

桃渣真空干燥特性数学建模

李聪^{1,2}, 周沫², 毕金峰², 常学东¹, 陈芹芹², 宁椿源²

(1. 河北科技师范学院食品科技学院, 河北昌黎 066600)

(2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为了探究干燥模型在真空干燥中的应用, 试验以桃渣在不同真空干燥温度(55、65、75和85℃)下的干燥过程为研究对象, 利用10种薄层干燥模型对其干燥特性曲线进行拟合分析, 并计算其有效水分扩散系数和活化能。结果表明: 干燥温度对桃渣干燥速率的影响较大, 干燥时间随着干燥温度的升高而减少; 桃渣干燥的主要阶段发生在降速干燥阶段。通过对文中10种薄层干燥模型的拟合结果进行对比可以发现, Wang and Singh模型对桃渣干燥的拟合性较好($R^2 > 0.99776$), 模型的预测值与试验值能较好吻合, 适合描述桃渣在所有干燥条件下的干燥特性; 根据费克第二定律获得桃渣真空干燥的有效水分扩散系数范围为 $8.0855 \times 10^{-10} \sim 1.5340 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 且随干燥温度的升高而增大; 利用阿伦尼乌斯方程计算桃渣真空干燥的活化能为21.1 kJ/mol。本研究为真空干燥技术应用于桃渣的干燥提供了理论基础。

关键词: 桃渣; 真空干燥; 干燥模型; 有效水分扩散系数; 活化能

文章编号: 1673-9078(2017)10-83-88

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.10.013

Mathematical Modeling for Vacuum Drying Characteristics of Peach Pomace

LI Cong^{1,2}, ZHOU Mo², BI Jin-feng², CHANG Xue-dong¹, CHEN Qin-qin², NING Chun-yuan²

(1. College of Food Science and Technology, Hebei Normal University of Science and Technology, Changli 066600, China)

(2. Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China)

Abstract: The drying characteristics, effective moisture diffusivity (D_{eff}) and activation energy (E_a) of peach pomace with vacuum drying at 55 °C, 65 °C, 70 °C and 80 °C were investigated in this study. The experimental data obtained were fitted to ten thin-layer drying models. The results indicated that drying temperature had a significant influence on the drying rate of peach pomace. The drying time decreased with the increasing drying temperature, and the drying process appeared in the falling rate periods. Compared the results of ten thin-layer drying models, models of Wang and Singh were the best to describe the drying process of peach pomace under all drying conditions ($R^2 > 0.99776$), and there was a good agreement between the experimental and predicted values. According to the Fick's second law, the values of effective moisture diffusivity varied from $8.0855 \times 10^{-10} \sim 1.5340 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. The relationship between the effective moisture diffusivity and drying temperature could be described by Arrhenius-type relationship, which resulted in activation energy of 21.1 kJ/mol for peach pomace. This study provides a theoretical basis for the application of vacuum drying technology in the drying of peach pomace.

Key words: peach pomace; vacuum drying; drying model; effective moisture diffusivity; activation energy

桃 (*Amygdalus persica* Linn.) 属于蔷薇科 (*rosaceae*), 李属 (*prunus*), 原产于中国^[1]。2014年桃的全球总产量为2280万吨, 而中国的总产量为1242万吨, 占世界总产量的一半以上, 稳居世界第一^[2]。

收稿日期: 2017-04-18

基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-31); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503142)

作者简介: 李聪 (1992-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工

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

在我国, 桃属于一种以鲜食为主的季节性水果, 其加工产品主要包括桃汁和桃罐头等。

桃渣缩汁是桃具有代表性的一类加工产品, 桃渣是桃汁加工过程中的主要副产物。桃渣营养成分丰富, 富含多酚、果胶、蛋白质、纤维素、维生素和矿物质等营养物质^[3]。但在我国, 由于桃渣是高水分含量物质, 且营养成分较多, 极易腐败变质, 除少部分经简单加工用作饲料外, 大部分都被废弃, 这样不仅会污染环境, 还会造成资源的浪费。因此, 若要充分利用桃渣生产出高附加值产品, 前提是要去除其内部水分,

而干燥因其操作简便, 成本较低等特点已经广泛应用于农产品及其副产品的保存。目前在实际生产中, 通常采用高温热风干燥对果渣进行干燥, 物料中的营养成分破坏严重, 难以进一步加工成高附加值产品。真空干燥具有高效、节能和环保等优点, 在绝氧环境中, 氧化反应受到抑制, 不仅干燥速率较快, 耗能较少, 而且在脱水过程中具有保留生物活性物质的潜力^[4]。

