

食用槟榔热风干燥特性及动力学模型

赵志友^{1,2}, 肖东^{1,2}, 巢雨舟^{1,2}, 傅孝美^{1,2}, 夏延斌³

(1. 湖南宾之郎食品科技有限公司, 湖南湘潭 411100) (2. 湖南省槟榔加工与食用安全工程技术研究中心, 湖南湘潭 411100) (3. 湖南农业大学食品科技学院, 湖南长沙 410000)

摘要: 本文采用 Fick 第二扩散定律与槟榔干燥的数学模型研究了食用槟榔在不同干燥温度下的热风干燥特性、水分有效扩散系数、表观活化能等参数与干燥动力学方程之间的相互关系。结果表明: 槟榔在 70 °C 与 75 °C 的干燥曲线有显著性差异 ($p < 0.05$), 槟榔热风干燥是内部水分扩散控制的降速干燥过程; 槟榔水分扩散系数变化范围: 青果 $D_{eff} = 6.45 \times 10^{-9} \sim 1.17 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 烟果 $D_{eff} = 7.47 \times 10^{-9} \sim 1.21 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; 干燥表观活化能: 青果 $E_a = 30.32 \text{ kJ/mol}$, 烟果 $E_a = 23.38 \text{ kJ/mol}$ 。单项扩散模型与 Page 模型的常数项系数受温度影响显著 ($p < 0.05$); 单项扩散干燥模型为描述食用槟榔的最佳数学模型(青果: $R^2_{avg} = 0.97$, $RMSE_{avg} = 0.023$; 烟果: $R^2_{avg} = 0.98$, $RMSE_{avg} = 0.025$); 65 °C~85 °C 热风干燥条件下的干燥模型可表述为: $MR_{青果} = (2 \times 10^{-4} T^2 - 0.037 T + 2.54) \exp(-3 \times 10^{-5} T^3 - 0.0064 T^2 + 0.51 T - 13.06) t$; $MR_{烟果} = (3 \times 10^{-4} T^2 - 0.062 T + 3.67) \exp(-4 \times 10^{-4} T^2 + 0.061 T - 2.027) t$, 可为其干燥工艺的控制提供技术依据。

关键词: 槟榔; 烤籽; 热风干燥; 动力学模型; 水分

文章编号: 1673-9078(2017)11-148-155

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.11.022

Hot Air Drying Characteristics and Dynamics Model of *Areca Catechu*

ZHAO Zhi-you^{1,2}, XIAO Dong^{1,2}, CHAO Yu-zhou^{1,2}, FU Xiao-mei^{1,2}, XIA Yan-bin³

(1. Hu'nan Binzhilang Food Science Limited Company, Xiangtan 411100, China) (2. Hu'nan Areca Processing and Edible Safety Engineering Technology Research Center, Xiangtan 411100, China) (3. College of Food Science and Technology, Hu'nan Agricultural University, Changsha 410000, China)

Abstract: The relationships between the parameters of drying characteristics, effective moisture diffusion coefficient, apparent activation energy and the drying kinetics equations of *Areca catechu* in different temperatures were studied using the Fick's second law and the mathematical model of betel nuts drying. The results showed that the drying curve of betel nuts at 70 °C and 75 °C had a significant difference; and the hot air drying was a process of falling-rate drying of internal moisture diffusion control. The variation range of water diffusion coefficient of *Areca catechu* (65 °C~85 °C) was as follows: fruit areca catechu $D_{eff} = 6.45 \times 10^{-9} \sim 1.17 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ Smoke areca catechu $D_{eff} = 7.47 \times 10^{-9} \sim 1.21 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Apparent activation energy was: fruit areca catechu $E_a = 30.32 \text{ kJ/mol}$, smoke areca catechu $E_a = 23.38 \text{ kJ/mol}$. The constant coefficient of the single diffusion model and the Page model was significantly affected by temperature ($p < 0.05$) and single diffusion drying model was the best mathematical model for describing edible areca (Fruit areca catechu: $R^2_{avg} = 0.97$, $RMSE_{avg} = 0.023$; Smoke areca catechu: $R^2_{avg} = 0.98$, $RMSE_{avg} = 0.025$); The drying models of hot air drying at 65 °C~85 °C were described as: $MR_{Fruit\ areca\ catechu} = (2 \times 10^{-4} T^2 - 0.037 T + 2.54) \exp(-3 \times 10^{-5} T^3 - 0.0064 T^2 + 0.51 T - 13.06) t$; $MR_{Smoke\ areca\ catechu} = (3 \times 10^{-4} T^2 - 0.061 T + 3.67) \exp(-4 \times 10^{-4} T^2 + 0.061 T - 2.027) t$.

Key words: *Areca catechu*; baked; hot air drying; dynamic model; water content

槟榔是棕榈科 (*Palmae*) 植物槟榔 (*Areca catechu* Linn) 干燥成熟种子, 其含有人体所需的多种营养成分和活性成分: 槟榔碱、酚类物质、矿物质、氨基酸以及不饱和脂肪酸等^[1], 被列为四大南药 (槟榔、砂仁、益智和巴戟) 之首。槟榔是世界三大口腔嗜好之

收稿日期: 2017-05-17

基金项目: 湖南省科技计划项目 (430S00005/2017-42642); 湖南省科技计划项目 (2017TP2028); 湘潭市科技计划项目 (NY-Z120161002); 湘潭市科技计划项目 (GGPT20163004)

作者简介: 赵志友 (1969-), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 食用槟榔加工技术研究

一(香烟、口香糖和槟榔), 不同地域的人们食用槟榔的方式、方法有一定差异。海南及台湾地区主要是将槟榔鲜果与烟叶同食, 有的是槟榔与茗叶同食, 湖南则是将海南鲜槟榔干制 (根据干制方法不同分为青果槟榔与烟果槟榔), 再经选籽、清洗、煮籽、晾干、发籽、烤籽、上表香、切籽、去核、点卤水 (点核或不点核)、晾干后包装制得食用干槟榔嚼块^[2,3]。

