其有效水分扩散系数由 $1.313\ 2\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 增大到 $3.922\ 3\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$,油茶籽的干燥活化能为33.619 3 kJ/mol;通过比较决定系数 R^2 、均方根误差 e_{RMSE} 以及卡方检验值 χ^2 得出,Lewis模型为描述油茶籽热风薄层干燥的最优模型,预测值与试验值的均方误差为1.36%,最大相对误差小于4%,表明模型预测的干燥曲线和试验干燥曲线一致性较好。

关键词: 油茶籽; 热风干燥; 干燥特性; 干燥模型

中图分类号: TQ021.4; S339.3⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)S0-0426-07

Investigation on Hot-air Drying of *Camellia oleifera* Seeds

WANG Fenghe¹ DING Yechun^{2,3} CHEN Pengxiao¹ XIE Weijun¹ LI Xiaoqiang¹ YANG Deyong¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Pharmacy, Gannan Medical University, Ganzhou 341000, China

3. Collaborative Innovation Center for Gannan Oil-tea Camellia Industrial Development, Gannan Medical University, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The drying characteristics of *Camellia oleifera* seeds and the internal moisture diffusion coefficient at different drying temperatures were studied. According to the pre-test results, the drying characteristics of *Camellia oleifera* seeds were investigated at different air temperatures and different initial moisture contents. The empirical relationships between the natural logarithmic $\ln M_R$ and drying time, moisture effective diffusion coefficient D_{eff} and drying air temperature was established. The applicability of nine mathematical models in hot air drying of *Camellia oleifera* seeds was compared. The results showed that there was no apparent constant-rate drying period in the hot-air drying process, and moisture removal mainly occurred in the falling-rate drying period. The initial moisture content and hot-air temperature were the main factors that affected the drying process. The lower the initial moisture content was, the higher the drying temperature was, the shorter the drying time to the target moisture content was. In the process of drying, the effective moisture diffusion coefficient was increased with the increase of temperature. When the hot-air temperature was increased from 50℃ to 80℃, the coefficient was increased from $1.313\ 2\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ to $3.922\ 3\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ and the activation energy was 33.619 3 kJ/mol. The results of comparing the values of the correlation coefficient R^2 , the root mean square error e_{RMSE} and the chi-square χ^2 showed that the Lewis model was the optimal model for describing the hot-air drying of *Camellia oleifera* seeds and the predicted drying characteristic curve fitted well with experimental results obtained.

Key words: *Camellia oleifera* seeds; hot-air drying; drying characteristics; drying model

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 赣南油茶产业开发协同创新中心开放基金项目(YP201611)

作者简介: 王凤贺(1991—),男,博士生,主要从事农产品干燥研究,E-mail: fhwang@cau.edu.cn

通信作者: 杨德勇(1970—),男,副教授,博士生导师,主要从事农产品干燥理论与技术研究,E-mail: ydy@cau.edu.cn

0 引言

我国油茶种类丰富,分布面积广。据统计,目前我国油茶栽培面积已达到 400 万 hm²,年产油茶籽 173 余万 t,其中以湖南、江西两省的产量最多,占全国产量的 60% 以上^[1]。茶油营养丰富,胆固醇含量少,耐贮藏,富含不饱和脂肪酸,其不饱和脂肪酸质量分数在 90% 以上^[2]。