在干燥系统的设计、构建和运行中需要了解干燥产品的干燥特性和数学模型, 对干燥过程的数学建模就是基于设计一组方程式来尽可能准确地描述干燥系统^[5]。许多数学模型已经可以用来描述干燥过程, 其中薄层干燥模型应用得最为广泛。目前已经报道了关于几种果蔬渣如苹果渣^[6,7]、番茄渣^[5,8]、胡萝卜渣^[9,10]及橄榄渣^[11,12]等的干燥特性的数学建模和试验研究。由于不同干燥方式的原理不同, 不同物料的组织结构存在差异, 导致不同物料在不同干燥方式下的传热与传质机理不同。目前, 将真空干燥应用于果渣干燥的国内外研究较少, 尚未见关于桃渣真空干燥的研究。因此, 本试验旨在通过对桃渣真空干燥过程的水分扩散特征研究与干燥模型拟合, 进一步指导真空干燥的产业化应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

桃渣, 购于北京平谷桃农的新鲜久保桃, 经小型榨汁生产线得到, 桃渣得率为 20±1%。经测定, 物料的平均干基含水率为 6.14 g/g。

1.2 试验仪器

电热恒温鼓风箱 (DHG-9123A, 上海精宏试验设备有限公司); 真空干燥箱 (VO500, 德国美墨尔特有

限公司); 电子分析天平 (BSA4202S, 德国赛多利斯公司)。

1.3 试验方法

将桃渣成型为厚度 6 mm 的薄片, 每组试验样品重量为 45±0.5 g。设定真空干燥箱加热板温度分别为 55 °C、65 °C、75 °C 和 85 °C, 内部真空度为 100 mb, 待温度达到设定值后将物料放在加热板上, 打开真空泵。取样称重的时间间隔为 20 min, 直到物料的干基含水率达到 0.1 g/g 以下为止。每次试验均重复 3 次, 最后取平均值。

1.4 干燥特性

1.4.1 干燥参数

干基含水率可由式 (1) 计算:

$$M_t = \frac{m_t - m_e}{m_e} \quad (1)$$

式中: M_t 为干基含水率, g/g; m_t 为任意 t 时刻的质量, g; m_e 为干物质质量。

水分比 (Moisture Ratio, MR) 可由式 (2) 计算:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

式中: MR 为水分比, g/g; M_t 为任意 t 时刻的干基含水率, g/g; M_e 为干燥至平衡时的含水率, g/g; M_0 为初始干基含水率, g/g。由于 M_e 远小于 M_t 和 M_0 , 文中忽略不计。

干燥速率 (Drying Rate, DR) 的计算如式 (3):

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中: DR 为干燥速率, g/g·min; M_{t1} 和 M_{t2} 分别为干燥至 t_1 和 t_2 时刻的干基含水率, g/g; t_1 和 t_2 为干燥时间, min。

1.4.2 数学模型

试验中所用 10 种薄层干燥模型^[13-15]如表 1 所示。

表 1 应用于试验数据的 10 种薄层干燥模型

Table 1 Ten thin-layer drying models used for experimental data

| 编号 | 模型名称 | 模型方程 |
|----|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | Lewis | $MR = \exp(-kt)$ |
| 2 | Page | $MR = \exp(-kt^n)$ |
| 3 | Modified Page | $MR = \exp(-(kt)^n)$ |
| 4 | Henderson and Pabis | $MR = a \exp(-kt)$ |
| 5 | Logarithmic | $MR = a \exp(-kt) + c$ |
| 6 | Midilli et al. | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$ |
| 7 | Wang and Singh | $MR = 1 + at + bt^2$ |
| 8 | Approximation of diffusion | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$ |
| 9 | Simplified Fick's Diffusion | $MR = a \exp(-c(t/L^2))$ |
| 10 | Modified Page equation- II | $MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$ |

1.4.3 相关系数和误差分析

利用非线性回归获得所选模型的各个参数, 采用决定系数 R^2 、卡方检验值 χ^2 和均方根误差 RMSE 评价试验数据对数学模型的拟合优度。 R^2 越大, χ^2 及 RMSE 越小说明模型拟合优度越好。 R^2 和 χ^2 和 RMSE 可以通过下式计算:

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

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

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: $MR_{exp,i}$ 为试验水分比; $MR_{pre,i}$ 为预测水分比; N 为试验数据的组数; n 为常数的个数。

1.5 有效水分扩散系数

利用费克扩散方程可以描述物料在降速干燥阶段的干燥特性。根据 Crank 提出的方程式 (7) 可以计算桃渣的有效水分扩散系数 (D_{eff}), 假设物料在干燥过程中水分迁移仅通过扩散进行且扩散系数不变, 并忽略物料在干燥过程中的收缩, 计算如下式:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (7)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数, m^2/s ; L 为样品厚度的一半, m ; t 为干燥时间, s ; n 为正整数。

随着干燥时间的延长, 可以忽略除第一组以外的组数, 通过限制方程 (7) 中只有一组数, 即 $n=1$, 可以得到方程 (8):

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

式 (8) 可进一步转化为对数形式:

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right) t \quad (9)$$

由式 (9) 可以得到 $\ln MR$ 对干燥时间 t 的斜率 K :

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (10)$$

1.6 活化能

物料干燥过程中的有效水分扩散系数和温度间的关系通常由阿伦尼乌斯方程描述:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (11)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数, m^2/s ; D_0 为参考扩散系数, m^2/s ; E_a 为干燥活化能, kJ/mol ; R 为理想气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$; T 为干燥温度, $^{\circ}C$ 。

1.7 数据处理与分析

使用 Excel 和 SPSS 19.0 软件对试验数据进行处理和分析, 使用 Origin Pro 9 软件绘图并对干燥数据进行非线性回归拟合。

2 结果与分析

2.1 桃渣真空干燥特性

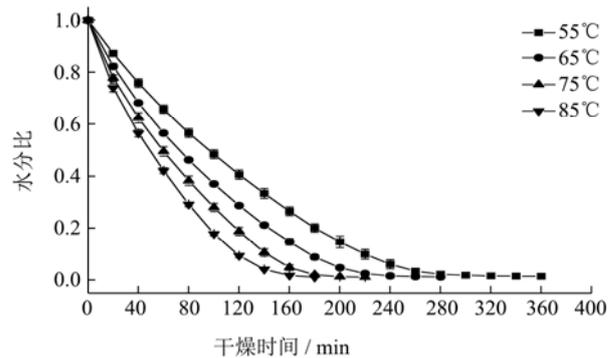


图1 不同干燥温度下桃渣的真空干燥曲线

Fig.1 Vacuum drying curves of peach pomace at different drying temperature

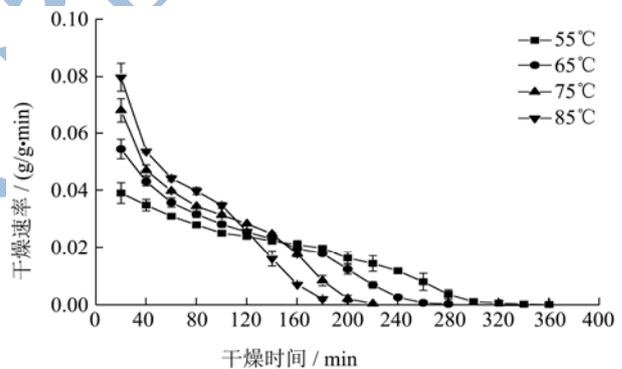


图2 不同干燥温度下干燥速率随干燥时间的变化

Fig.2 Effect of drying time on the drying rate at different drying temperature

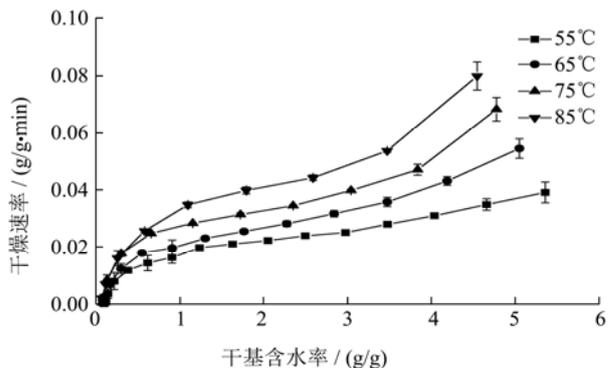


图3 不同干燥温度下干燥速率随水分含量的变化

Fig.3 Effect of moisture content on the drying rate at different drying temperature

