

# 甘蓝型油菜籽热风干燥特性及其数学模型

杨玲<sup>1</sup>, 陈建<sup>1</sup>, 杨屹立<sup>2</sup>, 杨明金<sup>1</sup>, 郭孟报<sup>1</sup>, 兰玉彬<sup>3</sup>

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆北碚 400715) (2. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

(3. 美国农业部农业研究中心, 美国德克萨斯州 77845)

**摘要:** 油菜籽的干燥和储存直接影响种用油菜籽的生理特性和作物产量以及加工用油菜籽的加工特性和制油品质, 为了给油菜籽热风干燥装置设计、工艺和过程控制优化提供基础依据, 本文研究了不同初始含水率、热风温度和风速条件下甘蓝型油菜籽的热风干燥特性, 比较了 10 种数学模型在甘蓝型油菜籽热风干燥中的适用性。结果表明: 油菜籽热风干燥过程没有出现明显的恒速干燥阶段, 干燥主要发生在降速干燥阶段; Page 模型是描述油菜籽干燥特性的最佳数学模型, 由模型预测的干燥特性曲线与实验所得的干燥曲线一致性好; 热风温度是影响油菜籽热风干燥的主要因素, 随着热风温度的升高, 油菜籽的有效水分扩散系数增大, 当热风温度从 45 °C 增加到 65 °C 时, 其有效水分扩散系数由  $3.835 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  增加到  $7.666 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , 油菜籽的干燥活化能为 29.26 kJ/mol。

**关键词:** 干燥特性; 数学模型; 热风干燥; 有效水分扩散系数; 活化能; 油菜籽

文章编号: 1673-9078(2014)8-144-150

## Characteristics and Mathematical Models for Hot-air-dried Rapeseed (*Brassica napus*)

YANG Ling<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, YANG Yi-li<sup>2</sup>, YANG Ming-jin<sup>1</sup>, GUO Meng-bao<sup>1</sup>, LAN Yu-bin<sup>3</sup>

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Beibei 400715, China) (2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China) (3. US Department of

Agriculture, Agricultural Research Service, College Station 77845, USA)

**Abstract:** Drying and storage of rapeseed directly affects its physiological characteristics, potential for breeding, as well as processing characteristics and quality of rapeseed oil produced. In order to provide a technical basis for designing equipment and optimization of process control for hot-air drying of rapeseed, the characteristics of hot-air-dried rapeseed (*Brassica napus*) under different conditions of moisture content, hot air temperature, and air velocities were investigated, and the applicability of 10 mathematical models for the process of hot air-drying rapeseed 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. Of the various models tested, the page model was found to be the best mathematical model for describing the drying characteristics of rapeseed and the predicted drying characteristic curves fitted well with results obtained. Hot air temperature was the main factor that affected the drying process of rapeseed. With the increase of temperature, the effective moisture diffusion coefficient of rapeseed increased. When the hot air temperature increased from 45 °C to 65 °C, the coefficient increased from  $3.835 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  to  $7.666 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  and the activation energy for rapeseed drying was 29.26 kJ/mol.

**Key words:** drying characteristics; mathematical model; hot air drying; effective moisture diffusion coefficient; activation energy; rapeseed

油菜籽是世界第三大植物油和第二大蛋白粉来源, 2012 年全球油菜籽产量为 6480 万 t, 是 1965 年的 12.46 倍<sup>[1]</sup>。我国是油菜籽的生产和消费大国, 长

收稿日期: 2014-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31301575); 重庆市科委自然科学基金项目 (CSTC2012 JJA80027)

作者简介: 杨玲 (1974-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 农产品储藏与保鲜

通讯作者: 杨明金 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农业系统工程

江流域是我国油菜籽的主产区, 以种植甘蓝型油菜为主<sup>[2]</sup>。油菜籽的干燥和储存直接影响种用油菜籽的生理特性和作物产量以及加工用油菜籽的加工特性和制油品质<sup>[3]</sup>。由于收获时油菜籽的含水率较高, 收获期又多为高温多雨的梅雨季节, 收储条件很难控制, 常导致油菜籽的发热、酸败及霉变<sup>[4]</sup>。为了保证油菜籽的收储质量, 中共中央、国务院 2013 年以一号文件形式启动油菜籽临时收储政策, 2014 年的中央一号文件指出继续执行油菜籽临时收储政策。