干燥是油茶籽加工利用的第 1 道工序,对油茶籽品质、出油率和油脂品质有重要影响^[3-4]。目前,油茶籽的干燥大多仍采用自然晾晒,干燥耗时长,劳动强度大,且受气候条件影响。目前常用的食品干燥方法主要是空气对流干燥^[5]。热风干燥是目前国内农产品应用最广泛的干燥方式,对于热风干燥特性的描述,国内外提出了许多实用模型。IBRAHIM^[6]对黄秋葵进行热风薄层干燥试验探究,结果表明 Page 模型拟合效果最好;DEMIRAY 等^[7]研究了不同干燥温度对番茄片干燥动力学的影响,得出 Page、Modified Page 均能较好描述番茄片热风干燥过程。IBRAHIM 等^[8]选用 5 种模型对甜樱桃的薄层热风干燥进行了研究,结果表明 Page 模型比其他模型更能反映其干燥特性。尹晓峰等^[9]通过比较 10 种数学模型在稻谷热风干燥中的适用性得出,在最优干燥工艺下,最佳数学模型为 Page 模型;师建芳等^[10]比较了 7 种常见数学模型在豇豆热风干燥中的适用性,通过各参数值对比,表明 Page 是描述豇豆隧道式热风干燥的最优模型。李菁等^[11]研究紫薯热风干燥特性及数学模型,得出干燥温度、物料铺料密度对紫薯热风干燥的速率有较大影响,而热风风速对干燥速率的影响较小,紫薯热风干燥符合 Page 模型。王雅娇等^[12]以海湾扇贝柱为原料,研究了热风温度、风速对其干燥速率的影响,并进一步采用非线性回归分析比较 5 种薄层干燥模型的拟合程度,确定扇贝柱热风干燥最适干燥模型为 Logarithmic 模型。热风干燥虽然在以往的油茶籽研究中也提及^[13-14],但其关注重点多在干燥方式对后期贮藏阶段的影响,并未对热风干燥特性做深入探究。为研究油茶籽的干燥特性,本文分析油茶籽在不同热风干燥温度下的内部水分扩散系数,并比较 9 种不同干燥模型对油茶籽热风干燥特性的适用性,以期对油茶籽干燥提供理论指导与数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用油茶籽采购于江西省赣州市,人工去蒲,获取均匀、饱满的油茶籽置于 4℃ 恒温冰箱。试

验开始前,将物料取出放置至室温(20℃)。

1.2 主要仪器设备

DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱,温度精度 ±1℃,上海精宏实验设备有限公司;AL104 型电子天平,准确度等级 I,梅特勒-托利多仪器有限公司;BCD-226SK A 型冰箱,青岛海尔股份有限公司。

1.3 干燥参数的计算方法

1.3.1 初始干基含水率

根据 GB/T 14489.1—2008《油料 水分及挥发物含量测定》测定油茶籽的初始干基含水率^[15]。

1.3.2 干基含水率

干基含水率计算公式为

$$W_t = \frac{M_t - M_g}{M_g} \times 100\% \tag{1}$$

式中 W_t ——干燥时间 t 时油茶籽干基含水率, %
 M_t ——干燥时间 t 时油茶籽的质量, g
 M_g ——油茶籽干物质质量, g

1.3.3 水分比

水分比计算公式^[16]为

$$M_R = \frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e} \tag{2}$$

式中 W_0 ——物料初始干基含水率, %
 W_e ——物料干燥平衡干基含水率, %
平衡干基含水率较小,此处水分比可简化为^[17]

$$M_R = \frac{W_t}{W_0} \tag{3}$$

1.3.4 干燥速率

干燥速率计算公式为

$$U_t = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t M_g} \tag{4}$$

式中 U_t ——干燥时间 t 时油茶籽干燥速率, g/(g·min)
 Δt ——两次取样间隔时间, min

1.4 有效水分扩散系数 D_{eff}

Fick 第二定律可以用来描述油茶籽干燥过程水分扩散特性,干燥过程中忽略体积收缩,在一定干燥温度下扩散系数为常数,油茶籽有效水分扩散系数满足公式^[18]

$$M_R = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r_e^2}\right) \tag{5}$$

式中 n ——试验样本数量
 D_{eff} ——水分扩散系数, m²/s
 r_e ——油茶籽的体积等量半径, mm

在式(5)中,右边系列解中第 1 项占主导地位,于是式(5)两边进行对数转换,线性关系式为

$$\ln M_R = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r_e^2} \tag{6}$$

干燥过程中水分比的自然对数 $\ln M_R$ 与干燥时间 t 呈线性变化关系,且其斜率 k 为 $-\frac{\pi^2 D_{eff}}{r_e^2}$ 。对时间 t 及与其对应的 $\ln M_R$ 数据点进行线性回归分析,可求得斜率 k 。从而可得不同干燥温度下的有效水分扩散系数

$$D_{eff} = -\frac{r_e^2}{\pi^2} k$$

(7)

将油茶籽近似看作球体,则球体的半径即为油茶籽的体积等量半径值,体积等量半径满足公式

$$\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 L = \frac{4}{3} \pi r_e^3$$

(8)

式中 D ——油茶籽厚度,mm

L ——油茶籽长度,mm

1.5 干燥活化能

干燥活化能是在干燥过程中除去单位物质的量的水分所需的能量,物料的干燥活化能越大代表其越难以进行干燥。根据 Arrhenius 方程建立有效扩散系数、温度和活化能之间的关系式,计算活化能 E_a [19-21],即