干燥是一个传热传质同时进行的去湿或者脱水的过程, 也是形态持续变化复杂过程, 其规律受到物料特性及干燥介质的影响。一些基于液相扩散理论的传统宏观干燥模型, 如基于 Fick 定律的扩散模型如指数

扩散模型、单项扩散模型及Page方程模型计算得到的有效扩散系数在指导农产品加工干燥方法与工艺优化等过程中仍有广泛的应用^[4-6]，如Rodríguez等人^[7]建立了工业化条件下的油桃经渗透脱水处理后的热风干燥动力学模型，Guan等人^[8]通过研究热风干燥特性建立了新鲜罗非鱼的干燥模型，Corzo等人^[9]通过Fick定律研究了不同成熟期芒果片在热风干燥过程中的水分有效扩散系数。

干燥过程中的传热传质效率、能源消耗和产品品质等均是槟榔烤籽的过程中的重要指标，现阶段食用槟榔加工企业的工艺指标仅仅是含水率降到22%以下（便于进行焖香），同时干燥品质的好坏直接影响槟榔在咀嚼过程中的口感。因此本文基于现阶段槟榔加工工艺（热风干燥温度：50℃~85℃），将量化了温度与干燥时间、干基含水率之间关系的热风干燥技术应用于槟榔烤籽干燥阶段，建立槟榔热风烤籽干燥动力学模型，研究食用槟榔深加工的高效预测、控制和优化，为更有效地评价湖南槟榔加工的干燥特性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

食用槟榔青果与槟榔烟果由湖南宾之郎食品科技有限公司提供，经选籽、清洗、煮籽、发籽并准备进入烤籽工艺。

表1 食用槟榔（烤籽前）基本参数

Table 1 Basic parameters of edible areca (roasted seeds)

	纵径/cm	横径/cm	单颗质量/g	湿基含水率/%
槟榔青果	6.12±0.36	2.45±0.12	10.89±1.68	50.64±0.80
槟榔烟果	5.72±0.25	2.12±0.10	10.41±0.96	47.70±1.26

1.2 主要仪器与设备

101-2AB 电热鼓风干燥箱，天津市泰斯特仪器有限公司；EX125DZH 电子天平，奥豪斯仪器（常州）有限公司（精度 1 mg）；MVL2101B 电子天平，奥豪斯仪器（常州）有限公司；MB25 水分测定仪，奥豪斯仪器（常州）有限公司；MT4-MAX 红外测温仪，福禄克测试仪器（上海）有限公司；数显外径千分尺 211-101（量程：0~50 mm；精度 0.1 mm）桂林广陆数字测控股份有限公司；HYC-390F 医用冷藏箱冰箱，青岛海尔特种电器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 食用槟榔烤籽干燥试验设计

从冰箱中取出保存的槟榔，等待其温度达到室温。选取直径大小相差不大，无腐烂霉变，颗粒饱满的槟榔作为实验物料样品平铺洁净的不锈钢筛网（50 cm*50 cm），加热干空气（相对湿度为 40%）为干燥介质进行热风干燥脱水。鉴于现有槟榔烤籽加工工艺，且考虑到目前企业加工的主要问题是热风温度的选择，因此将热风温度分别设定到 85、80、75、70、65℃（固定条件：风速 1.5 m/s，装载量单层 500 g），风速分别设定为 0.8 m/s，1.2 m/s，1.5 m/s（固定条件：温度 70℃，装载量单层 500 g），装载量分别设定为单层 500 g，双层 1000 g，三层 1500 g（固定条件：温度 70℃，风速 1.5 m/s）分别进行考察。

不同干燥条件下物料干燥终点指标为：湿基含水率 19%~22%（干基 23%~28%），并记录干燥所用时间，重复试验 3 次。将食用槟榔果实热风干燥曲线与现有的经验干燥模型进行拟合，选择拟合度高，参数少的模型；应用理论扩散模型 Fick 第二定律的拟合，计算样品干燥过程的水分有效扩散系数 D_{eff} ，并结合 Arrhenius 方程计算其扩散活化能 E_a 。

1.3.2 槟榔热风干燥特性参数测定

每个热风温度条件下的干燥试样品，每隔 0.5 h 快速从干燥箱中取出样品称重并记录数据，干燥终点由试验要求决定，即不同干燥条件下的所有样品均干燥至湿基含水率为 19%~22%（干基含水率为 23%~28%）。

湿基含水率测定按照 GB 5009.3-2016 方法测定：

$$W(\%) = \frac{m_1}{m} \times 100 \quad (1)$$

干基含水率 M 由湿基来换算：

$$M(\%) = \frac{W}{1-W} \times 100 \quad (2)$$

式中， W 表示槟榔果实湿基含水率，%； m 表示槟榔果实的湿基质量，g； M ，表示槟榔果实的干基含水率，%。

干燥速率的测定：

$$v_i = \frac{M_i - M_t}{t - i} \quad (3)$$

式中， v_i ，表示 i 时刻的样品干燥速率，g/(100g·h)； M_i 和 M_t 分别表示 i 、 t 时刻样品干基含水率，%； $t-i$ ，表示 i 到 t 时刻的干燥时间段，h。

1.3.3 槟榔样品表面温度测定

样品温度的测定采用温度记录仪。测定样品热风干燥过程中槟榔果实表面温度，重复测定 8 次取平均值，每隔 30 min 记一次温度值。

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{H^2}\right] \quad (4)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{H^2}\right] + \frac{8}{9\pi^2} \exp\left[-\frac{9\pi^2 D_{eff} t}{H^2}\right] + \frac{8}{25\pi^2} \exp\left[-\frac{25\pi^2 D_{eff} t}{H^2}\right] \quad (5)$$