热风干燥是目前国内应用最广泛的油菜籽干燥方法，它以加热的方式去除油菜籽籽粒内的水分<sup>[5]</sup>。随着制油工艺的改进和适应不同消费层次的需要，特别是油菜籽低温压榨工艺的实现，为了提高菜籽油品质，干燥过程更应严格控制热风温度<sup>[6]</sup>。目前油菜籽热风干燥存在的主要问题为，油菜籽的温度敏感和高吸湿性使干燥工艺参数的选择和优化受到一定限制<sup>[4, 7-8]</sup>。对于薄层农产品热风干燥特性的描述，国内外提出了十几种适用模型，Toğrul 等比较了 14 种模型在杏热风干燥中的适用性，孟岳成等比较了 12 种模型在熟化红薯热风干燥中的适用性，但对于这些干燥数学模型在油菜籽热风干燥特性的适用性没有系统的研究报道<sup>[9-10]</sup>。

本文研究了不同初始含水率、热风温度和风速条件下甘蓝型油菜籽的热风干燥特性，比较了 10 种数学模型在油菜籽热风干燥中的适用性，并计算了油菜籽干燥过程的有效水分扩散系数和活化能，以便为油菜籽干燥装置设计、工艺和过程控制优化提供基础依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

从重庆市油菜工程中心获得甘蓝型油菜籽，人工去除大杂、小杂和轻杂，及破裂、发芽、生霉、颜色青绿和颗粒较小的油菜籽籽粒，获得颗粒饱满、色泽均匀的实验材料。

### 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 °C，上海精宏实验设备有限公司；BC-2 型薄层干燥试验台，风速范围 0.1~0.5 m/s，温度精度 ±1 °C，湿度精度 ±0.5%，长春吉大科学仪器设备有限公司；BC/BD-195HE 型冷柜，河南新飞电器有限公司等。

### 1.3 实验设计

以初始含水率、热风温度和风速作为油菜籽热风干燥的 3 个主要影响因素，按表 1 条件进行干燥实验，每次实验油菜籽用量为 150 g。

### 1.4 含水率的测定和干燥速率的计算

根据《油料 水分及挥发物含量测定》(GB/T 14489.1-2008) 规定的方法测量油菜籽的含水率<sup>[11]</sup>，通过人工加湿法<sup>[12]</sup>得到实验要求的不同含水率水平，每次实验前取出冷藏的油菜籽在室温下解冻，并在实验前测量其初始含水率。则水分比可以根据 (1) 式计

算：

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

注：MR 为水分比；M 为干燥过程中某一时刻样品的含水率，%d.b.；M<sub>e</sub> 为油菜籽的平衡含水率，%d.b.；M<sub>0</sub> 为油菜籽的初始含水率，%d.b.。

由于热风干燥过程温度较高，油菜籽的平衡含水率 M<sub>e</sub> 值很小，则水分比可根据 (2) 式近似计算：

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (2)$$

干燥速率根据 (3) 式计算：

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3)$$

注：DR 为干燥速率，%d.b./min；M<sub>t+dt</sub> 为样品在 t+dt 时刻的含水率，%d.b.；M<sub>t</sub> 为样品在 t 时刻的含水率，%d.b.<sup>[10, 13]</sup>。

表 1 油菜籽热风干燥实验方案

Table 1 Drying experimental design of rapeseed hot air drying

实验分组	实验序号	固定条件	实验条件	
第 1 组	1	热风温度	初始含水率	15.31%d.b.
	2	50 °C, 风		19.47%d.b.
	3	速 1.5 m/s		21.20%d.b.
第 2 组	4			45 °C
	5	初始含水率	热风	50 °C
	6	19.47%d.b.,	温度	55 °C
	7	风速 1.5 m/s		60 °C
	8			65 °C
第 3 组	9			0.3 m/s
	10	初始含水率		0.6 m/s
	11	19.47%d.b.,	风速	0.9 m/s
	12	热风温度 50 °C		1.2 m/s
	13			1.5 m/s

### 1.5 干燥模型

运用 10 种数学模型 (表 2) 对油菜籽热风干燥进行数据拟合验证，用相关系数 R<sup>2</sup>、卡方 χ<sup>2</sup>、均方根误差 RMSE 3 个参数来评价模型的好坏，其计算公式分别为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N}} \quad (6)$$

