

热风和中短波红外干燥对桃渣干燥特性及多酚含量的影响

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: 试验研究了桃渣在 60 °C、70 °C 和 80 °C 条件下热风干燥和中短波红外干燥的干燥特性、有效水分扩散系数和活化能, 建立了桃渣干燥的数学模型, 并比较了桃渣在不同干燥条件下多酚的含量。结果表明, 对文中所建立的 5 种干燥模型进行对比可以发现, Midilli et al 模型最适合描述桃渣在所有干燥条件下的干燥特性 ($R^2 > 0.9996$); 桃渣热风干燥的有效水分扩散系数为 $(1.1652 \sim 1.7393) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 红外干燥的为 $(1.6718 \sim 2.4993) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$; 利用阿伦尼乌斯方程计算桃渣两种干燥方式的活化能分别为 19.56 及 19.68 kJ/mol。此外, 相同干燥温度下红外干燥样品中的总酚保留率较高, 分别为 68.22%、75.42% 及 82.63%。与热风干燥相比, 桃渣中短波红外干燥速率较大, 多酚保留率较高, 且多酚含量随干燥温度的升高而增大, 80 °C 红外干燥对桃渣的多酚含量影响最小。本试验为桃渣不同干燥条件下的干燥特性以及多酚的利用提供了理论基础。

关键词: 热风干燥; 红外干燥; 桃渣; 干燥特性; 多酚

文章编号: 1673-9078(2017)12-137-144

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.12.022

Effects of Hot-air Drying as well as Short-and Medium-wave Infrared Radiation Drying on the Drying Characteristics and Polyphenol Content 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 under hot-air drying (HAD) as well as short- and medium-wave infrared radiation drying (IRD) at 60 °C, 70 °C and 80 °C were investigated. The mathematical models of peach pomace under different drying processes were established and the total polyphenol contents of peach pomace under different drying conditions were tested. The results showed that the Midilli et al. model was the best model to describe the drying process of peach pomace under all drying conditions ($R^2 > 0.9996$) as compared with the five drying models established in this study. The values of effective moisture diffusivity varied from 1.1652×10^{-9} to $1.7393 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ for HAD and from 1.6718×10^{-9} to $2.4993 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ for IRD. The activation energies of HAD and IRD methods for peach residue calculated by Arrhenius equation were 19.56 kJ/mol and 19.68 kJ/mol, respectively. In addition, the total polyphenol retention in the IRD samples were 68.22%, 75.42% and 82.63%, which were higher than that in HAD samples at the same drying temperature. In conclusion: the drying rate and polyphenol content of peach pomace under IRD were higher than those under HAD, and the content of polyphenol increased with the increasing drying temperature. The IRD process at 80 °C had the minimal effect on the polyphenol content of peach pomace. This study provided the theoretical basis for the drying characteristics of peach pomace under different drying conditions and the usage of polyphenol in the future.

Key words: hot air drying; short- and medium-wave infrared radiation drying; peach pomace; drying characteristics; polyphenol

收稿日期: 2017-06-16

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

桃(*Amygdalus persica linn*)属于蔷薇科(*rosaceae*),李属(*prunus*),原产于中国^[1]。中国的桃产量近些年一直稳居世界首位,据联合国粮食与农业组织(food and agriculture organization, FAO)统计显示,2014年中国桃产量已达1242.37万吨,位居世界首位。在我国,桃的加工量为总产量的10%左右,而桃汁为主要的加工产品之一。桃渣是桃汁生产过程中的主要副产物,约占桃汁加工量的20%。桃渣富含多酚、果胶和纤维素等多种营养成分,具备开发成高附加值产品的潜力,但目前我国仅有少量桃渣经简单加工后制成低端饲料,其余大部分被废弃,造成环境污染和资源浪费。此外,桃渣含水量较高,极易受微生物影响而腐败变质,保存困难。因此,干燥加工是延长桃渣贮藏期和加工周期的必要前处理手段。