公式(5)中, MR 为槟榔物料的平衡水分比, %; M_{eq} 为槟榔物料平衡含水率, %; D_{eff} 为水分有效扩散系数, m^2/s , t 为干燥时间, s ; H 为槟榔物料的当量半径; n 为阶数。

1.3.4 槟榔样品表面参数测定

槟榔样品表面长度及截面直径的测定采用游标卡尺, 重复测定 8 次取平均值, 每隔 30 min 记一次表面参数。

1.3.5 干燥动力学模型

水分扩散传质规律可采用 Fick 第二定律进行描述。除干燥介质中水分以液态形式扩散的假定外, 菲克第二定律还忽略干燥过程介质内部的温度梯度, 为等温干燥过程, 同时认为干燥过程介质不发生收缩。在多种形态食品干燥的水分扩散过程研究中, 它的展开形式, 方程式(4)被广泛采用^[10,11]。

同时, 对于时间较长的干燥过程, 方程中的 n 的高阶可以忽略不计, 即可取 $n=2$ 。综上, 方程式(4)可简化为方程式(5)。

基于 Fick 第二扩散定律的干燥模型中有效扩散系数 D_{eff} 与干燥过程中热风温度 T_g 的关系可以用 Arrhenius 方程进行描述^[23]:

$$D = D_{eff} \exp\left[\frac{-E_a}{R(T_g + 273.15)}\right] \quad (6)$$

(6) 式中, E_a 为表观活化能, J/mol ; T_g 为热风温度, $^{\circ}C$; D_{eff} 水分有效扩散系数, m^2/s ; R 为理想气体常数, J/mol 。

1.3.6 农业物料干燥经验模型

在 Fick 第二扩散定律基础上, 国外研究学者推导出多种干燥经验方程式, 目前, 用来描述农业物料干燥过程的模型一般有 3 种干燥数学模型, 这些模型有如下假设条件: 在干燥初始阶段, 样品水分分布均匀; 表面传质阻力相比内部扩散阻力可忽略不计, 水分蒸发主要受内部扩散控制; 干燥过程的水分有效扩散系数不变等^[12], 并通过决定系数 R^2 与均方根误差 RMSE 评价其拟合优度, 方程如下:

$$\text{单项扩散模型: } MR = \frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = Ae^{-rt} \quad (7)$$

$$\text{指数模型: } MR = \frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = e^{-kt} \quad (8)$$

$$\text{Page 方程: } MR = \frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = e^{-br^N} \quad (9)$$

式中, MR 为槟榔物料的平衡水分比, %; M_{eq} 为槟榔物料平衡含水率, %; t 为干燥时间, h ; A , r 和 N 为待定系数。

1.3.7 统计分析

采用 19.0 版 SPSS 统计分析软件对实验数据进行

方差分析和显著性检验, 其中 R^2 与均方根误差 RMSE 作为模型拟合度评价指标, R^2 越接近 1, 均方根误差 RMSE 值越小, 说明模型拟合度越高; 图表绘制用 2010 Excel 及 Origin 7.5 完成。

2 结果与分析

2.1 食用加工槟榔热风干燥特性

2.1.1 热风温度对槟榔干燥特性的影响

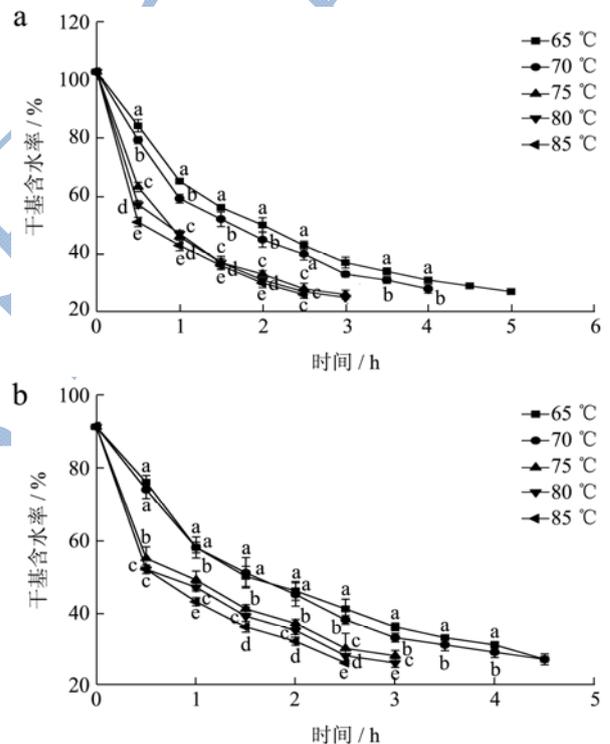


图 1 不同温度下青果槟榔(a)与烟果槟榔(b)含水率曲线图
Fig.1 Drying curves of fruit areca catechu (a) and smoke areca catechu(b) at different hot air temperatures

水分含量对槟榔果实后加工, 感官品质及储藏稳定性均有十分重要的影响。图 1 所示为 5 个温度梯度下的实验干燥曲线, 由图 1 可知, 随着温度的增加, 青果槟榔与烟果槟榔干燥曲线变化趋势更陡, 所用的干燥时间也越短, 青果槟榔达到干燥终点时 65 $^{\circ}C$ 的干燥时间是 85 $^{\circ}C$ 的 2 倍, 烟果槟榔达到干燥终点时 65 $^{\circ}C$ 的干燥时间是 85 $^{\circ}C$ 1.8 倍。从图 1 还可以看出食用槟榔在烤制时 70 $^{\circ}C$ 与 75 $^{\circ}C$ 的干燥曲线差距较大, 这可能是由于干燥过程中, 温度达到物料内部传质的临界