注:  $MR_{exp,i}$  和  $MR_{pre,i}$  分别为第  $i$  个数据点的实验所得 MR 和模型预测所得 MR;  $N$  为实验数据点的个数;  $n$  为模型中参数的个数。

### 1.6 有效水分扩散系数和活化能的计算

在降速干燥阶段,生物质的干燥特性可以用 Fick 扩散方程来描述,适用于长方形、圆柱形和球形等形状的物料,对于较长时间的干燥实验而言,有效水分扩散系数可以由 (7) 式计算:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2} \quad (7)$$

注:  $D_{eff}$  为有效水分扩散系数,  $m^2/s$ ;  $L_0$  为实验样品厚度的一半,  $m$ 。通过绘制 (7) 式中  $\ln MR$  相对于  $t$  的曲线,将曲线进行线性拟合,由直线的斜率可以计算得到  $D_{eff}$ 。

活化能可以由 (8) 式计算:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

注:  $D_0$  为 Arrhenius 方程指数前因子,  $m^2/s$ ;  $E_a$  为活化能,  $kJ/mol$ ;  $R$  为气体常数,  $kJ/(mol \cdot K)$ ;  $T$  为绝对温度,  $K$ 。通过绘制 (8) 式中  $\ln D_{eff}$  相对于  $1/T$  的曲线,将曲线进行线性拟合,由直线的斜率可以计算得到  $E_a$  [10, 14]。

### 1.7 数据处理

应用 Office 2010 (Excel) 软件进行绘图,用 SPSS 16.0 软件对实验数据进行回归拟合。

## 2 结果与讨论

### 2.1 油菜籽的热风干燥特性

#### 2.1.1 初始含水率对油菜籽干燥特性的影响

在热风温度为  $50^\circ C$ 、风速为  $1.5 m/s$  的条件下,考查油菜籽初始含水率为  $15.31\% d.b.$ 、 $19.47\% d.b.$  和  $21.20\% d.b.$  对油菜籽干燥特性的影响。图 1 为油菜籽在不同初始含水率时的干燥特性曲线。从图 1a 可以看出:油菜籽的初始含水率越高,干燥过程中水分比的变化越大;干燥前期的水分比变化速度明显大于干燥后期。从图 1b 可以看出:油菜籽薄层热风干燥过程中没有出现明显的恒速干燥阶段,干燥主要发生在降速干燥阶段;初始含水率对油菜籽干燥速率的影响主要在干燥前期,在干燥后期初始含水率对干燥速率的影响较小。

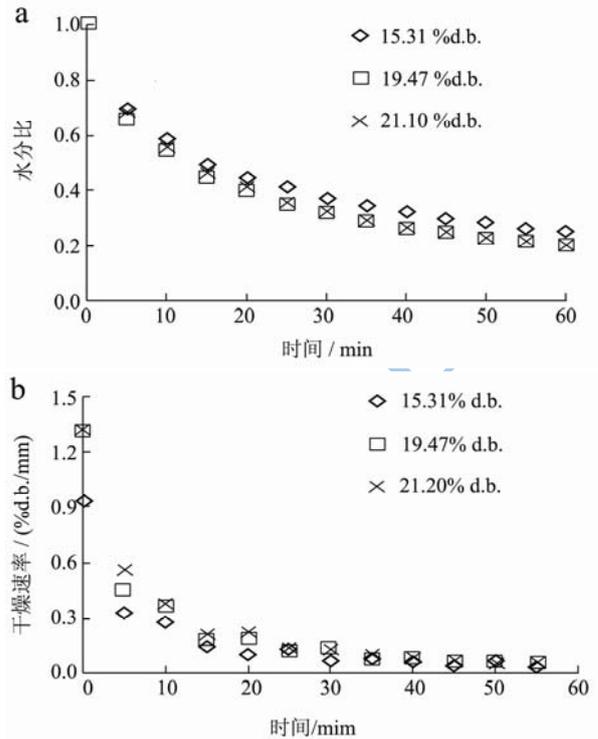


图 1 油菜籽在不同初始含水率时的干燥特性曲线

Fig.1 Drying characteristic curves of rapeseed under different initial moisture contents