目前,我国果渣干燥多采用高温热风干燥,因其操作简单且成本较低。但是,热风干燥存在很多问题,如能源利用率低,干燥耗时长,对物料中的营养物质破坏严重等。与传统的热风干燥比,红外辐射干燥作为一种新型干燥方式,其优势在于耗能较少,干燥时间短,可以提高产品品质等,因此红外辐射干燥已经成功应用于多种农产品及其副产物的干燥加工中^[2],国内外很多学者对其进行了研究报道。Nowak等^[3]通过对比红外干燥与热风干燥2种方式干燥苹果片发现,采用红外干燥的苹果片干燥速率及效率更高,外观品质也较好;Shi等^[4]研究了新鲜蓝莓和浸糖蓝莓的红外干燥特性和品质,结果表明,与热风干燥相比,红外干燥的蓝莓质地较好,且干燥时间明显缩短;Yang等^[5]比较了葡萄渣红外干燥和对流干燥的干燥特性、杀菌功效及产品质量。结果表明,红外线干燥时间短,杀菌效果最佳,对多酚和原花色素的损伤最小。虽然国内外对热风 and 红外干燥的研究有很多,但是桃渣属于半固体物料,其在干燥过程中的传质与传热机理不同于固体物料和液体物料,且不同物料之间也会有差异,因此有必要对其在干燥过程中的水分扩散、活化能等基础性参数进行研究。

本试验通过对比不同温度下热风干燥和中短波红外干燥桃渣的干燥速率、水分扩散、活化能及多酚保留,探讨中短波红外干燥的优势,通过对干燥过程的模拟,进一步指导中短波红外干燥的产业化应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

桃渣,北京平谷8月份收获的新鲜久保桃,经小型果汁生产线榨汁后得到,桃渣得率为20±2%。

乙醇(分析纯),北京化工厂;没食子酸(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;Folin-Ciocalteu试剂,美国Sigma公司;碳酸钠(分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电热鼓风干燥箱(DHG-9203,上海一恒科技有限公司);中短波红外干燥箱(STC,泰州圣泰科红外科技有限公司);电子分析天平(BSA4202S,德国Sartorius公司);高速万能粉碎机(FW100,天津泰斯特仪器有限公司);紫外分光光度计(UV-1800,日本岛津公司);超声清洗设备(KQ-500E,江苏昆山舒美超声仪器有限公司);恒温水浴锅(DK-826,上海精宏实验仪器有限公司);温度记录仪(OM-DAQ-USB-2401,美国Omega公司)。

1.3 试验方法

初始水分含量测定根据国标GB/T 5009.3-2010《食品中水分的测定》进行,其平均湿基含水率为84±1%。

将桃渣平铺于网状托盘上,厚度10 mm,分别设定干燥温度为60℃、70℃和80℃,待温度达到设定值后将托盘放入干燥箱中。每组试验样品用量为120±1 g,干至桃渣的干基含水率达到0.1 g/g以下为止,具体干燥条件如下。

热风干燥:干燥风速2.1 m/s,取样时间点依次为15、30、45、60、75、90、105、120、150、180、210、240、270、300、330、360、390、420、450、480、510和540 min。

中短波红外干燥:辐射功率为1350 W,红外辐射源与待干物料间距离为11 cm,取样时间点依次为10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120、140、160、180、200、220、240、270、300、330和360 min。

1.4 干燥特性及模型拟合

1.4.1 水分比及干燥速率

桃渣干燥的水分比(Moisture Ratio, MR)及干燥速率(Drying Rate, DR)用如下公式计算:

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

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

式中: M_t 为任意 t 时刻的干基含水率, g/g; M_e 为干燥至平衡时刻的含水率, g/g; M_0 为初始干基含水率, g/g; M_{t+dt} 为

干燥至 $t+dt$ 时刻的干基含水率, g/g; dt 为时间间隔。

1.4.2 数学模型

试验中 5 种薄层干燥模型^[6]如表 1 所示, 确定水分比 (MR) 对时间的函数。

表 1 应用于桃渣干燥曲线的薄层干燥模型

Table 1 Thin-layer drying models applied to the drying curves of peach pomace

编号	模型名称	模型方程
1	Lewis	$MR=\exp(-kt)$
2	Page	$MR=\exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-kt)$
4	Verma et al.	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$
5	Midilli et al.	$MR=a\exp(-kt^n)+bt$

1.5 有效水分扩散系数的计算

物料干燥过程中的主要阶段是降速干燥阶段, 在此阶段物料的干燥特性可用菲克扩散方程来描述, 有效水分扩散系数可通过下式计算:

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

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 为需考虑的组数。

对于长时间的干燥, $n=1$, 式 (3) 可以简化为:

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

式 (4) 可进一步简化为对数形式:

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

通过式 (5) 可以做出一条 $\ln MR$ 与 t 的直线, 计算直线的斜率即可得出 D_{eff} 的值。

1.6 活化能的计算

活化能表示从物料中除去 1 mol 水分所需要的能量, 它代表物料中水分的结合能力。有效水分扩散系数与温度的关系通常由阿伦尼乌斯方程描述:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (6)$$

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

1.7 总酚含量测定

1.7.1 总酚提取

参考 Altemimi 的方法^[7]并稍作修改。将干燥后的桃渣粉碎, 取 1 g 渣粉加入 20 mL 60% 乙醇超声 (功率 600 W) 提取 30 min, 过滤后残渣再重复提取一次,

合并两次上清液, 定容至 40 mL, 按标准曲线制作法测定吸光度。

1.7.2 没食子酸标准曲线制作

分别配置 0、10、20、30、40、50 $\mu g/mL$ 的没食子酸标准液, 取上述不同浓度的标准液 0.5 mL, 加入 1 mL 10% (V/V) Folin-Ciocalteu 显色剂, 放置 6 min 后加入 2 mL 75 g/L 碳酸钠溶液, 75 $^{\circ}C$ 水浴保持 10 min, 于 765 nm 波长下测定其吸光度, 得到没食子酸浓度 C 和吸光值 A 的线性回归方程: $A=0.0107C-0.0578$ ($R^2=0.9996$), 结果以 mg GAE/g 干基表示。

1.8 数据处理与分析

使用 Excel 和 SPSS 19.0 软件处理试验数据, 使用 Origin Pro 9 软件对干燥数据进行非线性回归分析, 采用决定系数 R^2 、卡方检验值 χ^2 和均方根误差 RMSE 对试验数据和数学模型的拟合优度进行评价。

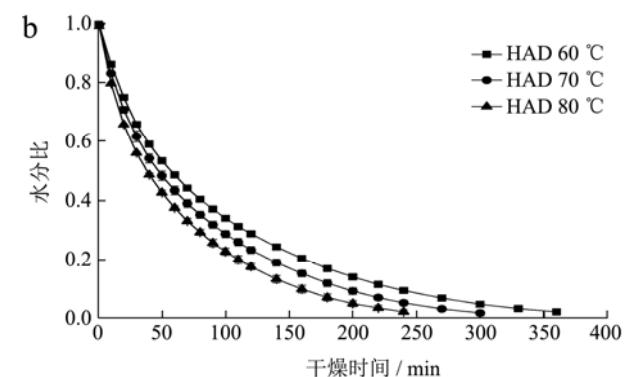
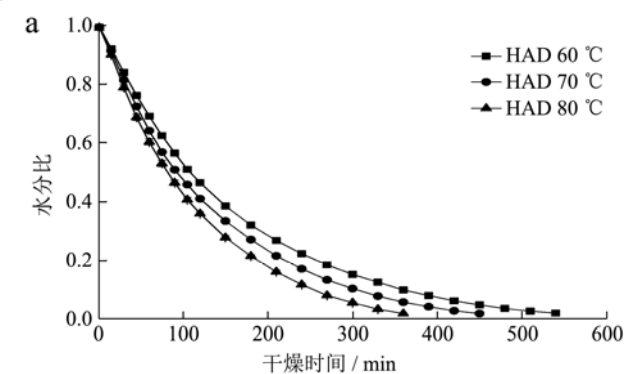
$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-n} \quad (7)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

