

满晓兰, 李 龙, 张 宏, 等. 基于结构异质性的核桃热风干燥特性及数学模型[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(3): 731-738.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.03.024

基于结构异质性的核桃热风干燥特性及数学模型

满晓兰^{1,2}, 李 龙^{1,2}, 张 宏^{1,2}, 张永成^{1,2}, 兰海鹏^{1,2}

(1.塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2.新疆维吾尔自治区普通高等学校现代农业工程重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要: 为了揭示热风干燥过程中核桃异质结构的水分传递特性, 本研究在 43 ℃ 热风干燥条件下, 对核桃单层干燥过程中果壳、果仁及核桃的干燥特性与有效水分扩散系数进行研究。试验结果表明, 果壳、果仁及核桃的干燥特性规律大致相似, 干燥过程主要发生在降速干燥阶段, 且没有明显恒速干燥阶段, 核桃在干燥过程表现出显著的非稳态性与异质性, 果壳、果仁及核桃的有效水分扩散系数与干基含水率符合三阶-多项式关系, 并同时测得核桃的平均有效水分扩散系数为果壳的 1.01 倍和果仁的 1.41 倍; 模型 4 适合用于预测果壳、果仁及核桃 43 ℃ 热风干燥过程中水分比的变化规律。研究结果为明晰核桃干燥过程中的水分传递机制提供了理论依据。

关键词: 核桃; 热风干燥; 有效水分扩散系数; 数学模型

中图分类号: TS255.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)03-0731-08

Hot-air drying characteristics and mathematical model of walnut based on structural heterogeneity

MAN Xiao-lan^{1,2}, LI Long^{1,2}, ZHANG Hong^{1,2}, ZHANG Yong-cheng^{1,2}, LAN Hai-peng^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China; 2. Key Laboratory of Modern Agricultural Engineering in Colleges and Universities of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Alar 843300, China)

Abstract: To reveal the properties of water transfer in the heterogeneous structure of walnut during hot-air drying, the drying characteristics and effective water diffusion coefficient of the walnut shell, walnut kernel and whole walnut during single-layer drying process under hot-air drying condition of 43 ℃ were studied. The results showed that, the drying characteristics of the walnut shell, walnut kernel and whole walnut were approximately similar. The drying process mainly occurred in the speed-down drying stage, and there was no obvious drying stage with constant-speed. The walnuts showed significant instability and heterogeneity during the drying process. The effective water diffusion coefficient of the walnut shell, walnut kernel and whole walnut were in third-order polynomial relationship with water content of dry base. It was measured that the average effective water diffusion coefficient of the whole walnut was 1.01 times as large as the walnut shell and 1.41 times as large as the walnut kernel. Model four was suitable for predicting the change rule of moisture ratio of walnut shell, walnut

kernel and whole walnut during drying process using 43 ℃ hot-air. The results provide theoretical basis for water transfer mechanism in the drying process of walnuts.

Key words: walnut; hot-air drying; effective water diffusion coefficient; mathematical model

收稿日期: 2020-09-15

基金项目: 新疆生产建设兵团中青年科技创新领军人才计划项目 (2018CB014); 塔里木大学校长基金项目 (TDZKQN2018-13); 塔里木大学研究生科研创新项目 (TDGRI201925)

作者简介: 满晓兰 (1996-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 从事农产品干燥理论与技术研究。 (E-mail) 1024775685@qq.com