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

(9)

式中 D_0 ——物料中的扩散基数, m^2/s

E_a ——物料的干燥活化能, kJ/mol

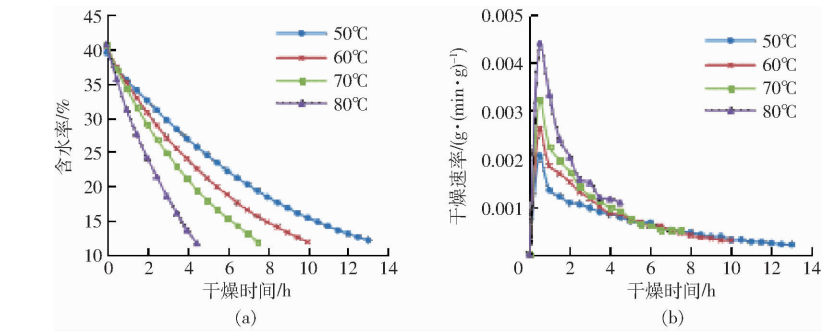


图 1 油茶籽在不同热风温度条件下的干燥特性曲线

在风速恒定、初始干基含水率为 40% 的条件下,研究热风温度 50~80℃ 时对干燥特性的变化规律。由图 1 可看出,油茶籽的干燥特性曲线相对光滑,随着干燥时间的延长,含水率呈下降趋势,且温度越高,含水率下降趋势越明显。在不同热风温度下,温度越高,干燥速率越快,干燥到目标含水率所用时间越短。但热风温度过高会使油茶籽出现熟化现象,影响其干燥品质。热风温度是决定物料干燥速率的主要因素,热风温度越高,物料干燥过程中所能达到的最高干燥速率越大 [22]。在干燥初始阶段,干燥速率随热风温度升高而加快;在干燥中后期,不同温度的干燥速率相差较小,说明此时温度已不是

R ——理想气体常数,取 $8.314 J/(mol \cdot K)$

T ——物料的干燥风温,℃

两边同时取自然对数,可得

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T + 273.15}$$

(10)

有效水分扩散系数的自然对数 $\ln D_{eff}$ 与 $1/(T + 273.15)$ 呈线性关系,其斜率 k 为 $-E_a/R$ 。对 $\ln D_{eff}$ 和与其对应的 $1/(T + 273.15)$ 值进行线性回归分析,可求得斜率 k 。从而可得

$$E_a = -kR$$

(11)

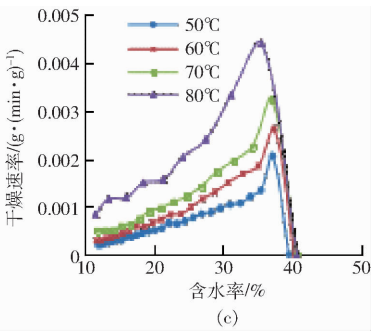
1.6 数据处理

采用 Origin 8.0、Excel 分析软件对数据进行处理,将数学模型方程与试验数据进行多元非线性回归拟合,采用 SPSS 17.0 软件进行模型待定参数的多元线性逐步回归。使用决定系数 R^2 、均方根误差 e_{RMSE} 、卡方检验值 χ^2 来评价数学模型的预测值与试验值的拟合程度,其中 R^2 越大, e_{RMSE} 、卡方检验值 χ^2 越小,则拟合度越好。

2 结果与讨论

2.1 不同干燥温度条件下油茶籽的热风干燥特性

图 1 显示的是在不同的温度下,含水率-干燥速率-干燥时间三者之间的关系。



影响干燥速率的主要因素。这是因为在干燥初期油茶籽中含有较多自由水,内部水分扩散到油茶籽表面速率最接近物料表面水分蒸发到热空气中的速率,扩散速率受热风温度影响较大;在干燥中后期,油茶籽含水率降低,自由水含量减少,内部水分扩散到物料表面速率远小于物料表面水分蒸发到热空气中的速率,此阶段物料内部含水率相对表面较高,干燥速率主要取决于内部水分传递机制,受温度影响相对较小。由图 1c 可看出,整个干燥阶段只有降速而没有恒速段,说明内部水分扩散是油茶籽的热风干燥的主导因素,这与大多数物料干燥特性相似 [23-26]。