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。

2 结果与分析

2.1 干燥特性和中心温度曲线



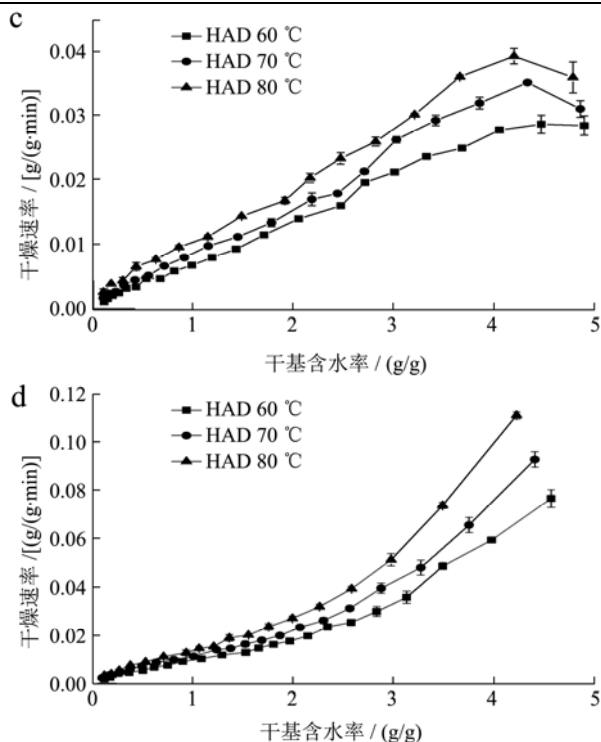


图1 60~80 °C下桃渣热风干燥和红外干燥的干燥曲线 (a、b) 和干燥速率曲线 (c、d)

Fig.1 Drying curves (a~b) and drying rate curves (c~d) of peach pomace under HAD and IRD at 60~80°C

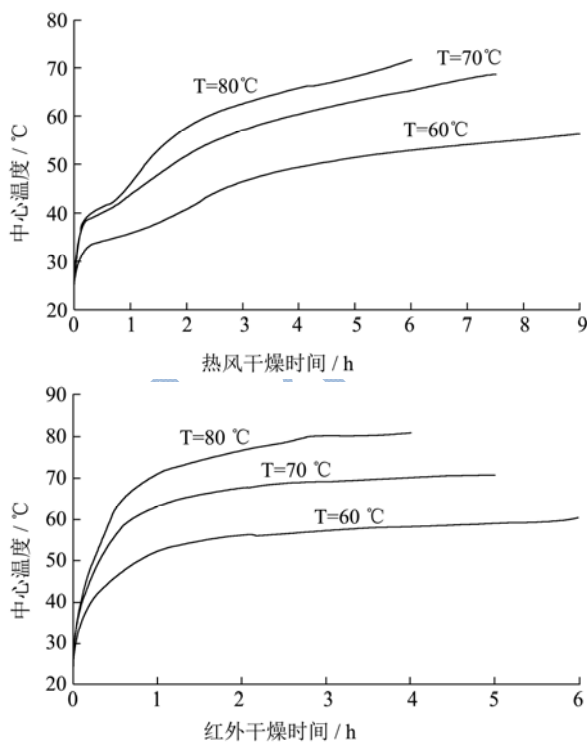


图2 桃渣热风干燥和红外干燥的内部中心温度曲线

Fig.2 Inner-center temperature curves of peach pomace under HAD and IRD

图1中a~b分别为桃渣在60~80 °C条件下热风干燥和中短波红外干燥的干燥曲线。由图可以看出，相

同温度下中短波红外干燥达到干燥终点含水量(10%, w.b)的时间最短,分别为360、300及240 min;而热风干燥时间较长,分别为540、450及360 min。同一干燥方式下,随着干燥温度的升高,达到干燥终点的时间明显缩短,且相比于热风干燥,相同温度下红外干燥的时间缩短了33%,干燥效率明显提高。图1中c~d分别为桃渣的干燥速率曲线。在同一干燥方式下,干燥温度越高,干燥速率越快;在相同温度下中短波红外干燥速率较热风干燥快。样品的红外干燥过程属于降速干燥阶段,无恒速干燥阶段,说明扩散主导样品中水分的运动^[8]。而在70 °C和80 °C的热风干燥条件下速率呈现先升高再降低的趋势,在60 °C时经历了短暂的恒速阶段后进入降速阶段。不同干燥条件下,桃渣的干燥速率随着样品中水分含量的减小而降低,其原因可能是随着干燥的进行,水分迁移的距离变大,造成失水速率降低,导致干燥速率减慢^[9]。