通讯作者: 兰海鹏, (E-mail) lanhaipeng@126.com

核桃, 是一种营养价值极高且很受欢迎的坚

果^[1]。脱青皮鲜核桃含水率可达20%~45%,而安全贮藏含水率为8%,因此,干燥是核桃采后降低含水率、保持产品品质必不可少的技术过程^[2-4]。近年来,在实验室规模内研究了各种核桃高效干燥技术,如射频干燥^[5]、微波干燥^[6-7]、远红外干燥^[8]、热泵干燥^[9-10]、间歇烘箱干燥^[11-12]、组合干燥^[5,13]等,但由于加工能力、工艺要求及运营成本等原因,核桃干燥处理仍主要采用43℃热风干燥^[14-16]。然而,核桃在热风干燥过程中,因其果壳密封且坚硬,果仁位于发达的分形木隔膜中,使干燥时间较长、干燥程度难以控制,导致大量能源浪费及果仁干燥不充分或焦化,严重制约了核桃干果品质和核桃产业的发展^[17]。因此,具有异质结构的核桃热风干燥特性的研究仍有待深入,且相关问题的深入研究可为核桃干燥品质和干燥效率的提高奠定坚实基础。

以往对核桃的热风干燥研究,常将核桃近似为一个各向同性的整体,如 Hassan-Beygi 等^[18]研究了核桃的热风干燥特性及有效水分扩散系数,建立了动力学模型;Chen 等^[16]研究了核桃结构对水化和干燥特性的影响,测定了不同条件下核桃的水化动力学;朱德泉等^[17]研究了热风温度、装载量及风速对山核桃热风干燥特性的影响,并确定了最佳工艺参数组合;Yang 等^[19]建立了云南核桃干燥过程的传质数学模型,得出了有效水分扩散系数及干燥过程中内外层的失水规律。然而鲜核桃为典型的多层次结构物料,果仁由吸湿的果壳包裹,且鲜核桃具有不同的物化特性,显然忽略这些因素对干燥过程的影响是不符合实际情况的^[20-22]。Chen 等^[23]分别对核桃的果壳、果仁建立了有效水分扩散系数与样品温度和干基含水率的数学模型,并采用有限元法模拟了核桃的干燥特性。但未对核桃干燥过程中果壳、果仁的干燥特性、有效水分扩散系数及数学模型进行对比分析研究,而这对于理解和准确掌握具有异质结构的核桃的干燥特性非常重要。因此,关于核桃果壳、果仁干燥过程中水分的传递特性仍需进行系统深入地研究。

基于上述分析,本研究以核桃异质结构为切入点,以核桃以及核桃的果壳、果仁为研究对象,对其在43℃条件下的热风干燥特性及动态有效水分扩散系数进行研究,并建立有效水分扩散系数模型与动力学模型,以期对核桃干燥加工和设备的设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所选核桃品种为温185薄皮核桃,采于温宿县核桃实验林场。采收去青皮后剔除病虫害、畸形核桃,同时为减少初始含水率、质量比的变化,选择尺寸和初始质量相似的核桃做样品,通过预试验得到同一批核桃,其平均含水率和组分质量比无显著差异,进而假设其相同。将核桃样品放入密封袋内保存。

对400颗核桃样品进行物理特性研究,得出核桃的平均尺寸:纵向(L)(39.92±2.71)mm、轴向(W)(34.64±1.80)mm和缝向(T)(33.27±2.66)mm,果仁的平均尺寸: L (34.32±2.59)mm、 W (29.89±1.87)mm和 T (25.84±2.14)mm;核桃与果仁的球度分别为:89.75%±2.51%、86.88%±2.77%;果壳、果仁、核桃初始干基含水率分别为:35.86%、41.50%、38.09%。

1.2 试验设备

电子天平(FA1104,精度0.01g),上海市安亭电子仪器厂产品;游标卡尺(精度0.02mm),上海申韩量具有限公司产品;电热鼓风干燥箱(精度±1℃),上海博迅实业有限公司医疗设备厂产品。