桃渣在 55、65、75 和 85 °C 条件下水分比与干燥时间的关系如图 1 所示。随着干燥时间的延长，桃渣的水分含量呈逐渐降低的趋势。而随着干燥温度的升高，物料内部温度梯度和蒸发速率均会增大，从而缩短干燥时间。在干燥温度分别为 55、65、75 和 85 °C 时，样品达到干燥终点水分含量的时间分别为 360、280、220 和 140 min。随着温度从 55 °C 增加到 85 °C，平均干燥速度提高了 2.57 倍。试验结果与苹果渣^[6]和番茄渣^[5]得到的结果一致。

桃渣干燥速率对干燥时间及水分含量的影响分别见图 2 和图 3。干燥速率随着干燥时间的增加和水分含量的减少而减小，而随着干燥温度的升高而增大。物料达到干燥终点时，55、65、75 和 85 °C 下干燥速率的平均值分别为 0.0168、0.0216、0.0276 和 0.0337 g/g·min。如图所示，桃渣的真空干燥过程主要发生在降速干燥阶段，并没有观察到恒速阶段，这表明扩散是样品中水分运动的主导物理机制^[16]，结果与苹果渣^[6]和胡萝卜渣^[10]的一致。

2.2 干燥曲线拟合

将不同干燥温度下获得的水分含量数据转换为水分比 (MR)，并与表 1 中列出的 10 种薄层干燥模型进行拟合。使用非线性回归分析来评价 10 种模型参数，模型的统计结果如表 2~4 所示。描述桃渣真空干燥特性的最佳模型应具有最高的 R² 值及最低的 x² 值和 RMSE。结果显示，R²、x² 和 RMSE 的范围分别为 0.97656~0.9995、0.00005~0.00243 及 0.00089~0.04374。在所有模型中，Wang and singh 模型具有最高的 R² 值及最低的 x² 值和 RMSE。此模型中，R²、x² 和 RMSE 分别在 0.99776~0.9995、0.00005~0.00025 及 0.00089~0.00247 范围内变化。因此，Wang and singh 模型被选定为最适合用来描述桃渣真空干燥特性的模型。此外，图 4 比较了 55、65、75 和 85 °C 下桃渣干燥的试验数据与 Wang and singh 模型的预测数据，使用该模型得到的预测值使 MR 呈直线分布，表明该模型适合用于描述桃渣的真空干燥特性。

表 2 55 °C 下桃渣薄层干燥模型数据拟合结果

Table 2 Results of statistical analysis on the thin-layer drying models of peach pomace at 55 °C

| 模型 | 系数 | R ² | x ² | RMSE |
|-----------------------------|--|----------------|----------------|---------|
| Lewis | k: 0.00854 | 0.97656 | 0.00243 | 0.04374 |
| Page | k: 0.00192, n: 1.3008 | 0.9947 | 0.00055 | 0.00934 |
| Modified Page | k: 0.00815, n: 1.30851 | 0.99471 | 0.00055 | 0.00932 |
| Henderson and Pabis | k: 0.00903, a: 1.06245 | 0.97976 | 0.0021 | 0.03567 |
| Logarithmic | k: 0.00664, a: 1.15949c: -0.13613 | 0.99365 | 0.00066 | 0.01053 |
| Midilli et al. | k: 0.00204, a: 0.97848, n: 1.27101, b: -0.0001 | 0.99635 | 0.00038 | 0.00568 |
| Wang and singh | a: -0.00616, b: 0.00001 | 0.9995 | 0.00005 | 0.00089 |
| Approximation of diffusion | k: 0.01201, a: 1.82658 | 0.99317 | 0.00071 | 0.01204 |
| Simplified Fick's Diffusion | a: 1.06261, c: 0.00382, L: 0.65063 | 0.9785 | 0.00223 | 0.03567 |
| Modified Page equation-II | c: 0.00328, L: 1.22699, n: 1.29993 | 0.99437 | 0.00058 | 0.00934 |