干燥温度的变化对物料中心温度的影响如图2所示。短时间内桃渣片层逐渐升温,内部升温速度也较快,且中短波红外干燥明显比热风升温快。随后,片层仍在升温,内部水分在较大的干燥速率下蒸发,但中心温度升速放缓,这一阶段尤其在红外干燥过程中体现的更为明显,因为在红外辐射干燥过程中,加热元件可以将辐射能量转移到物料表面,而能量直接穿透物料而不加热周围空气,物料的温度梯度会在短时间内减少^[10];热风干燥是通过热空气逐渐带走物料表面的水分,因此热风干燥的片层在干燥末期仍在继续升温,且干燥温度越高升温幅度越大。最后,当桃渣片层温度接近空气干燥温度时,干燥速率降低,此时由于温度梯度的降低使干燥过程进行得更慢,而当桃渣片层内部的水蒸气压力与空气压力相同时,干燥过程趋于结束^[11],这一过程在红外干燥条件下有较好的体现,而热风干燥桃渣中心温度并未达到温度设定值。

2.2 模型拟合

利用 Lewis 等五种干燥模型对桃渣热风干燥和中短波红外干燥过程进行描述,采用决定系数(R^2)、卡方(χ^2)及均方根误差(RMSE)对模型拟合程度进行评价,拟合结果见表2。 R^2 值越大, χ^2 值及RMSE越小说明模型拟合优度越好。结果显示,在所有干燥条件中, R^2 值均高于0.9858, χ^2 值及RMSE均低于0.0216和 10.5×10^{-4} ,表明五种干燥模型对试验数据的拟合程度较好。其中,三种温度下热风干燥和红外干燥 Midilli 模型拟合的 R^2 值最高,范围为 0.9995~0.9999, χ^2 值及 RMSE 最低,范围分别为 0.0001~0.0009 和 $0.06 \sim 0.48 \times 10^{-4}$,说明 Midilli 模型对桃渣热风和红

外干燥过程的拟合效果最好。此外，图3对不同干燥条件下桃渣干燥的试验数据与Midilli模型的预测数据进行了比较，该模型得出的预测值使水分比呈直线分布，表明该模型适合用于描述桃渣的干燥特性。

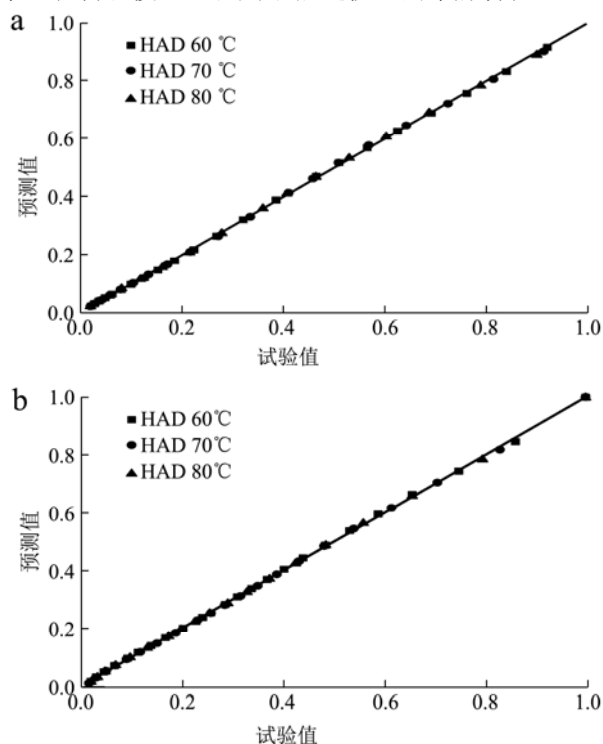


图3 不同干燥条件下桃渣试验水分比与预测水分比的比较

Fig.3 Comparison of the predicted moisture ratios and moisture ratios of peach pomace under different drying conditions

2.3 有效水分扩散系数

由图1可知，热风干燥在最开始时只有短暂的升速过程，而中短波红外干燥过程主要属于降速干燥过程，因此桃渣干燥的有效水分扩散系数可以利用菲克

第二定律进行计算。

根据公式(5)可得，桃渣在60~80℃下热风干燥和中短波红外干燥的线性回归拟合方程、决定系数 R^2 及有效水分扩散系数 D_{eff} 如表3所示。不同干燥条件下的 R^2 均大于0.9843，说明线性拟合效果较好。结果表明，在同一种干燥方式下，随着干燥温度从60℃增加到80℃，热风干燥的有效水分扩散系数增大49.27%，红外干燥增大49.5%，这是由于当样品在较高温度下干燥时，增加的热能会增大水分子的活性，提高物料的干燥速率，从而增大有效水分扩散系数^[12]。此外，在红外80℃干燥条件下有效水分扩散系数的值最大，而且在相同温度下，红外干燥的有效水分扩散系数比热风干燥大，原因主要是红外辐射可以对物料进行快速加热，使物料内部水分蒸发迅速^[13]。