1.3 研究方法

1.3.1 试验方法 开启热风干燥箱,预热30min,当温度恒定在43℃时,将样品核桃迅速在托盘中单层放置进行试验,每固定时间间隔(干燥前6.0h固定时间间隔为1.5h,之后的干燥阶段固定时间间隔为2.0h)取出20枚,对每枚核桃人工破壳,果壳、果仁分别称质量并进行含水率测定。并通过果仁、果壳破壳时质量和干物质质量计算核桃的含水率。试验中的含水率一律用干基含水率表示,以上每组试验重复3次取平均值。干基含水率的测定参照GB50093—2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》,其中核桃干基含水率计算公式^[23]为:

$$M_t = \frac{(M_{kt} - M_{kd}) + (M_{rt} - M_{rd})}{M_{kd} + M_{rd}} \quad (1)$$

式中, M_{kt} 、 M_{kd} 分别为果壳 t 时刻的质量与干质量; M_{rt} 、 M_{rd} 分别为果仁 t 时刻的质量与干质量。

1.3.2 干燥特性参数计算

1.3.2.1 水分比 水分比是用来表示一定条件下物料的剩余水分率,计算公式为:

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

式中, M_R 为水分比; M_e 为干燥到平衡时的干基含水率; M_t 为 t 时刻的干基含水率; M_0 为初始时刻的干基含水率。

1.3.2.2 干燥速率 干燥速率是研究干燥动力学的一个重要参数,能够反映干燥时间、干基含水率和干燥速率之间的关系。计算公式为:

$$D_R = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (3)$$

式中, D_R 为干燥速率; $M_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的干基含水率; Δt 为 $t+\Delta t$ 与 t 时刻的时间差。

1.3.3 有效水分扩散系数 有效水分扩散系数 (D_{eff}) 是在水分浓度梯度为 1 的条件下,每秒通过单位面积的水分扩散量,是计算、模拟干燥物料水分迁移机理必不可少的参数之一。当长方形、球形等形状的物料的干燥主要由降速干燥阶段控制时,可以用 Fick 第二定律来描述物料内部的水分扩散过程。由于试验样品核桃与果仁的球度为 $89.75\% \pm 2.51\%$ 、 $86.88\% \pm 2.77\%$,因此将核桃以及核桃的果壳、果仁作为球体处理^[18-19,23]。

Crank^[24]提出了 Fick 第二定律在球体中水分传递的解析解,通过假设干燥过程中有效水分扩散系数是恒定和径向的,来描述整个降速阶段水分的传递过程。 D_{eff} 可由下列方程计算:

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{R_g^2}\right) \quad (4)$$

式中: n 为项数, $n=1, 2, 3 \cdots n$; t 为干燥时间; R_g

为球体的有效半径; D_{eff} 为有效水分扩散系数; 对于 $n>1$ 的序列中的项,随着 t 的增加,每个项都接近于零。忽略高阶项 ($n>1$), 方程变为:

$$M_R = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{R_g^2}\right) \quad (5)$$

球体有效半径计算公式^[25]为:

$$R_g^2 = \frac{\sqrt[3]{L \cdot W \cdot T}}{2} \quad (6)$$

式中, L 、 W 、 T 分别为核桃轴向尺寸、纵向尺寸、缝向尺寸。

平均有效水分扩散系数 (D_{avg}) 计算公式为^[26]:

$$D_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n D_{\text{eff}} \right) \quad (7)$$

用三阶-多项式方程拟合平均干基含水率 (M_{avg}) 对 D_{eff} 的影响方程^[26]:

$$D_{\text{eff}} = A + B M_{\text{avg}} + C M_{\text{avg}}^2 + D M_{\text{avg}}^3 \quad (8)$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 为回归系数。

1.3.4 数学模型建立与分析方法

1.3.4.1 有效水分扩散系数模型 用软件中的非线性回归工具包确定模型中的回归参数,用调整后的相关系数 (R_{adj}^2) 和均方根误差 ($RMSE$) 来评价模型对实验数据的适应度和有效性^[23]。