值,干燥过程中的果实与外界热交换、水分扩散的速率发生了跃迁,因此出现较大差异。

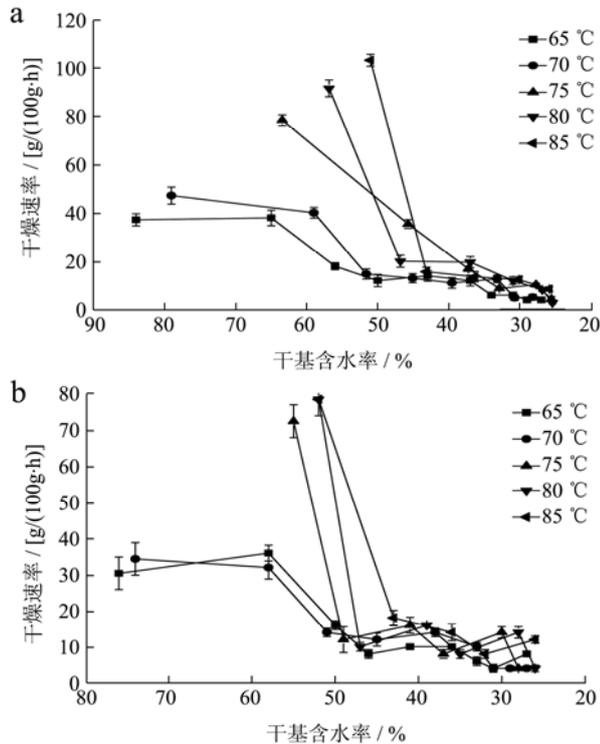


图2 不同温度下槟榔青果(a)与烟果(b)干基含水率与干燥速率曲线

Fig.2 Dry base moisture content and drying curves of fruit areca catechu (a) and smoke areca catechu (b) at different hot air temperatures

食品干燥速率是描述食品干燥过程中变化的基本参数。从图2可以看出,2种槟榔的干燥速率随含水率的降低而下降且受温度的影响显著($p < 0.05$),在热风干燥前期,不同温度下的干燥速率均有显著差异($p < 0.05$)。2种槟榔在干燥过程中没有明显的恒速阶段,干燥均在降速阶段进行,只在干燥接近终点时出现类恒速阶段,干燥后期速率趋于稳定,干燥速率均无显著性差异($p > 0.05$),这一特征与槟榔呈扁球形或圆锥形,因而具有较大的传质表面有关,说明槟榔在烤制阶段由内部传质速率控制,其传递机理是内部水分扩散^[13]。虽然温度越高,干燥速率越快,但干燥风温度过高,能耗多,热效率低,营养成分被破坏得越多且制作产品后在咀嚼过程中发干,纤维不柔嫩,影响口感,综合考虑选择65 °C~70 °C效果较好。

从图3可以看出,随着干燥的进行,样品含水率逐渐降低,而样品温度逐渐增加,且在一定阶段样品温度变化开始平缓,与热介质温度的差距趋于稳定,这表明此时样品的干燥速率较干燥初期已经降低,且

趋于平缓,但是干燥后期不同干燥温度下的表面温度仍存在显著性差异($p < 0.05$)。当热风温度为65 °C与70 °C,2种槟榔的表面温度变化在含水率达到60%~65%后趋于平缓,而在75 °C、80 °C、85 °C时,2种槟榔的表面温度变化在含水率达到35%~45%后趋于平缓,在此之前表面温度均存在显著性差异($p < 0.05$)。且热介质温度越高,样品与之温差越大($p < 0.05$),这可能是由于在较高温度下槟榔物料能保持在一个较高的干燥速率,使得水分蒸发较快,带走的热量也较大,降低了样品温度。

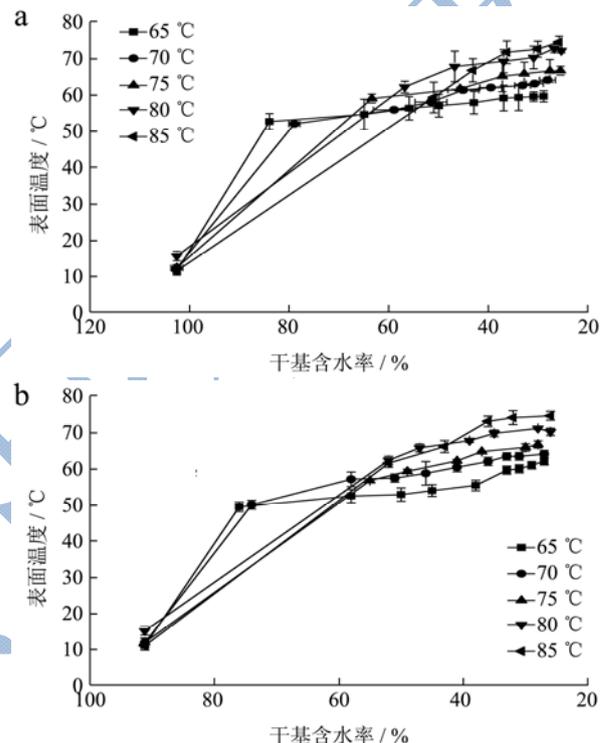
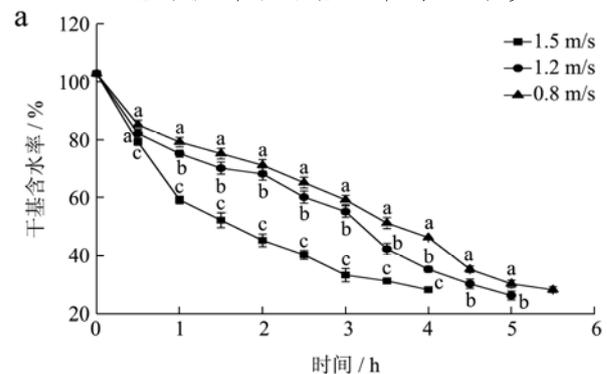