本次试验结果所得的有效水分扩散系数值满足食品和农产品标准的范围(10^{-12} 至 10^{-8} m^2/s)，这与75~105℃条件下干燥苹果果渣的有效水分扩散系数 $1.91\sim 3.93 \times 10^{-9}$ m^2/s ^[14]，50~90℃干燥橄榄副产物的 $1.71\sim 2.03 \times 10^{-9}$ m^2/s ^[15]以及60~75℃下干燥胡萝卜渣的 $2.61\sim 3.64 \times 10^{-9}$ m^2/s ^[16]等的研究结果类似。

表2 不同干燥条件下桃渣的干燥模型数据拟合结果

Table 2 Statistical results of drying models for peach pomace under different drying conditions

模型名称	干燥方式	温度/℃	模型参数					R^2	RMSE	$\chi^2 (\times 10^{-4})$
			k	a	g	n	$b (\times 10^{-4})$			
Lewis	HAD	60	0.0063					0.9995	0.0011	0.49
		70	0.0074					0.9992	0.0016	0.84
		80	0.0086					0.9982	0.0028	1.76
	IRD	60	0.0112					0.9870	0.0216	9.80
		70	0.0134					0.9869	0.0196	9.80
		80	0.0163					0.9858	0.0190	10.5
Page	HAD	60	0.0056	1.0228				0.9997	0.0007	0.34
		70	0.0065	1.0285				0.9994	0.0011	0.62
		80	0.0065	1.0609				0.9993	0.0010	0.69
	IRD	60	0.0237	0.8350				0.9988	0.0019	0.91

		70	0.0277	0.8347		0.9984	0.0023	1.19	
		80	0.0021	0.0143		0.9983	0.0021	1.24	
转下页									
接上页									
		60	0.0064	1.0097		0.9996	0.0008	0.39	
	HAD	70	0.0075	1.0117		0.9993	0.0013	0.70	
Henderson		80	0.0088	1.0183		0.9986	0.0020	1.37	
and Pabis		60	0.0103	0.9359		0.9930	0.0111	5.30	
	IRD	70	0.0123	0.9358		0.9927	0.0103	5.40	
		80	0.0151	0.9347		0.9916	0.0106	6.20	
		60	0.0063	1.0006	-0.0060	0.9998	0.0005	0.25	
	HAD	70	0.0073	1.0011	-0.0065	0.9996	0.0007	0.42	
Verma et		80	0.0081	1.0189	-0.0018	0.9997	0.0005	0.34	
al.		60	0.0098	0.8976	6.7567	0.9970	0.0045	2.26	
	IRD	70	0.0116	0.8894	6.2957	0.9977	0.0031	1.75	
		80	0.0140	0.8761	5.8151	0.998	0.0024	1.50	
		60	0.0066	1.0074	0.9914	-0.25	0.9998	0.0004	0.23
	HAD	70	0.0079	1.0093	0.9852	-0.43	0.9996	0.0006	0.40
Midilli et		80	0.0081	1.0064	1.0076	-0.78	0.9997	0.0003	0.27
al.		60	0.0287	1.0051	0.7839	-1.01	0.9996	0.0005	0.26
	IRD	70	0.0344	1.0028	0.7746	-1.50	0.9998	0.0003	0.18
		80	0.0421	1.0017	0.7643	-1.87	0.9998	0.0002	0.16

表 3 不同干燥条件下桃渣干燥有效水分扩散系数

Table 3 Effective moisture diffusivity of peach pomace under different drying conditions

干燥方式	温度/°C	线性回归拟合方程	R ²	D _{eff} /(m ² /s)
HAD	60	lnMR=-0.0069t+0.0757	0.9947	1.1652×10 ⁻⁹
	70	lnMR=-0.0083t+0.0976	0.9916	1.4016×10 ⁻⁹
	80	lnMR=-0.0103t+0.1444	0.9843	1.7393×10 ⁻⁹
IRD	60	lnMR=-0.0099t-0.0759	0.9954	1.6718×10 ⁻⁹
	70	lnMR=-0.0123t-0.0456	0.9913	2.0771×10 ⁻⁹
	80	lnMR=-0.0148t-0.0610	0.9937	2.4993×10 ⁻⁹