表 3 65 °C 下桃渣薄层干燥模型数据拟合结果

Table 3 Results of statistical analysis on the thin-layer drying models of peach pomace at 65 °C

| 模型 | 系数 | R ² | x ² | RMSE |
|-----------------------------|---|----------------|----------------|---------|
| Lewis | k: 0.01101 | 0.98297 | 0.00178 | 0.02492 |
| Page | k: 0.00371, n: 1.23089 | 0.99426 | 0.0006 | 0.00779 |
| Modified Page | k: 0.01085, n: 1.23795 | 0.99427 | 0.0006 | 0.00778 |
| Henderson and Pabis | k: 0.01144, a: 1.04238 | 0.98397 | 0.00168 | 0.02178 |
| Logarithmic | k: 0.00855, a: 1.13479c: -0.12657 | 0.99619 | 0.0004 | 0.00478 |
| Midilli et al. | k: 0.00486, a: 0.98688, n: 1.15116, b: -0.00019 | 0.99662 | 0.00035 | 0.00389 |
| Wang and singh | a: -0.00791, b: 0.00002 | 0.99846 | 0.00016 | 0.00209 |
| Approximation of diffusion | k: 0.0149, a: 1.75398 | 0.99363 | 0.00067 | 0.00865 |
| Simplified Fick's Diffusion | a: 1.0425, c: 0.00708, L: 0.78637 | 0.98264 | 0.00181 | 0.02178 |
| Modified Page equation-II | c: 0.00451, L: 1.08127, n: 1.22991 | 0.99378 | 0.00065 | 0.0078 |

表 4 75 °C下桃渣薄层干燥模型数据拟合结果

Table 4 Results of statistical analysis on the thin-layer drying models of peach pomace at 75 °C

| 模型 | 系数 | R ² | χ ² | RMSE |
|-----------------------------|---|----------------|----------------|---------|
| Lewis | k: 0.01355 | 0.98189 | 0.002 | 0.02197 |
| Page | k: 0.00489, n: 1.22616 | 0.99222 | 0.00086 | 0.00858 |
| Modified Page | k: 0.01302, n: 1.23579 | 0.99224 | 0.00086 | 0.00856 |
| Henderson and Pabis | k: 0.01399, a: 1.03517 | 0.98182 | 0.00201 | 0.02005 |
| Logarithmic | k: 0.01011, a: 1.14864c: -0.14697 | 0.99578 | 0.00047 | 0.00419 |
| Midilli et al. | k: 0.00716, a: 0.98931, n: 1.11175, b: -0.00033 | 0.99537 | 0.00051 | 0.00409 |
| Wang and singh | a: -0.00974, b: 0.00002 | 0.99776 | 0.00025 | 0.00247 |
| Approximation of diffusion | k: 0.01824, a: 1.74461, | 0.99156 | 0.00093 | 0.0093 |
| Simplified Fick's Diffusion | a: 1.03531, c: 0.0086, L: 0.78382 | 0.9798 | 0.00223 | 0.02005 |
| Modified Page equation- II | c: 0.00498, L: 1.00422, n: 1.22431 | 0.99135 | 0.00095 | 0.00858 |

表 5 85 °C下桃渣薄层干燥模型数据拟合结果

Table 5 Results of statistical analysis on the thin-layer drying models of peach pomace at 85 °C

| 模型 | 系数 | R ² | χ ² | RMSE |
|-----------------------------|---|----------------|----------------|---------|
| Lewis | k: 0.0164 | 0.98506 | 0.00173 | 0.01555 |
| Page | k: 0.00636, n: 1.21918 | 0.99398 | 0.0007 | 0.00557 |
| Modified Page | k: 0.0158, n: 1.22392 | 0.99398 | 0.0007 | 0.00557 |
| Henderson and Pabis | k: 0.01686, a: 1.03026 | 0.98458 | 0.00178 | 0.01427 |
| Logarithmic | k: 0.01247, a: 1.1384, c: -0.13639 | 0.99683 | 0.00037 | 0.00256 |
| Midilli et al. | k: 0.00944, a: 0.99314, n: 1.09949, b: -0.00038 | 0.99641 | 0.00042 | 0.00249 |
| Wang and singh | a: -0.01183, b: 0.00004 | 0.99786 | 0.00025 | 0.00198 |
| Approximation of diffusion | k: 0.02199, a: 1.73484 | 0.99346 | 0.00076 | 0.00605 |
| Simplified Fick's Diffusion | a: 1.03039, c: 0.01095, L: 0.80572 | 0.98238 | 0.00204 | 0.01427 |
| Modified Page equation- II | c: 0.00596, L: 0.96559, n: 1.21491 | 0.9931 | 0.0008 | 0.00558 |