图3 不同温度下槟榔青果(a)与烟果(b)干基含水率与表面温度曲线图

Fig.3 Dry base moisture content and surface temperature of fruit areca catechu (a) and smoke areca catechu (b) at different hot air temperatures

2.1.2 风速对槟榔干燥含水率特性的影响



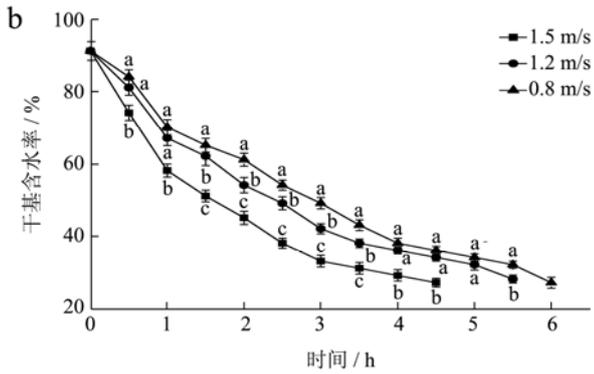


图4 不同热风风速下槟榔青果(a)与烟果(b)的热风干燥曲线
Fig.4 Hot-air drying curves of fruitlet areca catechu(a) and smoke areca catechu(b) at different hot-air velocities

由图4可知,食用槟榔的干燥时间随风速的增大而缩短。风速为0.8 m/s、1.2 m/s和1.5 m/s条件下,槟榔青果干燥至目标含水量所需干燥时间分别为5.5 h、5 h和4 h。槟榔烟果干燥至目标含水率所需的时间分别为6 h、5.5 h和4.5 h,说明在相同条件下,青果槟榔较烟果槟榔更容易干燥。

2.1.3 物料堆积层数对槟榔含水率特性的影响

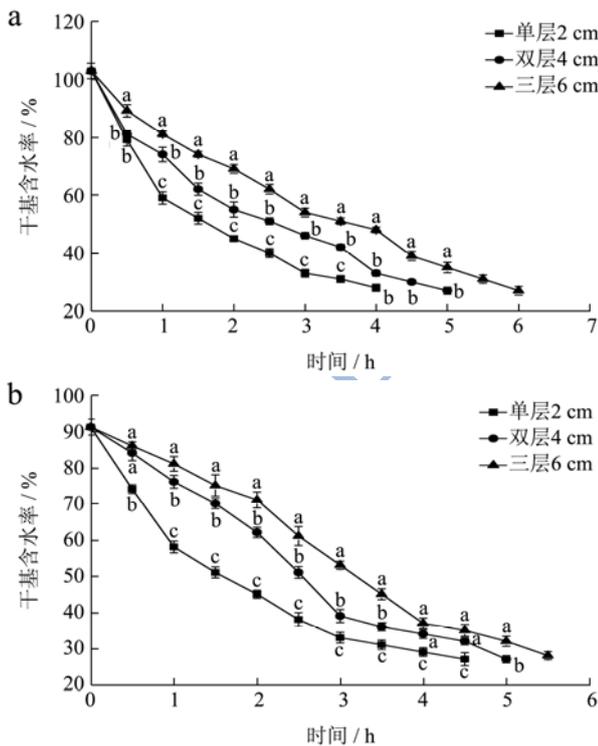


图5 不同物料堆积层数下槟榔青果(a)与烟果(b)的热风干燥曲线

Fig.5 Hot-air drying curves of fruitlet areca catechu (a) and smoke areca catechu(b) at different accumulation layers of materials

由图5可知,热风温度、风速和物料盘规格等条件相同下,料堆积越厚(装载量越大),干燥速率越慢。物料为单层、双层和三层(对应的装载量分别为500 g、

1000 g和1500 g)时,青果干燥至目标含水量分别需要4 h、5 h和6 h,烟果则为4.5 h、5 h和5.5 h。物料堆积厚会导致干燥时间延长,是由于随着装载量的增加,干燥过程所要去除的水分也相应增加,在同一热风温度和风速下,单位时间内蒸发排除水分的能力是一定的,而导致干燥时间延长;而物料层数多,降低与干燥介质的接触面积,不利于中、底层物料水分的挥发,因此导致干燥时间延长,能耗增加,综合考虑选择单层堆积较好。

2.2 食用槟榔烤制过程中水分有效扩散系数

D_{eff} 及表观活化能 E_a

根据计算发现,槟榔热风干燥过程中存在降速干燥段,受内部传质速率控制,且在基于Fick第二扩散传质定律的假设下,水分有效扩散系数 D_{eff} 可以根据 $\ln MR$ 与干燥时间的函数关系式(5)确定, D_{eff} 值愈大表示扩散速率越大,即单位时间内通过单位横截面积 S 的水分子愈多。

表2 不同热风干燥温度下食用槟榔的有效扩散系数

Table 2 Moisture effective diffusion coefficients of drying areca nut at different hot air drying temperatures

热风温度 $T_g/^\circ\text{C}$	水分有效扩散系数 $D_{eff}/(\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$	
	青果槟榔	烟果槟榔
65	6.45±0.21	7.47±0.11
70	7.80±0.15	8.95±0.08
75	8.85±0.09	9.83±0.16
80	10.03±0.12	10.29±0.14
85	11.66±0.16	12.12±0.13 ^b