1.3.4.2 动力学模型 为准确描述与预测果壳、果仁及核桃热风干燥过程中的水分散失情况,从众多的干燥动力学模型中选出 12 个经典的数学模型 (表 1) 对其干燥曲线分别进行拟合,并根据决定系数 (R^2) 的最大化,残差平方和 (SSE) 和均方根误差 ($RMSE$) 的最小化,选出最合适的数学模型^[27-28]。

表 1 12 个干燥曲线数学模型

Table 1 Twelve mathematical models for drying curves

模型编号	模型公式	参数	参考文献
模型 1	$M_R = \exp(-kt)$	k	[29]
模型 2	$M_R = \exp(-kt^n)$	k, n	[7]、[18]
模型 3	$M_R = a \exp(-kt)$	a, k	[30]
模型 4	$M_R = a \exp(k_0 t) + b \exp(k_1 t)$	a, b, k_0, k_1	[31]
模型 5	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	a, k	[32]
模型 6	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	a, g, k	[33]
模型 7	$M_R = a \exp(-kt) + c$	a, c, k	[27]、[30]
模型 8	$M_R = 1 + at + bt^2$	a, b	[34]
模型 9	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	a, b, k	[35]
模型 10	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$	a, n, k	[36]
模型 11	$M_R = \exp[-(kt)^n]$	n, k	[28]
模型 12	$M_R = a - b \exp(-kt^n)$	a, b, k, n	[37]

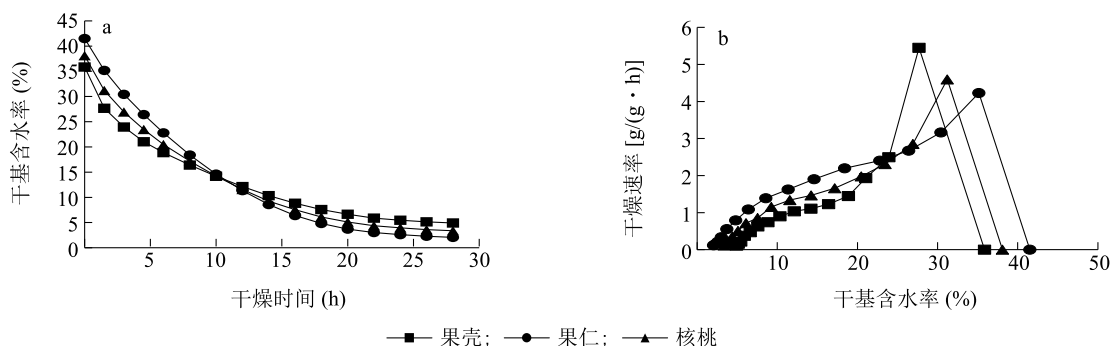
2 结果与分析

2.1 果壳、果仁及核桃干燥特性

图 1 为果壳、果仁及核桃在 43 ℃ 热风干燥条件下的干燥特性曲线。从图 1 可以看出,核桃热风干燥特性曲线及干燥速率曲线始终处于果仁和果壳之间。

由图 1a 可知,整个干燥过程果壳、果仁及核桃干燥特性相似,干基含水率随着干燥时间延长而减小。在干燥结束时果仁比果壳的含水率低,这与自然晾晒储存后的状态相似。这说明,整个干燥过程中果仁失水较果壳多。由图 1b 可知,果壳、果仁及核桃在热风干燥过程中干燥速率变化趋势相似,在干燥起始阶段,干燥速率变化最快,出现峰值,然后,随含水率的减小而减小,干燥过程主要处于降速干燥阶段。这说明干燥过程由内部传质速率控制,其传递机理是扩散^[32,36],因此,公式(5)可测定各结构有效水分扩散系数。在类似物料(如莲子、澳洲坚果、火龙果等)热