注: a: 水分比曲线, b: 干燥速率曲线。

#### 2.1.2 热风温度对油菜籽干燥特性的影响

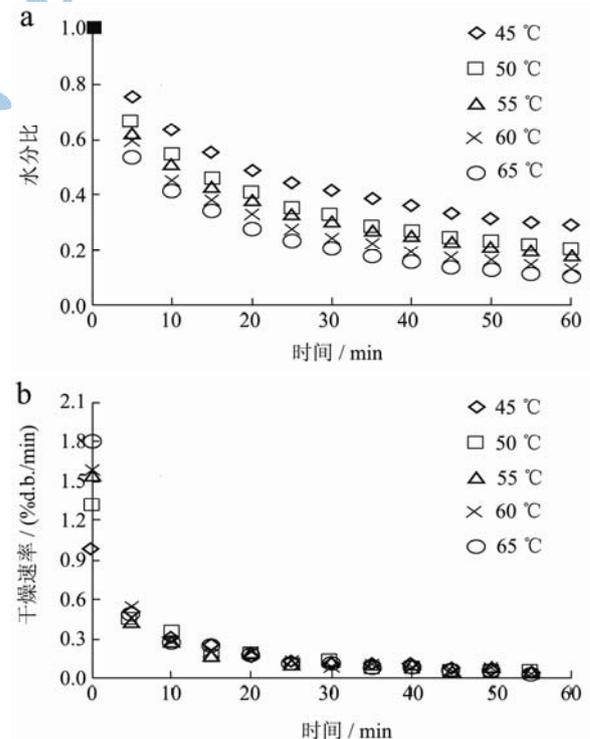


图 2 油菜籽在不同热风温度下的干燥特性曲线

Fig.2 Drying characteristic curves of rapeseed under different hot air temperatures

注: a: 水分比曲线, b: 干燥速率曲线。

图 2 为在初始含水率为 19.47 %d.b.、风速为 1.5 m/s 时油菜籽在不同热风温度下的干燥特性曲线。从图 2a 可以看出: 热风温度越高, 干燥过程中水分比的变化越大, 干燥到一定水分比(如安全储藏水分)所需时间越短。从图 2b 可以看出: 热风温度对油菜籽干燥速率的影响主要在干燥前期, 在干燥后期对干燥速率的影响较小; 随着油菜籽水分比的不断降低, 不同热风温度所对应干燥速率曲线变化趋于一致。因此, 在实际应用时, 为了提高干燥效率, 在干燥前期, 可以采用较高的热风温度; 为了降低能耗, 在干燥后期, 可以采用较低的热风温度。

### 2.1.3 风速对油菜籽干燥特性的影响

图 3 为在初始含水率为 19.47%d.b.、热风温度为 50 °C 时油菜籽在不同风速下的干燥特性曲线。从图 3 可以看出: 油菜籽在不同风速下的水分比曲线几乎重叠, 达到一定水分比(如安全储藏水分)的时间也几乎相同; 风速对干燥速率的影响仅限于干燥过程前期的很短时间, 在干燥后期不同风速条件下的干燥速率曲线几乎重叠。因此, 风速对油菜籽热风干燥特性的影响不明显, 在实际薄层干燥应用时, 为了降低能耗, 可以采用较低的风速。

## 2.2 油菜籽热风干燥的数学模型

### 2.2.1 选择描述油菜籽热风干燥特性的最佳模型

从 2.1 中油菜籽的干燥特性实验结果和分析可知, 热风温度对油菜籽干燥特性的影响最显著。运用表 2 中的 10 种模型对初始含水率为 19.47%d.b.的油菜籽在风速为 1.5 m/s 的试验条件不同热风温度实验的

数据进行拟合, 拟合结果见表 2。相关系数  $R^2$  是评价模型拟合程度优劣的一个最重要的指标,  $R^2$  越大,  $\chi^2$  和 RMSE 越小, 模型拟合程度越高。从表 2 可知, Page 模型和 Modified Page 模型对实验数据的拟合程度最高, 各热风温度条件下的平均相关系数为 0.999, 平均卡方值为 0.000041, 平均均方根误差值为 0.0058。考虑到模型应尽量简单, 以便干燥工艺和过程控制优化, 因而选择 Page 模型作为油菜籽热风干燥的数学模型。