2.2 不同初始含水率条件下油茶籽的热风干燥特性

在风速恒定、热风温度为 60℃ 的条件下,研究油茶籽初始干基含水率为 40%、30%、20% 对干燥特性的影响。图 2 为油茶籽在不同初始干基含水率时的干燥特性曲线。如图 2a 所示,油茶籽的初始含水率越低,干燥到目标含水率时的水分变化量越小,

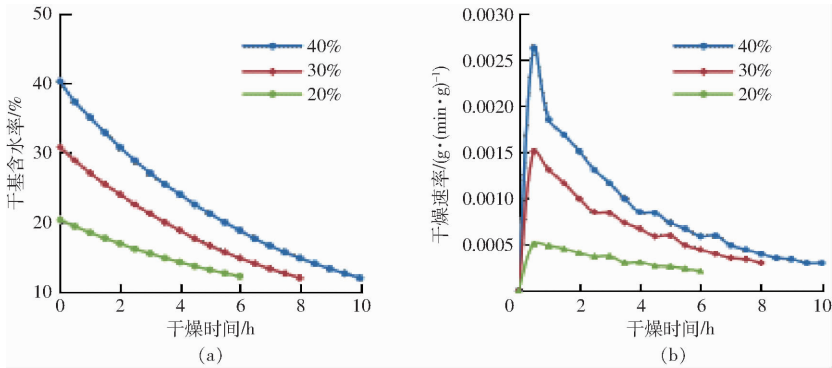


图 2 油茶籽在不同初始干基含水率下的干燥特性曲线

Fig.2 Drying characteristic curves of *Camellia oleifera* seed at different initial moisture contents

2.3 油茶籽的有效水分扩散系数

油茶籽在整个干燥阶段只有降速段,没有恒速段,因此整个干燥过程可按降速干燥处理。如图 3 所示,油茶籽内部湿分迁移遵循 Fick 第二定律,油茶籽薄层干燥过程水分比的自然对数 $\ln M_R$ 与干燥时间 t 呈线性关系,数据经 Origin 8.0 处理可得斜率 k 。将所得斜率 k 代入式(7)中,可得不同干燥温度下的有效水分扩散系数。

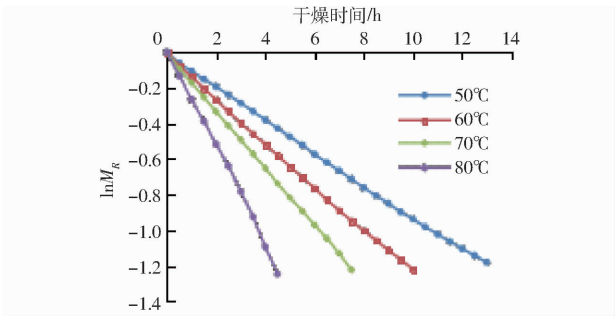


图 3 $\ln M_R$ 与时间 t 的关系曲线

Fig.3 Relationship curves between $\ln M_R$ and t

如表 1 所示,在风速恒定、初始干基含水率 40% 条件下,热风温度在 50 ~ 80℃ 时油茶籽有效水分扩散系数在 $1.3132 \times 10^{-9} \sim 3.9223 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内,水分有效系数随温度的升高而增大。50 ~ 70℃ 时有效水分扩散系数较接近,当干燥温度由 70℃ 升高到 80℃ 时,扩散系数增幅明显变大,80℃ 时的有效水分扩散系数约为 50℃ 时的 3 倍。分析其原因,当温度升高,水分子能量提高,跃迁频率增大,导致扩散系数随温度升高而增大。温度升高,水分子跃迁距离增大,也促使扩散系数增大。此外,由

所用时间也越少;由图 2b 可看出,油茶籽在不同初始干基含水率下的热风薄层干燥中均没有出现明显的恒速干燥段,干燥主要发生在降速阶段,且在干燥前期速率较快,干燥后期逐渐趋缓,初始干基含水率越高,此现象越明显。说明初始含水率主要影响前期的干燥速率,对油茶籽干燥后期的速率影响较小。

式(9)也可看出,有效水分扩散系数与温度间存在指数型的正相关关系,因此会出现高温时随温度升高,有效扩散系数随温度升高的增幅比低温时大。

表 1 不同温度下油茶籽内部有效水分扩散系数

Tab.1 Effective moisture diffusion coefficient in *Camellia oleifera* at different temperatures