风干燥过程中也发现了类似的结果^[36,38-39]。由图 1b 还可以看出,在前期干燥阶段($t < 1.5$ h),果壳干燥速率的增加大于果仁,因而果壳的干燥速率大于果仁。然而,在后期干燥阶段,果壳与果仁的干燥速率差异逐渐减小,最终趋于一致。根据干燥原理,在干燥前期,干燥速率受限于传热速度及由外而内的传热方向,当水分蒸发发生在食品材料的外层(本研究指果壳)时,而内部(本研究指果仁)湿度比外层大^[20,40]。随着干燥的进行,水分蒸发界面从果壳(外层)逐渐向果仁(内部)移动,延长了水分传递路径;另外,当果仁失水后开始收缩,核桃内部出现间隙,果壳与果仁之间存在一层空气介质,而空气的传导系数远小于核桃固体物料的传导系数,从而使水分扩散和热量传递变慢,干燥速率受限^[41-42]。在干燥后期,由于果壳、果仁含水率都很低,因此可散失的水分都很少且水分扩散速度可能都较低,因而导致干燥速率差异逐渐减小,最终趋于一致。



a.干燥特性曲线;b.干燥速率曲线。

图 1 果壳、果仁及核桃的热风干燥特性曲线及干燥速率曲线

Fig.1 Hot-air drying curve and drying rate curve of walnut shell, walnut kernel and whole walnut

2.2 有效水分扩散系数

2.2.1 有效水分扩散系数的变化规律 果壳、果仁及核桃的干燥过程主要处在降速阶段,这说明内部的扩散是水分移动的主要形式,因此,对果壳、果仁及核桃的干燥过程的有效水分扩散系数进行比较和分析,有利于更合理地控制干燥参数,改进干燥工艺和方法,提高干燥效率。

图 2 为果壳、果仁及核桃在热风干燥过程中有效水分扩散系数随干基含水率的变化规律。由图 2 可知,果壳、果仁及核桃的有效水分扩散系数随干基含水率的降低迅速减小,最后趋于平缓。在整个热风干燥过程中果壳与核桃的有效水分扩散系数非常

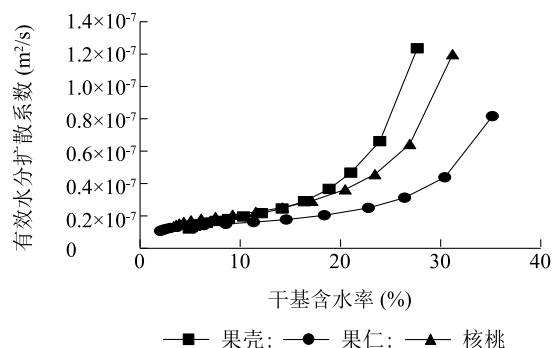


图 2 有效水分扩散系数随干基含水率的变化曲线

Fig.2 Curve of effective water diffusion coefficient with the change of dry base water content

接近,平均有效水分扩散系数分别为 $2.95\times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$ 、 $2.99\times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$,在澳洲坚果热风干燥过程中也出现了这种情况^[38]。这主要是因为,核桃主要处于降速干燥阶段,内部扩散是水分移动的主要形式,而果仁由吸湿多孔的木质结构的果壳包裹,所以导致果仁的水分需通过果壳才能蒸发出来。果壳内壁与外壁孔隙分布不同,内壁孔隙大、结构疏松,更容易吸水;外壁孔隙小、结构相对紧凑,吸水性相对较差^[23,43]。干燥过程中果仁的水分大部分先被果壳内壁吸收,果壳内壁外壁水分形成梯度差,使得果仁中水分经果壳内壁向果壳外壁移动,才能最终蒸发。由此可见,在核桃的干燥过程中,果壳近似一个“中转站”,将果仁中的水分不断转移出来,果壳扩散的水分还包括大部分果仁的水分。因此,在干燥过程中核桃与果壳的水分扩散形式更加接近。

表2 平均有效水分扩散系数拟合参数及其平均值

Table 2 Fitting parameters of effective water diffusion coefficient and their mean values