试验结果见表2,可以看到,青果槟榔热风干燥(65~85 $^\circ\text{C}$)过程中 D_{eff} 范围=6.45 $\times 10^{-9}$ ~1.17 $\times 10^{-8}$ m^2/s ,烟果槟榔热风干燥(65~85 $^\circ\text{C}$)过程中 D_{eff} =7.47 $\times 10^{-9}$ ~1.21 $\times 10^{-8}$ m^2/s ,并随着干燥温度的升高而增大($p<0.05$),这表明实际热风干燥过程中,槟榔果实收缩行为降低了其内部的水分扩散速率,这与干燥速率随着烤制时间延长而降低的结果一致,这与张赛,杨俊红等人^[14,15]对香蕉,菜豆干燥过程影响的研究类似。而在同一热风温度下,烟果槟榔的 D_{eff} 高于青果槟榔3.95%~15.81%,且随着温度的升高,青果槟榔与烟果槟榔的 D_{eff} 差异缩小,如当温度为85 $^\circ\text{C}$ 时,烟果 D_{eff} 仅大于青果 D_{eff} 3.95%,这表明干燥过程中,烟果槟榔收缩行为较青果槟榔更为显著($p<0.05$),但随着温度升高,同一温度下两者 D_{eff} 差距逐渐缩小,说明温度升高能够弥补2种槟榔干燥收缩行为的差距。

基于表2的Fick干燥模型中有效扩散系数 D_{eff} 与

干燥过程中热风温度 T_g 的关系可以用 Arrhenius 方程进行描述, 将扩散系数的自然对数值与温度的倒数进行线性回归, 得出两组拟合的线性回归方程: $Y_{青果} = 3646.57X + 10.62$ ($R^2 = 0.99$), $Y_{烟果} = 2812.69X + 12.87$ ($R^2 = 0.96$)。如图 6, 以 $1/T$ 为横坐标, $-\ln D_{eff}$ 为纵坐标作图, 根据公式 (3) 可知坐标图中斜率即为 E_a/R 的值, 截距项即为 $-\ln D$ 的值, 计算出青果活化能 E_a 为 30.32 kJ/mol, 烟果活化能 E_a 为 23.38 kJ/mol。

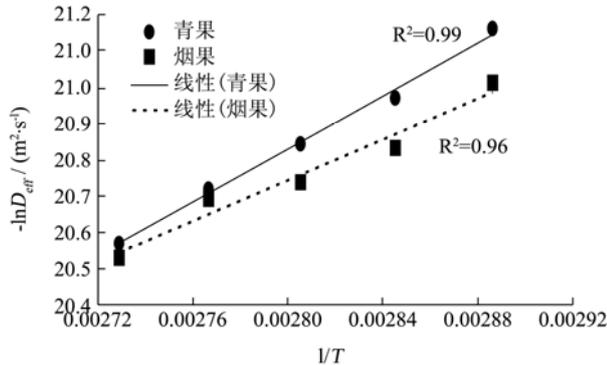


图 6 有效扩散系数与热风温度的关系

Fig.6 The relationship between effective diffusion coefficient and air temperature

活化能是干燥必须克服的最小能量, 活化能越大, 则脱去相同的水分需要更长的时间。试验得到的食用槟榔的表观干燥活化能与周厚源、Dissa 等人^[16,17]对鸡翅根、芒果食品活化能测定的值比较接近。对比 2 种槟榔果实 E_a 值可知, 槟榔青果较烟果槟榔大, 说明干燥同一组分的水, 青果槟榔需要吸收更多的热量。从微观角度来, 可能是由于青果槟榔在干燥过程中的收缩行为导致水分藉以扩散的孔隙通道变小, 部分孔隙

的迂曲度增加, 水分扩散的内部阻力增大, 因此青果槟榔干燥烤制的表观活化能增大。

2.3 食用槟榔干燥动力学研究及分析

为了描述槟榔烤制工艺过程脱水规律, 对干燥时间与水分比的干燥曲线进行回归分析, 为了方便分析, 将 3 种干燥数学模型取对数化成线性方程^[18](见表 3), 并取决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 作为方程接受度的评价指标, R^2 越接近 1, RMSE 越接近 0, 说明方程拟合精度越优。从表 3 中 3 个模型参数可以看出, 3 个模型拟合的一次项系数未知数 r, k, N 表示干燥指数, 干燥温度对一次项系数无明显规律 ($p > 0.05$), 因此一次项系数变化不依赖温度, 可能更多的依赖热风风速或干燥物料组织的特殊性质。而单项扩散模型与 Page 模型的常数项系数 A 与 b 表示干燥常数, 由表 2 可见, 单项扩散模型与 Page 模型的常数项系数 A 值明显受温度影响, 且随着温度增大而减少 (增大) ($p < 0.05$), 因此 k 值与温度有重要关系, 其值越小 (越大) 表明干燥速率更高 ($p < 0.05$), 传热传质效果更好。

3 种模型分别应用于不同干燥过程中的模型参数、决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE 列于表 3 中。 R^2 和 RMSE 表明这些模型在一定精度范围内都可用于模拟槟榔干燥过程。一般认为, 均方根误差对一组测量中的特大或特小误差反映非常敏感, 所以, 均方根误差能够很好地反映出测量的精密度, 当烘干物料的平均水分变化与拟合值的均方根误差低于 5% 时, 则该模型可以准确描述某一干燥过程, 相反模型失真^[19]。

表 3 干燥模型统计分析结果

Table 3 Result of statistical analyses on modeling of moisture content and drying time