2.4 干燥活化能

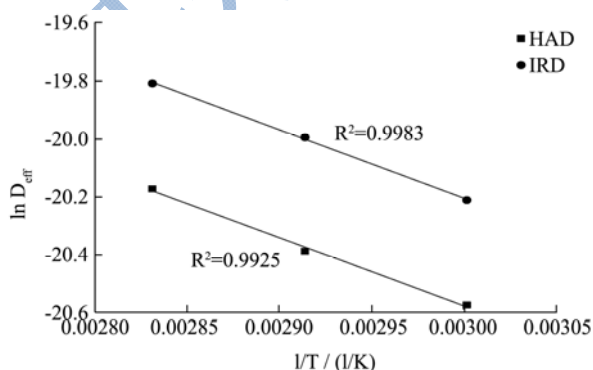


图 4 有效水分扩散系数与干燥温度的关系

Fig.4 The relationship between effective moisture diffusivity and drying temperature

活化能可以通过计算式(6)即阿伦尼乌斯方程中 $\ln D_{eff}$ 对 $1/(T+273.15)$ 的斜率 $-E_a/R$ 得到, 其线性关系如图 4 所示。桃渣热风干燥和中短波红外干燥的活化能分别为 19.56 和 19.68 kJ/mol, 说明去除桃渣中 1 mol 水分所需要的最低能量分别为 19.56 和 19.68 kJ/mol。各种食品和农产品活化能的一般范围为 12.7~110 kJ/mol^[17], 试验结果与苹果果渣的 19.96~22.62 kJ/mol^[18], 甘蔗渣的 19.47 kJ/mol^[19] 及番茄副产物的 23.14 kJ/mol^[20] 等的相近。

2.5 干燥方式对桃渣总酚含量的影响

新鲜桃渣的总酚含量为 2.36 ± 0.09 mg GAE/g(d.b), 两种干燥方式下桃渣的总酚含量见图 5。结果表明, 在相同干燥方式下, 随着干燥温度的升高, 总酚含量也逐渐升高; 而在相同干燥温度下, 中短波红外干燥样品中的总酚保留率较高, 分别为 68.22%、75.42%及 82.63%, 说明红外干燥对桃渣中多酚的破坏较小。Kammoun等^[21]也发现利用红外干燥橙皮时, 样品在较高温度下总酚保留率较高。此外, 利用热风干燥的桃渣在相同温度下总酚含量较低, 因为与红外干燥相比, 其干燥时间较长, 易使样品的营养物质遭到破坏^[22]。高温下样品总酚含量较高的原因可以归结于一些酚酸和类黄酮的释放, 这些酚酸和类黄酮化合物由于热作用在植物基质中以结合态形式存在^[23], 此外, 高温也趋向于降低多酚氧化酶的活性^[24]; 而样品在较低温度下干燥就意味着需要更长的干燥时间, 而这就可能会使一些酚类化合物遭到破坏^[21]。

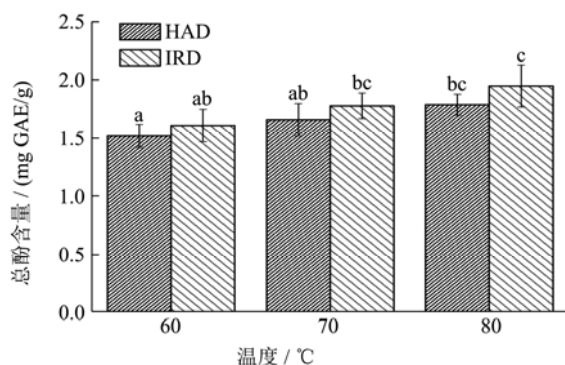


图 5 不同干燥终点桃渣总酚含量

Fig.5 The total phenols content of peach pomace at the drying end point of different drying methods