结构	D_{avg} (m^2/s)	回归系数				R^2_{adj}	RMSE
		A	B	C	D		
果壳	2.95×10^{-8}	-1.62×10^{-8}	8.63×10^{-9}	-7.04×10^{-10}	2.07×10^{-11}	0.996	3.57×10^{-17}
果仁	2.12×10^{-8}	5.91×10^{-9}	2.59×10^{-9}	-2.04×10^{-10}	5.40×10^{-12}	0.991	3.59×10^{-17}
核桃	2.99×10^{-8}	-1.04×10^{-9}	5.51×10^{-9}	-4.37×10^{-10}	1.22×10^{-11}	0.994	5.39×10^{-17}

2.3 干燥动力学模型的确定

2.3.1 模型选择 由表3可知,相同干燥条件下,对于果壳,模型9、模型4、模型6的 R^2 、RMSE和SSE值均为0.998 50、0.009 77、0.001 53,对于核桃,模型9、模型4、模型6的 R^2 、RMSE和SSE值均为0.999 03、0.008 76、0.001 23,说明这3种模型均能较好描述果壳与核桃干燥过程中水分比的变化情况。不过,这3种模型的形式相似,对于果壳: a 近似相等、 $b\approx 1-a$ 、 $k_0\approx -k$ 、 $k_1\approx -g\approx -kb$,对于核桃,同理,所以果壳及核桃的模型9、模型6可以简化为模型4^[29]。对于果仁,模型4的 R^2 平均值最接近1, RMSE和SSE平均值最小。因此,模型4适用性最佳,可作为描述果壳、果仁及核桃43℃热风干燥的最优模型。将各项系数代入模型,得到回归方程。其中:

果壳: $M_{\text{R}}=0.798\ 09\exp(-0.070\ 69t)+0.201\ 33\exp(-0.830\ 21t)$;

本研究中确定的核桃各异质结构的有效水分扩散系数均在典型的坚果有效水分扩散系数范围($1\times 10^{-7}\sim 1\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$)内,包括澳洲坚果^[38,44]、迪卡坚果^[45]。

2.2.2 平均有效水分扩散系数的数学模型建立

由表2可知核桃 D_{avg} 为果壳的1.01倍,为果仁的1.41倍,且果壳 D_{avg} 为果仁的1.39倍。分别将果壳、果仁及核桃的回归系数代入模型公式,得到三阶-多项式方程。其中:

果壳: $D_{\text{eff}}=-1.62\times 10^{-8}+8.63\times 10^{-9}M_{\text{avg}}-7.04\times 10^{-10}M_{\text{avg}}^2+2.07\times 10^{-11}M_{\text{avg}}^3$

果仁: $D_{\text{eff}}=5.91\times 10^{-9}+2.59\times 10^{-9}M_{\text{avg}}-2.04\times 10^{-10}M_{\text{avg}}^2+5.40\times 10^{-12}M_{\text{avg}}^3$

核桃: $D_{\text{eff}}=-1.04\times 10^{-9}+5.51\times 10^{-9}M_{\text{avg}}-4.37\times 10^{-10}M_{\text{avg}}^2+1.22\times 10^{-11}M_{\text{avg}}^3$

果仁: $M_{\text{R}}=10.744\ 00\exp(-0.155\ 12t)-9.754\ 90\exp(-0.161\ 78t)$;

核桃: $M_{\text{R}}=0.057\ 85\exp(-2.657\ 60t)+0.942\ 15\exp(-0.094\ 36t)$;

2.3.2 模型验证 为了检验模型预测值与试验数据的拟合准确度,再做一组试验进行检验。比较水分比的试验值和模型4的预测值,如图3所示。由图3可看出,果壳、果仁及核桃的模型4预测值与试验实测值的拟合度较高,其相关系数分别为0.997、0.996、0.991,其整个干燥过程中的均方差为1.46%、2.37%、3.38%,说明模型4适合用于预测核桃热风干燥过程中果壳、果仁及核桃水分比的变化规律。由图3还可以看出,果壳、果仁的拟合度相比核桃更优,核桃的模型预测值在干燥后期相对误差的迅速增大可能与多孔果壳及核桃内部间隙阻碍了核桃水分、热量传递有关^[41-42]。