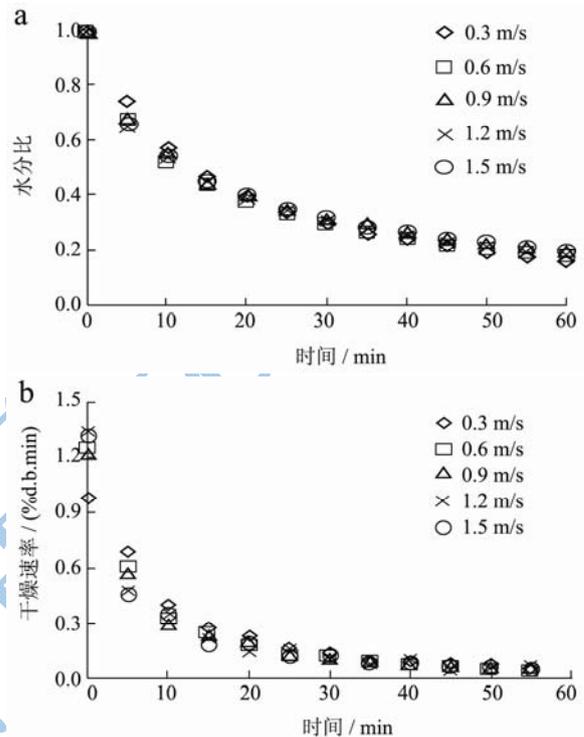


图 3 油菜籽在不同风速下的干燥特性曲线

Fig.3 Drying characteristic curves of rapeseed under different hot air velocities

注: a: 水分比曲线, b: 干燥速率曲线。

表 2 油菜籽热风干燥数学模型及其拟合结果

Table 2 Mathematical models and their fitted result of rapeseed hot air drying

模型	模型参数					拟合评价指标
	T=45 °C	T=50 °C	T=55 °C	T=60 °C	T=65 °C	平均
1 Newton: $MR=\exp(-kt)$						
k	0.028	0.039	0.042	0.052	0.064	-
$R^2$	0.851	0.835	0.818	0.847	0.866	0.843
$\chi^2$	0.006445	0.008397	0.009456	0.008746	0.008179	0.008245
RMSE	0.0803	0.0916	0.0972	0.0935	0.0904	0.0906
2 Page: $MR=\exp(-kt^n)$						
k	0.126	0.183	0.212	0.234	0.269	-
n	0.569	0.535	0.510	0.523	0.520	-
$R^2$	0.998	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999
$\chi^2$	0.000109	0.000046	0.000020	0.000022	0.000008	0.000041

转下页

接上页						
RMSE	0.0104	0.0068	0.0045	0.0047	0.0028	0.0058
3 Modified Page: $MR=\exp(-kt)^n$						
k	0.026	0.042	0.048	0.062	0.080	-
n	0.569	0.535	0.510	0.523	0.520	-
R <sup>2</sup>	0.998	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999
$\chi^2$	0.000109	0.000046	0.000020	0.000022	0.000008	0.000041
RMSE	0.0104	0.0068	0.0045	0.0047	0.0028	0.0058
4 Henderson and Pabis: $MR=a\exp(-kt)$						
a	0.867	0.844	0.832	0.842	0.853	-
k	0.023	0.031	0.033	0.042	0.052	-
R <sup>2</sup>	0.919	0.902	0.891	0.899	0.903	0.903
$\chi^2$	0.003832	0.005419	0.006182	0.006341	0.006464	0.005648
RMSE	0.0619	0.0736	0.0786	0.0796	0.0804	0.0748
5 Logarithmic: $MR=a\exp(-kt)+c$						
a	0.678	0.735	0.742	0.786	0.817	-
c	0.295	0.230	0.218	0.177	0.145	-
k	0.065	0.081	0.088	0.097	0.108	-
R <sup>2</sup>	0.992	0.985	0.978	0.980	0.976	0.982
$\chi^2$	0.000441	0.000910	0.001355	0.001408	0.001746	0.001172
RMSE	0.0210	0.0302	0.0368	0.0375	0.0418	0.0335
6 Two-term: $MR=a\exp(-kt)+b\exp(-k_1t)$						
a	0.406	0.456	0.455	0.495	0.492	-
b	0.591	0.541	0.543	0.504	0.507	-
k	0.137	0.190	0.239	0.246	0.302	-
k <sub>1</sub>	0.012	0.017	0.019	0.023	0.028	-
R <sup>2</sup>	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
$\chi^2$	0.000055	0.000083	0.000099	0.000058	0.000091	0.000077
RMSE	0.0074	0.0091	0.0099	0.0076	0.0096	0.0087
7 Wang and Singh: $MR=1+bt+at^2$						
a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	-
b	-0.030	-0.036	-0.038	-0.041	-0.044	-
R <sup>2</sup>	0.925	0.868	0.832	0.813	0.776	0.843
$\chi^2$	0.003525	0.007358	0.009526	0.011712	0.014930	0.009410
RMSE	0.0594	0.0858	0.0976	0.1082	0.1222	0.0946
8 Thomson: $t=a\ln(MR)+b(\ln(MR))^2$						
a	-3.630	-0.685	-0.291	-0.852	-1.371	-
b	34.611	22.846	20.503	14.998	11.131	-
R <sup>2</sup>	0.996	0.999	0.999	0.999	1.000	0.999
$\chi^2$	1.560645	0.539946	0.409867	0.364300	0.130609	0.601073
RMSE	1.2493	0.7348	0.6402	0.6036	0.3614	0.7179
9 Diffusion approach: $MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$						
a	0.407	0.458	0.456	0.504	0.508	-
b	0.090	0.089	0.079	10.926	0.092	-