模型	青果槟榔模型参数($\times 10^{-2}$)				
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	r_1	A_1	R^2_1	RMSE
单项扩散模型 $\ln MR = \ln A - rt$	65	28.11 \pm 1.11	81.1 \pm 0.57	97.32 \pm 0.21	3.54 \pm 0.3
	70	32.91 \pm 0.51	80.2 \pm 0.21	97.94 \pm 0.38	3.05 \pm 0.57
	75	36.22 \pm 0.90	66.3 \pm 0.98	95.78 \pm 0.27	2.99 \pm 0.29
	80	34.51 \pm 0.81	62.4 \pm 0.56	96.97 \pm 0.14	1.33 \pm 0.41
	85	35.32 \pm 0.95	59.4 \pm 0.71	99.08 \pm 0.62	0.38 \pm 0.10
指数模型 $\ln MR = -kt$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	k_1	R^2_3	RMSE	
	65	34.13 \pm 0.61	91.67 \pm 0.11	5.33 \pm 0.18	
	70	40.72 \pm 0.46	91.08 \pm 0.20	5.65 \pm 0.17	
	75	56.11 \pm 0.37	64.99 \pm 0.29	8.99 \pm 0.31	
	80	56.23 \pm 0.18	49.17 \pm 0.31	8.13 \pm 0.44	
85	63.65 \pm 0.37	18.88 \pm 0.65	8.28 \pm 0.61		

转下页

接上页

		温度/°C	N_1	b_1	R^2_5	RMSE
Page 模型 $\ln(-\ln MR)=\ln b+Nt$		65	36.21±0.31	31.89±0.11	82.92±0.19	6.56±0.35
		70	41.52±0.12	33.90±0.18	86.05±0.21	5.57±0.29
		75	40.01±0.16	49.70±0.21	87.54±0.09	4.35±0.19
		80	35.03±0.28	55.73±0.11	93.01±0.09	2.21±0.15
		85	34.59±0.31	60.59±0.22	98.46±0.29	0.76±0.17
模型		烟果槟榔模型参数($\times 10^{-2}$)				
		温度/°C	r_2	A_2	R^2_2	RMSE
单项目扩散模型 $\ln MR=\ln A-rt$		65	29.49±1.27	94.4±0.67	97.53±0.11	3.69±0.11
		70	32.51±0.51	90.9±0.11	97.89±0.25	3.47±0.24
		75	37.00±0.10	74.7±0.62	96.31±0.16	3.35±0.47
		80	36.51±0.64	70.3±0.09	96.97±0.67	1.93±0.38
		85	35.30±0.70	66.3±0.41	99.93±0.49	0.23±0.19
		温度/°C	k_2		R^2_4	RMSE
指数模型 $\ln MR=-kt$		65	31.40±0.14		97.06±0.91	3.29±0.11
		70	35.91±0.39		96.55±0.37	3.54±0.34
		75	54.40±0.11		83.51±0.29	6.58±0.24
		80	50.72±0.65		70.29±0.35	8.35±0.28
		85	57.73±0.47		50.75±0.28	9.91±0.29
		温度/°C	N_2	b_2	R^2_6	RMSE
Page 模型 $\ln(-\ln MR)=\ln b+Nt$		65	53.31±0.19	16.90±0.30	76.47±0.18	8.66±0.11
		70	52.09±0.35	21.71±0.17	80.92±0.35	7.23±0.12
		75	48.10±0.41	40.00±0.14	86.35±0.11	5.27±0.25
		80	40.26±0.67	44.60±0.11	92.25±0.17	3.42±0.37
		85	39.25±0.18	50.31±0.29	98.67±0.21	1.13±0.12

注：模型表达式中 MR 表水分比； R^2 为模型对不同温度下干燥曲线拟合系数，RMSE 为均方根误差。

从表 3 可以看出，干燥前期均方根误差较大可能与槟榔果实前期水分含量较高导致槟榔果实体积收缩严重有关。相比其他模型，相同干燥条件下，单项目扩散模型方程均具有最大的平均决定系数 $R^2=0.9773$ 和较小的 $RMSE=0.025$ 值。因此，单项目扩散模型适用性最佳，可以应用于 65~85 °C 范围内的热风干燥过程中。将变量温度 $T(^{\circ}C)$ 与单项目扩散模型 $MR=Ae^{-rt}$ 中的变量 r 和 A 进行多项式回归分析，可以得到关于青果与烟果干燥特性回归方程：青果： $r_1=3.00\times 10^{-5}T^3-0.0064T^2+0.51T-13.057(R^2=0.96)$ ， $A_1=2.01\times 10^{-4}T^2-0.037T+2.54(R^2=0.92)$ ；烟果： $r_2=-4.00\times 10^{-4}T^2+0.061T-2.027(R^2=0.9453)$ ， $A_2=3.00\times 10^{-4}T^2-0.062T+3.67(R^2=0.94)$ 。

所以在 65 °C~85 °C 热风干燥条件下的干燥模型可以表述为： $MR_{青果}=(2.01\times 10^{-4}T^2-0.037T+2.54)\exp(-3.00\times 10^{-5}T^3-0.0064T^2+0.51T-13.06)t$ ； $MR_{烟果}=(3.00\times 10^{-4}T^2-0.062T+3.67)\exp(-4.00\times 10^{-4}T^2+0.061T-2.027)t$ 。以上结果可以为湖南槟榔烤籽工艺条件的选择及工艺设备设计提供依据。

3 结论

针对目前食用加工槟榔企业食品存在烤籽工艺问题，研究不同工艺条件下（热风烤籽干燥温度、风速及物料堆积层数）对食用槟榔干燥特性的影响，并结合经验干燥模型、Fick 第二定律，Arrhenius 方程等计算食用加工槟榔干燥过程的水分有效扩散系数 D_{eff} ，扩散活化能 E_a 及干燥特性回归方程，结果表明：

3.1 青果槟榔热风烤籽（65~85 °C）过程中 $D_{eff}=6.45\times 10^{-9}\sim 1.166\times 10^{-8}$ m^2/s ，烟果槟榔热风烤籽 $D_{eff}=7.47\times 10^{-9}\sim 1.21\times 10^{-8}$ m^2/s ，青果槟榔干燥表观活化能 E_a 为 30.32 kJ/mol，烟果槟榔干燥表观活化能 E_a 为 23.38 kJ/mol。