表 3 12 种模型的预测结果

Table 3 Forecasting results of twelve models

模型 编号	公式	结构	参数				R^2	RMES	SSE
模型 1	$M_R = \exp(-kt)$	果壳	$k=0.092\ 56$				0.988 01	0.048 27	0.037 28
		果仁	$k=0.108\ 37$				0.997 70	0.016 98	0.004 61
		核桃	$k=0.100\ 99$				0.998 18	0.017 45	0.004 87
模型 2	$M_R = \exp(-kt^n)$	果壳	$k=0.173\ 58$	$n=0.745\ 43$			0.998 28	0.010 39	0.001 73
		果仁	$k=0.089\ 67$	$n=1.080\ 60$			0.998 67	0.011 27	0.002 03
		核桃	$k=0.123\ 02$	$n=0.917\ 95$			0.998 65	0.010 33	0.001 71
模型 3	$M_R = a \exp(-kt)$	果壳	$k=0.081\ 92$	$a=0.906\ 24$			0.982 88	0.033 72	0.018 19
		果仁	$k=0.110\ 16$	$a=1.015\ 50$			0.997 43	0.016 06	0.004 13
		核桃	$k=0.097\ 49$	$a=0.969\ 72$			0.997 75	0.013 62	0.002 97
模型 4	$M_R = a \exp(k_0 t) + b \exp(k_1 t)$	果壳	$a=0.798\ 09$	$b=0.201\ 33$	$k_0=-0.070\ 69$	$k_1=-0.830\ 21$	0.998 50	0.009 77	0.001 53
		果仁	$a=10.744\ 00$	$b=-9.754\ 90$	$k_0=-0.155\ 12$	$k_1=-0.161\ 78$	0.999 03	0.009 46	0.001 43
		核桃	$a=0.057\ 85$	$b=0.942\ 15$	$k_0=-2.657\ 60$	$k_1=-0.094\ 36$	0.999 03	0.008 76	0.001 23
模型 5	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	果壳	$k=0.424\ 57$	$a=0.177\ 63$			0.996 33	0.022 29	0.007 95
		果仁	$k=0.132\ 37$	$a=1.547\ 60$			0.998 94	0.010 08	0.001 63
		核桃	$k=1.567\ 70$	$a=0.060\ 09$			0.998 32	0.010 88	0.001 99
模型 6	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	果壳	$a=0.798\ 17$	$k=0.070\ 70$	$g=0.832\ 66$		0.998 50	0.009 77	0.001 53
		果仁	$a=-71.217\ 00$	$k=0.155\ 97$	$g=0.155\ 10$		0.998 98	0.009 91	0.001 57
		核桃	$a=0.942\ 15$	$k=0.094\ 36$	$g=2.657\ 60$		0.999 03	0.008 76	0.001 23
模型 7	$M_R = a \exp(-kt) + c$	果壳	$a=0.840\ 51$	$k=0.115\ 20$	$c=0.106\ 92$		0.992 16	0.022 11	0.007 82
		果仁	$a=1.038\ 50$	$k=0.100\ 85$	$c=-0.034\ 14$		0.998 23	0.012 76	0.002 60
		核桃	$a=0.950\ 68$	$k=0.106\ 01$	$c=0.029\ 53$		0.998 41	0.011 15	0.001 99
模型 8	$M_R = 1 + at + bt^2$	果壳	$a=-0.078\ 13$	$b=0.001\ 77$			0.973 55	0.057 90	0.053 64
		果仁	$a=-0.081\ 67$	$b=0.001\ 75$			0.997 01	0.021 72	0.007 55
		核桃	$a=-0.079\ 86$	$b=0.001\ 75$			0.990 93	0.036 72	0.021 57
模型 9	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	果壳	$a=0.798\ 25$	$k=0.070\ 70$	$b=11.792\ 00$		0.998 50	0.009 77	0.001 53
		果仁	$a=-21.707\ 78$	$k=0.156\ 95$	$b=0.982\ 20$		0.998 98	0.009 91	0.001 57
		核桃	$a=0.942\ 15$	$k=0.094\ 36$	$b=28.165\ 00$		0.999 03	0.008 76	0.001 23
模型 10	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$	果壳	$a=0.995\ 10$	$k=0.174\ 82$	$b=0.174\ 82$	$n=0.730\ 01$	0.998 40	0.009 98	0.001 59
		果仁	$a=0.986\ 62$	$k=0.083\ 58$	$b=5.423\ 80$	$n=1.105\ 10$	0.998 76	0.010 69	0.001 83
		核桃	$a=0.990\ 90$	$k=0.116\ 67$	$b=0.000\ 24$	$n=0.940\ 39$	0.998 71	0.010 05	0.001 62
模型 11	$M_R = \exp[-(kt)^n]$	果壳	$k=0.092\ 56$	$n=1.000\ 00$			0.988 01	0.048 27	0.037 28
		果仁	$k=0.108\ 37$	$n=1.000\ 00$			0.997 70	0.016 98	0.004 61
		核桃	$k=0.10099$	$n=1.000\ 00$			0.998 18	0.017 45	0.004 87
模型 12	$M_R = a - b \exp(-kt^n)$	果壳	$a=-0.042\ 00$	$k=0.170\ 29$	$b=-1.037\ 90$	$n=0.718\ 33$	0.998 46	0.009 98	0.001 54
		果仁	$a=-0.001\ 71$	$k=0.084\ 58$	$b=-0.989\ 20$	$n=1.097\ 60$	0.998 76	0.010 69	0.001 83
		核桃	$a=0.003\ 87$	$k=0.118\ 39$	$b=-0.987\ 85$	$n=0.933\ 76$	0.998 69	0.010 11	0.001 63