转下页

接上页

k	0.139	0.191	0.240	0.023	0.302	-
R <sup>2</sup>	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
χ <sup>2</sup>	0.000051	0.000075	0.000089	0.000052	0.000915	0.002016
RNSE	0.0071	0.0087	0.0095	0.0072	0.0991	0.0263
10 Werma et al: MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)						
a	0.593	0.458	0.544	0.504	0.492	-
g	0.139	0.191	0.240	0.246	0.302	-
k	0.013	0.017	0.019	0.023	0.028	-
R <sup>2</sup>	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
χ <sup>2</sup>	0.000051	0.000075	0.000089	0.000052	0.000082	0.000070
RMSE	0.0071	0.0087	0.0095	0.0072	0.0091	0.0083

注: 表中 a、b、c、k、k1、g 为模型参数。

### 2.2.2 模型验证

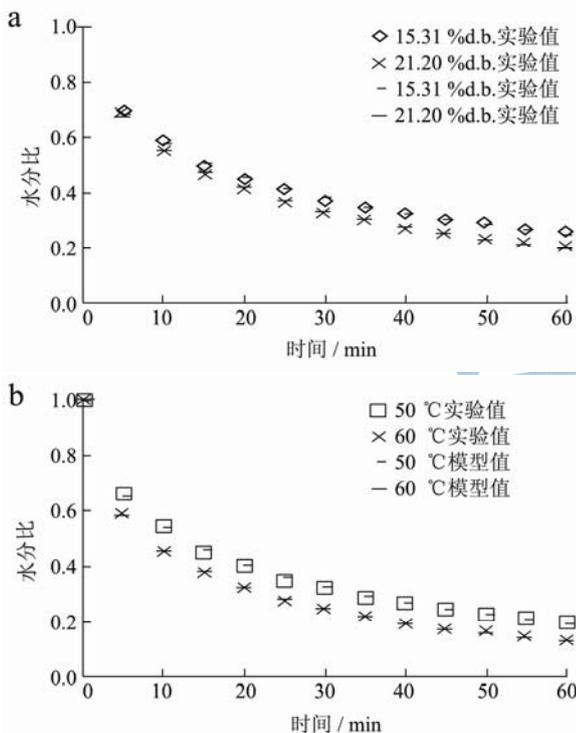


图4 Page 模型的验证

Fig.4 Variation of experimental and predicted moisture ratio by Page model with drying time

注: a: 不同初始含水率时的模型验证, b: 不同热风温度下的模型验证。

为了对所选择的模型进行进一步验证, 取建模以外的实验数据对该模型进行拟合分析, 考虑风速对油菜籽热风干燥过程影响不明显, 仅验证油菜籽初始含水率和热风温度对干燥过程的影响, 拟合结果如图 4 所示。图 4a 的实验条件为: 热风温度 50 °C, 风速为 1.5 m/s; 图 4b 的实验条件为: 初始含水率 19.47% d.b., 风速 1.5 m/s。从图 4 可以看出, 建模以外的验证实验数据水分比 MR 与 Page 模型预测的数据几乎一致, 表

明 Page 模型能够很好地描述油菜籽热风干燥特性。

通过油菜籽薄层热风干燥实验, 建立油菜籽热风干燥水分比和干燥时间的数学模型, 根据数学模型可推算达到油菜籽安全储藏含水率所需干燥时间, 并提高油菜籽的干燥品质, 同时通过优化干燥工艺和过程控制以实现降低干燥过程能源消耗的目的。