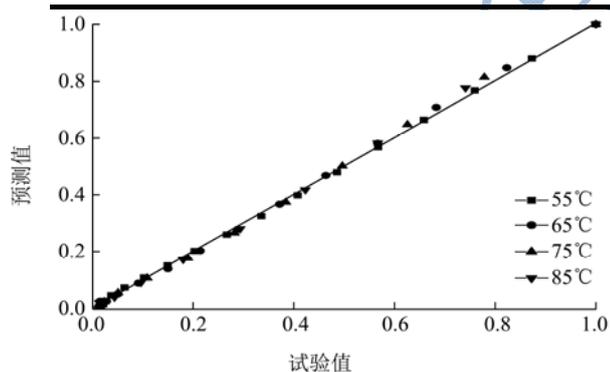


图 4 桃渣试验水分比与预测水分比的比较

Fig.4 The comparison of experimental and predicted moisture ratio (MR) values of peach pomace

2.3 有效水分扩散

有效水分扩散系数随干燥温度的变化如图 5 所示。干燥样品在 55~85 °C 的 D_{eff} 值在 $8.0855 \times 10^{-10} \sim 1.5340 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内。如图所示, 随着干燥温度的升高, D_{eff} 值显著增大。因为当样品在较高温度下干燥时, 增加的热能会增大样品内水分子

的活性, 从而增大水分扩散速率。一般食品物料的有效水分扩散系数范围为 $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围^[17], 本次试验结果在该范围之内, 并与 75~105 °C 下干燥苹果渣的 D_{eff} 值 $1.91 \sim 3.93 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[6]、60~75 °C 干燥胡萝卜渣的 $2.74 \sim 4.64 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[10]、50~90 °C 干燥橄榄渣的 $1.71 \sim 2.03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[11] 以及 50~90 °C 干燥葡萄渣的 $1.01 \sim 3.04 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[18] 等结果接近。

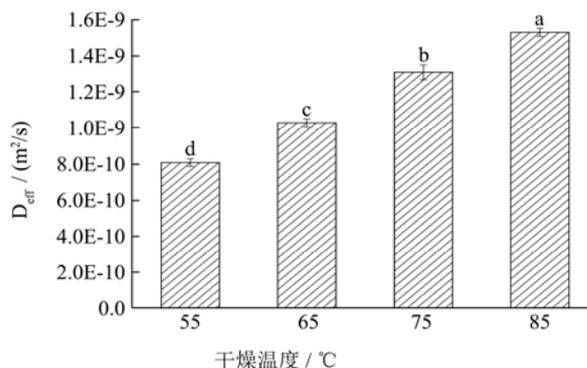


图 5 有效水分扩散系数随干燥温度的变化

Fig.5 Effect of drying temperature on the effective moisture diffusivity

2.4 活化能

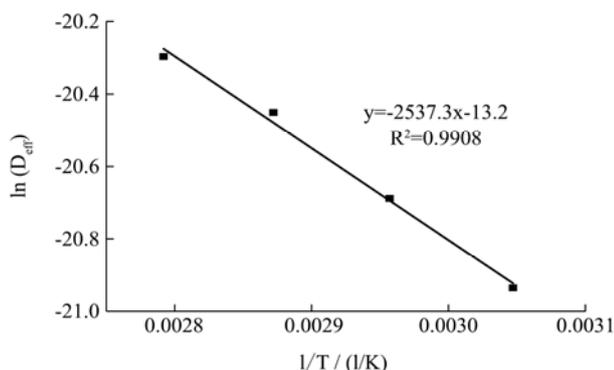


图6 水分有效扩散系数与干燥温度的关系

Fig.6 The relationship between moisture effective diffusivity and drying temperature

活化能可以通过阿伦尼乌斯公式 $\ln D_{eff}$ 对 $1/(T+273.15)$ 的斜率确定, 以 $\ln D_{eff}$ 对干燥温度倒数的函数如图6所示, 其中直线的斜率为 $-E_a/R$, 截距等于 $\ln D_0$ 。等式(12)给出了干燥温度对 $\ln D_{eff}$ 的影响具有以下关系:

$$D_{eff} = 1.8674 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{2537.3}{T+273.15}\right) \quad (R^2: 0.9908) \quad (12)$$