注: 不同字母表示数据差异显著, $p < 0.05$ 。

3 结论

3.1 相同干燥方式下, 桃渣的干燥速率随温度的升高而增大; 相同干燥温度下, 中短波红外干燥的干燥速率比热风干燥快, 所用时间短。

3.2 利用 5 种干燥模型对试验数据拟合, 发现 Midilli et al.模型的拟合优度最好, 说明其最适合描述桃渣热风 and 红外干燥过程。

3.3 桃渣热风 and 红外干燥的有效水分扩散系数分别为 $1.1652 \sim 1.7393 \times 10^{-9}$ m²/s、 $1.6718 \sim 2.4993 \times 10^{-9}$ m²/s。桃渣热风干燥的活化能为 19.56 kJ/mol, 低于中短波红外干燥的 19.68 kJ/mol。

3.4 在试验温度范围内, 相同干燥方式下桃渣多酚含量随干燥温度的增大而增大, 相同温度下桃渣红外干

燥的多酚含量较热风干燥的高。

参考文献

- [1] 吕健, 毕金峰, 赵晓燕, 等. 国内外桃加工技术研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 268-271
LV Jian, BI Jin-feng, ZHAO Xiao-yan, et al. Research progress on peach processing technology [J]. Food & Machinery, 2012, 28(1): 268-271
- [2] 高鹤, 易建勇, 毕金峰, 等. 中短波红外和热风干燥对番木瓜干燥特性及品质的比较[J]. 现代食品科技, 2015, 2: 190-195
GAO He, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Drying characteristics and quality of *Carica papaya* Linn under med- and short-wave infrared radiation and hot air drying [J]. Modern Food Science & Technology, 2015, 2: 190-195
- [3] Nowak D, Lewicki P P. Quality of infrared dried apple slices [J]. Drying Technology, 2005, 23(4): 831-846
- [4] Shi J, Pan Z, Mchugh T H, et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1962-1972
- [5] Yang J. Infrared, convective, and sequential infrared and convective drying of wine grape pomace [J]. Drying Technology, 2014, 32(6): 686-694
- [6] Kara C, İbrahim Doymaz. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of drying curves of apple pomace [J]. Heat and Mass Transfer, 2015, 51(7): 983-989
- [7] Altemimi A, Watson D G, Choudhary R, et al. Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from peaches and pumpkins [J]. Plos One, 2016, 11(2): e0148758
- [8] 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
- [9] 唐璐璐, 易建勇, 毕金峰, 等. 不同干燥方式对丰水梨干燥特性及品质的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(11): 2171-2179
TANG Lu-lu, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Drying characteristics and quality of Housui pear slices processed using different drying methods [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(11): 2171-2179
- [10] Sun J, Hu X, Zhao G, et al. Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot air pre-drying [J]. Food Science & Technology International,

- 2007, 13(2): 91-97
- [11] Villacorralles L, Floresprieto J J, Xamánvillaseñor J P, et al. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(2): 198-206
- [12] Xiao H W, Pang C L, Wang L H, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2): 233-240
- [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] Wang Z, Sun J, Liao X, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. *Food Research International*, 2007, 40(1): 39-46
- [15] Vegagálvez A, Miranda M, Puente Díaz L, 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
- [16] Kumar N, Sarkar B C, Sharma H K. Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying [J]. *Food Science and Technology International Ciencia Y Tecnología De Los Alimentos Internacional*, 2011, 17(5): 459-469
- [17] N P Zogzas, Z B Maroulis, D Marinoukouris. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs [J]. *Drying Technology*, 1996, 14(10): 2225-2253
- [18] Kaya A, Aydın O, Demirtaş C. Drying kinetics of red delicious apple [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 96(4): 517-524
- [19] Vijayaraj B, Saravanan R, Renganarayanan S. Studies on thin layer drying of bagasse [J]. *International Journal of Energy Research*, 2010, 31(31): 422-437
- [20] 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
- [21] Kammoun Bejar A, Ghanem N, Mihoubi D, et al. Effect of infrared drying on drying kinetics, color, total phenols and water and oil holding capacities of orange (*Citrus Sinensis*) peel and leaves [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2011, 7(5): 341-350
- [22] Alibas O I, Akbudak B, Akbudak N. Microwave drying characteristics of spinach [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(2): 577-583
- [23] Hayat K, Zhang X, Chen H, et al. Liberation and separation of phenolic compounds from citrus mandarin peels by microwave heating and its effect on antioxidant activity [J]. *Separation & Purification Technology*, 2010, 73(3): 371-376
- [24] Krapfenbauer G, Kinner M, Gössinger M, et al. Effect of thermal treatment on the quality of cloudy apple juice [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(15): 5453-5460