### 2.3 油菜籽热风干燥的有效水分扩散系数和活化能

根据 (7) 式将  $\ln Mt$  与  $t$  的曲线进行线性拟合, 由直线的斜率可以计算出油菜籽的有效水分扩散系数  $D_{\text{eff}}$ 。例如, 初始含水率为 19.47 %d.b.的油菜籽在风速为 1.5 m/s 的条件下, 热风温度为 45 °C、50 °C、55 °C、60 °C、65 °C 时的有效水分扩散系数分别为  $3.835 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $5.184 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $5.533 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $6.641 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $7.666 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

根据 (8) 式将  $\ln D_{\text{eff}}$  与  $1/T$  的曲线进行线性拟合, 由直线的斜率可以计算出油菜籽的干燥活化能  $E_a$ 。例如, 初始含水率为 19.47 %d.b.的油菜籽在风速为 1.5 m/s 的条件下的活化能为 29.26 kJ/mol。

## 3 结论

油菜籽薄层热风干燥过程中没有出现明显的恒速干燥阶段, 干燥主要发生在降速干燥阶段。油菜籽在不同干燥条件下的干燥特性曲线大体一致, 基本遵循指数规律变化。运用 10 种模型对实验数据进行拟合分析结果表明, Page 模型有最大的相关系数、最小的卡方和均方根误差值, 是描述油菜籽干燥特性的最佳数学模型, 由 Page 模型预测的干燥特性曲线与实验所得干燥曲线一致性好。热风温度是影响油菜籽热风干燥的主要因素, 随着热风温度的升高, 油菜籽的有效

水分扩散系数增大,热风温度从 45 ℃增加到 65 ℃,其有效水分扩散系数由  $3.835 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  增加到  $7.666 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,油菜籽的干燥活化能为 29.26 kJ/mol。

### 参考文献

- [1] Rapeseed[EB/OL]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Brassica\\_napus](http://en.wikipedia.org/wiki/Brassica_napus), 2014-02-12
- [2] 陈刚,彭健,刘振利,等.中国菜籽饼粕品质特征及其影响因素研究[J].中国粮油学报,2006,21(1):95-99  
CHEN Gang, PENG Jian, LIU Zheng-li, et al. Quality characteristics and its influencing factors of Chinese rapeseed cakes and rapeseed meals [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006, 21(1): 95-99
- [3] Yang Ling, Yang Ming-Jin, Chen Jian, et al. Status and development trend of rapeseed drying for seeding purposes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(S2): 309-315
- [4] 杨国峰,丁超,蔡浩飞,等.油菜籽干燥技术研究进展[J].中国粮油学报,2012,27(5):124-128  
YANG Guo-feng, DING Chao, CAI Hao-fei, et al. Research and development progress on rapeseed drying technology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(5): 124-128
- [5] 潘永康,王喜忠,刘相东.现代干燥技术(2版)[M].北京:化学工业出版社,2006  
PAN Yong-kang, WANG Xi-zhong, LIU Xiang-dong. Modern drying technology (2nd edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006
- [6] 刘大川,刘晔.油菜籽加工新技术及深度开发[J].中国油脂,2010,35(9):6-9  
LIU Da-chuan, LIU Ye. New technologies of rapeseed processing and comprehensive utilization of rapeseed resources [J]. China Oils and Fats, 2010, 35(9): 6-9
- [7] 王若兰.粮油储藏学[M].北京:中国轻工业出版社,2009  
WANG Ruo-lan. Grain and oil storage [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009
- [8] NY/T 1087-2006 油菜籽干燥与储藏技术规程[S]  
NY/T 1087-2006 The technical regulations of rapeseed drying and storage [S]
- [9] Toğrul İ T, Pehlivan D. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(3): 209-216
- [10] 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 Yue-cheng, WANG Jun, FANG Sheng, 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
- [11] GB/T 14489.1-2008 油料 水分及挥发物含量测定[S]
- [12] Soponronnarit S, Pongtornkulpanich A, Prachayawarakorn S. Corn quality after drying by fluidization technique at high temperature [J]. Drying Technology, 1997, 15(10): 2577-2586
- [13] Corrêa P C, Martins J H, Christ D. Thin layer drying rate and loss of viability modelling for rapeseed (canola) [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74(1): 33-39
- [14] Zhengfu Wang, Junhong Sun, Xiaojun Liao, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. Food Research International, 2007, 40(1): 39-46