温度/℃	斜率 k	R^2	有效水分扩散系数 $D_{eff}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
50	-2.53936×10^{-5}	0.99904	1.3132×10^{-9}
60	-3.38411×10^{-5}	0.99925	1.7496×10^{-9}
70	-4.46235×10^{-5}	0.99985	2.3076×10^{-9}
80	-7.58474×10^{-5}	0.99752	3.9223×10^{-9}

2.4 油茶籽的干燥活化能

由图 4 可得有效水分扩散系数的自然对数 $\ln D_{eff}$ 与 $1/(T + 273.15)$ 的线性函数为: $Y = -4043.7X - 7.9933$,其决定系数 R^2 为 0.9635,拟合效果较好。将拟合得到的斜率 k 代入式(11),计算得油茶籽热风干燥活化能为 33.6193 kJ/mol。

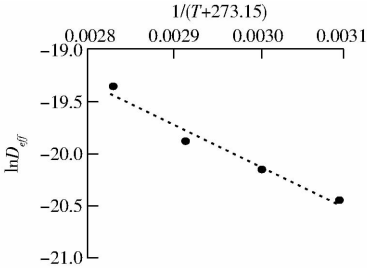


图 4 有效水分扩散系数与温度的关系曲线

Fig.4 Relationship curves of effective diffusion coefficient and temperature

3 油茶籽热风薄层干燥模型

3.1 干燥模型的选择与计算

物料干燥是一个复杂的非稳态传热传质过程。由油茶籽的干燥特性试验结果可知,热风温度对油茶籽干燥特性的影响最显著。运用表 2 中的 9 种经验、半经验模型^[27]对初始干基含水率为 40.66% 的油茶籽在风速恒定、不同热风温度下得到的试验数据进行拟合。

经计算,9 个模型的参数值及 R^2 、 e_{RMSE} 、 χ^2 如表 3 所示。各模型的 R^2 不小于 0.813 1, e_{RMSE} 、 χ^2 值分别

表 2 油茶籽薄层干燥数学模型
Tab.2 Mathematical model for thin layer drying of

Camellia oleifera seed		
模型序号	模型名称	模型表达式
1	Lewis	$M_R = \exp(-Kt)$
2	Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-Kt)$
3	Page	$M_R = \exp(-Kt^n)$
4	Modified Page	$M_R = e^{-(Kt)^n}$
5	Wang and Singh	$M_R = 1 + bt + at^2$
6	Logarithmic	$M_R = a \exp(-Kt) + c$
7	Two-term	$M_R = ae^{-Kt} + be^{-K_1t}$
8	Diffusion approach	$M_R = ae^{-Kt} + (1-a)e^{-Kbt}$
9	Werma	$M_R = ae^{-Kt} + (1-a)e^{-gt}$

表 3 油茶籽热风干燥数学模型及其拟合结果
Tab.3 Mathematical models and fitting results for Camellia oleifera seed hot-air drying