3.2 单项目扩散模型方程为描述青果及烟果的最佳干燥模型（青果：平均 $R^2=0.97$ ，平均 $RMSE=0.023$ ；烟果：平均 $R^2=0.98$ ，平均 $RMSE=0.025$ ），可精确预测槟榔热风过程(65~85 °C)的含水率。在 65 °C~85 °C 热风干燥条件下的干燥模型可以表述为： $MR_{青果}$

$= (2.01 \times 10^{-4} T^2 - 0.037 T + 2.54) \exp(-3.00 \times 10^{-5} T^3 - 0.0064 T^2 + 0.51 T - 13.06) t$; $MR_{\text{烟果}} = (3.00 \times 10^{-4} T^2 - 0.062 T + 3.67) \exp(-4.00 \times 10^{-4} T^2 + 0.061 T - 2.027) t$ 。

参考文献

- [1] 周文化,李忠海,张海德,等.不同槟榔果常规营养成分和槟榔碱含量分析[J].食品与机械,2009,25(3):27-30
ZHOU Wen-hua, LI Zhong-hai, ZHANG Hai-de, et al. Analysis on the routine nutritive components contents and are coline of different are canut [J]. Food and Machinery, 2009, 25(3): 27-30
- [2] 于静静,毕金峰,丁缓缓.不同干燥方式对红枣品质特性的影响[J].现代食品科技,2011,27(6):610-614
YU Jing-jing, BI Jin-feng, DING Huan-huan. Effect of drying treatment methods on the quality properties of red jujube [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(6): 610-614
- [3] 巢雨舟,夏延斌,赵志友,等.食用槟榔超声酶解软化工艺优化[J].农产品加工,2016,21:14-17,21
CHAO Yu-zhou, XIA Yan-bin, ZHAO-Zhi-you, et al. Optimization of ultrasonic enzyme softening technology for edible areca [J]. Farm Products Processing, 2016, 21: 14-17, 21
- [4] 罗树灿,李远志,彭伟睿,等.热风 and 微波结合干燥荔枝加工工艺研究[J].现代食品科技,2006,22(3):10-13
LUO Shu-can, LI Yuan-zhi, PENG Wei-rui, et al. The drying processing technology of combining thermal airflow with microwave for litchi [J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 22(3): 10-13
- [5] 杨玲,陈建,杨屹立,等.甘蓝型油菜籽热风干燥特性及其数学模型[J].现代食品科技,2014,30(8):144-150
YANG Ling, CHEN Jian, YANG Yi-li, et al. Characteristics and mathematical models for hot-air-dried rapeseed (*Brassica napus*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(8): 144-150
- [6] 谢小雷,李侠,张春晖,等.牛肉干中红外-热风组合干燥工艺中水分迁移规律[J].农业工程学报,2014,30(14):322-330
XIE Xiao-lei, LI Xia, ZHANG Chun-hui, et al. Moisture mobility mechanism of beef jerky during combined mid-infrared and hot air drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 322-330
- [7] Rodríguez M M, Mascheroni R H, Quinteroramos A. Mathematical modeling of hot-air drying of osmo-dehydrated nectarines [J]. International Journal of Food Engineering, 2015, 11(4): 533-545
- [8] Guan Z Q, Wang X Z, Li M, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer fresh tilapia fillets [J]. Polish Journal of Food & Nutrition Sciences, 2013, 63(1): 25-33
- [9] Corzo O, Bracho N, Alvarez C. Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(4): 479-484
- [10] Azuara E, Cortes R, Garcia H S, et al. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law [J]. International Journal of Food Science & Technology, 1992, 27(27): 409-418
- [11] 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
- [12] Ahmadqasem M H, Barrajoncatalan E, Micol V, et al. Influence of air temperature on drying kinetics and antioxidant potential of olive pomace [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 119(3): 516-524
- [13] 张学杰,赵永彬,尹明安,胡萝卜渣干燥过程中水分、类胡萝卜素的 变化规律及工艺比较[J].中国农业科学,2007,40(5):995-1001
ZHANG Xue-jie, ZHAO Yong-bin, YIN Ming-an. Effect of drying technologies on the content of moisture and carotenoids in carrot pomace [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(5): 995-1001
- [14] 张赛,陈君若,刘显茜.水果在热风干燥中的水分扩散分形模型[J].农业工程学报,2014,30(4):286-292
ZHANG Sai, CHEN Jun-ruo, LIU Xian-xi. Diffusion fractal model of fruit moisture in hot air drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 286-292
- [15] 杨俊红,焦士龙,郭锦棠,等.菜豆种子薄层干燥物料内部水分扩散系数的确定[J].工程热物理学报,2001,22(2):211-214
YANG Jun-hong, JIAO Shi-long, GUO Jin-tang, et al. Determination of the moisture diffusivity for kidney bean seed thin layer drying [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(2): 211-214
- [16] 周厚源,李汴生,阮征,等.热风温度对湿腌肉鸡翅根干燥动力学及成品品质的影响[J].食品工业科技,2014,35(1):91-97
ZHOU Hou-yuan, LI Bian-sheng, RUAN Zheng, et al. Effect of air temperature on drying kinetics of broiler chicken wings and quality of end product [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(1): 91-97

-
- [17] Dissa A O, Desmorieux H, Bathiebo J, et al. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(4): 429-437
- [18] 魏巍,李维新,何志刚,等.绿茶微波真空干燥特性及动力学模型[J].农业工程学报,2010,26(10):367-371
- WEI Wei, LI Wei-xin, HE Zhi-gang, et al. Drying characteristics and dynamics model of green tea by microwave vacuum drying [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 367-371
- [19] 张绪坤,王高敏,姚斌,等.单粒莲子热风干燥特性及其干燥动力学[J].现代食品科技,2017,33(4):141-148
- ZHANG Xu-kun, WANG Gao-min, YAO Bin, et al. Drying characteristics and kinetics of individual lotus seeds under hot air drying process [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(4): 141-148