经计算, 桃渣真空干燥的活化能为 21.1 kJ/mol。各种农产品的活化能值一般范围为 12.7~110 kJ/mol^[19]。该值与 25~45 °C 干燥番茄渣的活化能为 23.14 kJ/mol^[5]、75~150 °C 干燥苹果渣的 24.51 kJ/mol^[6]、60~75 °C 干燥胡萝卜渣的 23.05 kJ/mol^[10]、60~90 °C 干燥橄榄渣的 26.3 kJ/mol^[12]、50~90 °C 干燥葡萄渣的 24.51 kJ/mol^[18] 以及 80~120 °C 干燥甘蔗渣的 19.47 kJ/mol^[20] 等果蔬副产物的活化能值相接近。

3 结论

3.1 桃渣真空干燥过程中, 干燥速率随干燥时间的增加而减小, 而随干燥温度的升高而增大。整个干燥过程主要发生在降速干燥阶段, 无恒速阶段。

3.2 在所有试验条件下, Wang and singh 模型具有最高的 R^2 值及最低的 χ^2 值和 $RMSE$, 证明其拟合优度最佳, 适合描述桃渣真空干燥特性。

3.3 桃渣真空干燥有效水分扩散系数的范围为 $8.0855 \times 10^{-10} \sim 1.5340 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, D_{eff} 值随干燥温度的升高而增大; 真空干燥的活化能为 21.1 kJ/mol。

参考文献

[1] 吕健, 毕金峰, 刘璇, 等. 桃变温压差膨化干燥预处理工艺研究[J]. 核农学报, 2013, 27(9): 1317-1323

LV Jian, BI Jin-feng, LIU Xuan, et al. Research on different pre-treatments on the peach explosion puffing drying [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(9): 1317-1323

[2] FAOSTAT[DB/OL] (Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division). Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>

[3] Singh S, Kulshrestha K. Peach juice and pomace powder; nutritive value and use of pomace powder in biscuits [J]. International Journal of Food Science and Technology (IJFST) Vol, 2016, 6: 5-16

[4] Šumić Z, Vakula A, Tepić A, et al. Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM) [J]. Food Chemistry, 2016, 203: 465-475

[5] Ruiz C A, Francisco C, Fernando L R, et al. Thin layer drying behavior of industrial tomato by-products in a convective dryer at low temperatures [J]. Research Journal of Biotechnology, 2013, 8(2): 50-60

[6] Wang Z, Sun J, Chen L F, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. Food Research International, 2007, 40(1): 39-46

[7] 牛智有, 赵思明, 姜开明. 苹果渣干燥特性与模型的试验研究[J]. 农机化研究, 2008, 6: 243-244

NIU Zhi-you, ZHAO Si-ming, JIANG Kai-ming. Experimental study on drying characteristic and model of apple pomace [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 6: 243-244

[8] Wani A A. Sorption isotherms and drying characteristics of tomato peel isolated from tomato pomace [J]. Drying Technology, 2006, 24(11): 1515-1520

[9] Kumar N, Sarkar B C, Sharma H K. Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying [J]. Food Science & Technology International, 2011, 17(5): 459-469

[10] Kumar N, Sarkar B C, Sharma H K. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(1): 33-41

[11] Vegagálvez A, Miranda M, Díaz L P, et al. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19): 7265-7270

[12] Meziane S, Mesbahi N. Determination of moisture diffusivity and activation energy in thin layer drying of olive pomace [J]. International Journal of Food Engineering, 2012, 8(3): 1039-1058

- [13] Chen Q, Bi J, Wu X, et al. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba*, Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 759-766
- [14] Hii C L, Law C L, Cloke M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(2): 191-198
- [15] Akpınar E, Midilli A, Bicer Y. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling [J]. Energy Conversion & Management, 2003, 44(10): 1689-1705
- [16] 司旭,陈芹芹,毕金峰,等.干燥方式对树莓干燥特性、品质和微观结构的影响[J].中国食品学报,2016,16(10):130-138
SI Xu, CHEN Qin-qin, BI Jin-feng, et al. Effects of drying methods on the drying characteristics, quality and microstructure of raspberry [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(10): 130-138
- [17] Madamba P S, Driscoll R H, Buckle K A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices [J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(1): 75-97
- [18] Ferreira L F D, Pirozi M R, Ramos A M, et al. Mathematical modeling of thin-layer drying of fermented grape pomace [J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2012, 47(6): 855-862
- [19] N P Zogzas, Z B Maroulis, D MarinosKouris. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs [J]. Drying Technology, 1996, 14(10): 2225-2253
- Vijayaraj B, Saravanan R, Renganarayanan S. Studies on thin layer drying of bagasse [J]. International Journal of Energy Research, 2010, 31(31): 422-437