模型序号	风温/℃	模型参数				决定系数 R^2	均方根误差 e_{RMSE}	卡方值 χ^2
1	50	$K = -0.096$				0.998 2	0.008 81	8.07×10^{-5}
	60	$K = -0.129$				0.999 6	0.001 07	1.29×10^{-4}
	70	$K = -0.166$				0.999 8	0.006 57	4.62×10^{-5}
	80	$K = -0.264$				0.999 7	0.008 49	8.11×10^{-5}
2	50	$K = -0.091$	$a = 1.016\ 5$			0.998 3	0.023 80	5.89×10^{-4}
	60	$K = -0.167$	$a = 0.966\ 8$			0.972 6	0.095 40	1.01×10^{-2}
	70	$K = -0.161$	$a = 1.010\ 0$			0.995 2	0.018 15	1.81×10^{-4}
	80	$K = -0.273$	$a = 0.984\ 0$			0.999 4	0.012 92	2.09×10^{-4}
3	50	$K = 0.102$	$n = 0.961$			0.999 5	0.011 18	1.35×10^{-5}
	60	$K = 0.142$	$n = 1.062$			0.983 6	0.068 59	5.20×10^{-3}
	70	$K = 0.171$	$n = 0.971$			0.999 9	0.002 25	5.86×10^{-6}
	80	$K = 0.257$	$n = 1.028$			0.999 8	0.006 99	6.28×10^{-5}
4	50	$K = 0.0918$	$n = 0.939$			0.999 2	0.005 26	3.01×10^{-5}
	60	$K = 0.125$	$n = 0.940$			0.999 8	0.002 08	4.80×10^{-6}
	70	$K = 0.161$	$n = 0.956$			0.999 7	0.003 19	1.18×10^{-5}
	80	$K = 0.296$	$n = 1.011$			0.972 9	0.033 16	1.47×10^{-3}
5	50	$a = 0.003$	$b = 0.087$			0.999 7	0.003 55	1.31×10^{-5}
	60	$a = 0.005$	$b = 0.118$			0.999 3	0.005 69	3.59×10^{-5}
	70	$a = 0.008$	$b = 0.149$			0.999 2	0.005 92	4.01×10^{-5}
	80	$a = 0.017$	$b = 0.310$			0.813 1	0.144 74	2.62×10^{-2}
6	50	$K = 0.101$	$a = 0.946$	$c = 0.05$		0.999 8	0.003 05	1.05×10^{-5}
	60	$K = 0.144$	$a = 0.916$	$c = 0.08$		0.999 9	0.002 32	6.30×10^{-6}
	70	$K = 0.168$	$a = 0.972$	$c = 0.02$		0.999 8	0.002 65	8.65×10^{-6}
	80	$K = 0.266$	$a = 1.004$	$c = 0$		0.999 8	0.007 85	8.81×10^{-5}
7	50	$K = 0.017$	$K_1 = 0.051$	$a = 0.79$	$b = 0.2$	0.999 7	0.003 42	1.86×10^{-5}
	60	$K = 0.096$	$K_1 = 0.217$	$a = 0.67$	$b = 0.33$	0.999 9	0.001 79	3.97×10^{-6}
	70	$K = 0.148$	$K_1 = 0.262$	$a = 0.02$	$b = 0.15$	0.929 8	0.024 7	8.12×10^{-3}
	80	$K = 0.266$	$K_1 = 0.266$	$a = 0.71$	$b = 0.29$	0.978 2	0.007 86	1.03×10^{-4}
8	50	$K = 3.867$	$a = 0.014$	$b = 0.02$		0.969 9	0.004 46	2.24×10^{-4}
	60	$K = 2.818$	$a = 0.024$	$b = 0.04$		0.947 6	0.004 98	2.90×10^{-5}
	70	$K = 2.819$	$a = 0.015$	$b = 0.06$		0.988 9	0.008 5	7.72×10^{-6}
	80	$K = 2.805$	$a = 0$	$b = 0.09$		0.987 2	0.008 12	9.43×10^{-5}
9	50	$K = 0.049$	$g = 0.116$	$a = 0.27$		0.958 2	0.046 8	2.46×10^{-3}
	60	$K = 0.258$	$g = 0.102$	$a = 0.23$		0.999 9	0.001 95	4.44×10^{-6}
	70	$K = 1.227$	$g = 0.159$	$a = 0.019$		0.999 9	0.001 92	4.68×10^{-6}
	80	$K = 0.265$	$g = 0.265$	$a = 0.72$		0.998 6	0.008 05	9.29×10^{-5}

不大于 0.144 7 和 0.026 2, 其中, Lewis、Page、Modified Page、Logarithmic 模型 R^2 均不小于 0.972 9, e_{RMSE} 、 χ^2 均不大于 0.033 16 和 0.001 47。说明此 4 种模型均能较好描述油茶籽薄层干燥过程水分比的变化情况。不过,在 Page 模型和 Modified Page 模型中,各温度下得到的 n 值均接近于 1,故可将 Page 模型和 Modified Page 模型简化为 $n = 1$ 的形式,即为 Lewis 模型;Logarithmic 模型在各温度下得到的 a 值也均接近于 1, c 值均接近于 0,故 Logarithmic 模型也可简化 $a = 1, c = 0$ 的形式,即为 Lewis 模型。由 Lewis 模型得到的 R^2 均不小于 0.998 2, e_{RMSE} 、 χ^2 均不大于 0.008 81 和 0.000 129,且 4 个模型中 Lewis 形式最简单,参数最少。因此,Lewis 可作为描述油茶籽热风薄层干燥的最优模型。

指数模型中的干燥常数 K 一般是风温和风速的函数,本试验选用的为薄层干燥,设定风速恒定,只认为 K 是热风温度 T 的函数。考虑温度因素一次和二次的作用,设定函数

$$K = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 \tag{12}$$

根据各次试验温度及 Lewis 模型的 K 值,利用 Origin 8.0 软件进行线性回归,得到参数 K 的回归方程

$$K = -0.078\,53 + 0.003\,49T \tag{13}$$

($R^2 = 0.999\,2, P = 0.012\,13$)

将式(13)中的 K 代入 Lewis 模型,可得油茶籽热风干燥 Lewis 模型为

$$M_R = \exp((0.007\,853 - 0.003\,49T)t) \tag{14}$$

3.2 Lewis 模型的验证

为检验得到的回归模型与试验数据的拟合准确度,补充一组试验进行检验,试验条件为:干燥温度 65℃,风速恒定。由得到的 Lewis 模型按上述条件

进行预测,比较水分比 M_R 的试验值和 Lewis 模型的预测值,如图 5 所示。由图可看出,Lewis 模型预测值与试验值一致性较好,整个干燥过程中的均方误差为 1.36%,最大相对误差小于 4%,说明 Lewis 模型能较好地描述油茶籽薄层干燥过程的水分扩散情况。

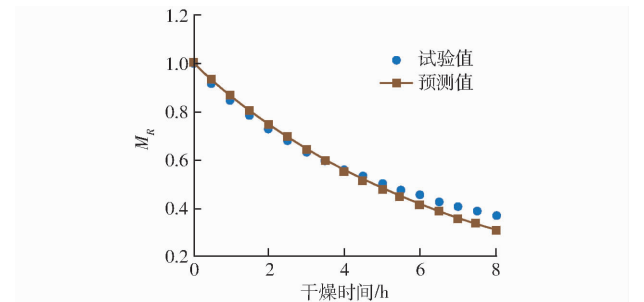


图 5 Lewis 模型的验证
Fig. 5 Validation of Lewis model

4 结论

(1)油茶籽干燥速率受温度影响较大,温度越高,干燥速率越快,在干燥前期水分下降较快,后期水分下降缓慢;初始含水率主要影响油茶籽前期干燥速率,对后期干燥速率影响较小。

(2)由 Fick 定律求出,油茶籽在 50 ~ 80℃ 下的热风干燥的有效水分扩散系数的范围是 $1.313\,2 \times 10^{-9} \sim 3.922\,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,有效水分扩散系数值随温度升高而增大。油茶籽平均干燥活化能为 33.619 3 kJ/mol。

(3)通过 9 种数学模型对试验数据进行拟合分析可知,Lewis 为油茶籽热风薄层干燥的最优拟合模型,且 Lewis 模型的验证结果与预测值较为一致,表明 Lewis 模型能较好地描述油茶籽的薄层热风干燥过程。

参 考 文 献

- 1 张可,钱和. 油茶籽的综合开发利用[J]. 食品科技,2003(4):85-86.
ZHANG Ke, QIAN He. The multipurpose utilization of *Camellia oleifera* seed [J]. Food Science and Technology, 2003(4):85-86. (in Chinese)
- 2 肖志红,陈永忠. 油茶加工利用研究综述[J]. 林业科技开发,2005,19(2):10-13.
XIAO Zhihong, CHEN Yongzhong. A review of the research on the processing and utilization of *Camellia oleifera* [J]. China Forestry Science and Technology, 2005, 19(2):10-13. (in Chinese)
- 3 BELLAGHA S, SAHLI A, FARHAT A, et al. Studies on salting and drying of sardine (*Sardinella aurita*): experimental kinetics and modeling [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3):947-952.
- 4 WANG Zhengfu, SUN Junhong, LIAO Xiaojun, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. Food Research International, 2007, 40(1):39-46.
- 5 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京:科学出版社,2009:3-7.
- 6 IBRAHIM D. Drying characteristics and kinetics of okra [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(3):275-279.
- 7 DEMIRAY E, TULEK Y. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill. cv. Rio Grande) slices in a convective hot air dryer[J]. Heat & Mass Transfer, 2012, 48(5):841-847.
- 8 IBRAHIM D, ISMAIL O. Drying characteristics of sweet cherry [J]. Food & Bioproducts Processing, 2011, 89(1):31-38.
- 9 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.
YIN Xiaofeng, YANG Mingjin, LI Guanglin, et al. Optimization and mathematical modeling of thin layer hot-air drying of rough

- rice[J]. Journal of Food Science, 2017, 38(8):198–205. (in Chinese)
- 10 师建芳, 吴辉煌, 娄正, 等. 豇豆隧道式热风干燥特性和模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 232–240.
SHI Jianfang, WU Huihuang, LOU Zheng, et al. Drying characteristics and model of cowpea in tunnel hot air dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 232–240. (in Chinese)
- 11 李菁, 萧夏, 蒲晓璐, 等. 紫薯热风干燥特性及数学模型[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 90–94.
LI Jing, XIAO Xia, PU Xiaolu, et al. Characteristics and mathematical model of hot-air drying for purple sweet potato[J]. Journal of Food Science, 2012, 33(15): 90–94. (in Chinese)
- 12 王雅娇, 姚思远, 郭洁, 等. 扇贝柱热风干燥工艺及干燥模型的研究[J]. 食品科技, 2014(3): 92–96.
WANG Yajiao, YAO Siyuan, GUO Jie, et al. Hot-air drying process and drying models for scallops[J]. Food Science and Technology, 2014(3): 92–96. (in Chinese)
- 13 邢朝宏, 李进伟, 金青哲, 等. 油茶籽的干燥特性及热风干燥模型的建立[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(3): 38–42.
XING Chaohong, LI Jinwei, JIN Qingzhe, et al. The drying characteristics of *Camellia oleifera* and establishment of hot-air drying model[J]. Journal of the Chinese Cereals Oils Association, 2012, 27(3): 38–42. (in Chinese)
- 14 张喜梅, 吴雪辉, 李昌宝, 等. 油茶籽的热风干燥特性及数学描述[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 116–120.
ZHANG Ximei, WU Xuehui, LI Changbao, et al. Characteristics and mathematical description of hot-air drying[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(8): 116–120. (in Chinese)
- 15 国家质量监督检验检疫总局. 油料水分及挥发物含量测定: GB/T14489.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1–12.
- 16 范君. 圣女果渗透脱水及渗后热风干燥特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
FAN Jun. Study on osmotic dehydration and hot air drying characteristics of cherry tomatoes[D]. Fuzhou: University of Agriculture and Forestry in Fujian, 2013. (in Chinese)
- 17 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 276–281.
ZHANG Qian, Xiao Hongwei, Yang Xuhai, et al. Effects of pretreatment on air impingement drying characteristics and product color for line pepper[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 276–281. (in Chinese)
- 18 DOYMAZ I. Drying kinetics of black grapes treated with different solutions[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(2): 212–227.
- 19 AKGUN N A, DOYMAZ I. Modelling of olive cake thin-layer drying process[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(4): 455–461.
- 20 DOYMAZ I. Air-drying characteristics of tomatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1291–1297.
- 21 MADAMBA P S, DRRISCOLL R H, BUCKLE K A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(1): 75–97.
- 22 关志强, 王秀芝, 李敏, 等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 151–158. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120230&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.030.
GUAN Zhiqiang, WANG Xiuzhi, LI Min, et al. Mathematical modeling of hot-air of thin layer litchi flesh[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 151–158. (in Chinese)
- 23 JANJAI S, PRECOPPE M, LAMLERT N, et al. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis*, Sonn.)[J]. Food & Bioproducts Processing, 2011, 89(3): 194–201.
- 24 HASSANBEYGI S R, AGHBASHLO M, KIANMEHR M H, et al. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying[J]. International Agrophysics, 2009, 23(2): 129–135.
- 25 QUEIROZ, DEANTAS A J, JFIGUEIREDO H, et al. Solar drying of jack fruit almonds[J]. Engenharia Agrícola, 2011, 31(6): 1150–1161.
- 26 吴中华, 李凯, 高敏, 等. 稻谷籽粒内部热湿传递三维适体数学模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 329–334. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180141&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.041.
WU Zhonghua, LI Kai, GAO Min, et al. Three dimensional body-fitted mathematical model of rice kernel in hot air drying process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 329–334. (in Chinese)
- 27 LE A D, JAE W H, DONG H K. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Journal of Stored Products Research, 2011, 47(1): 32–38.