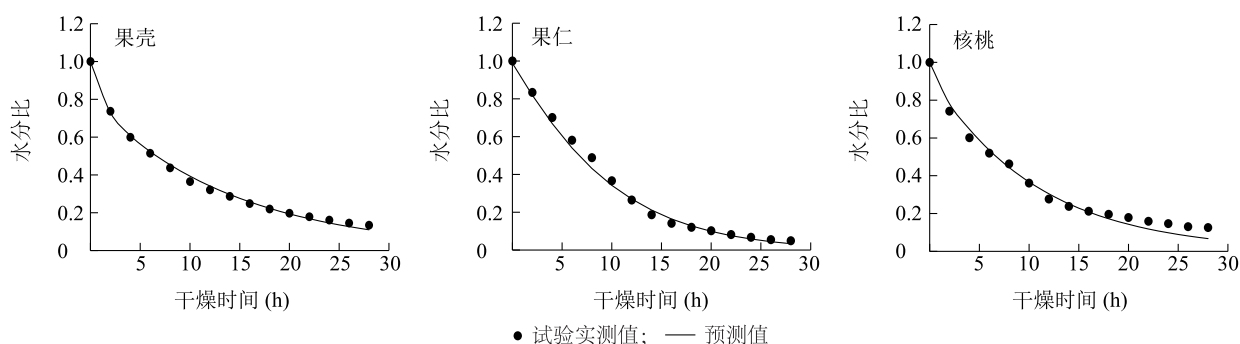


图3 相同干燥条件下水分比的试验实测值与预测值

Fig.3 Experimental tested and predicted values of water ratio (M_R) under the same drying condition

3 结论

研究结果表明,果壳、果仁及核桃干燥特性规律大致相似,干燥过程主要发生在降速干燥阶段;核桃在干燥过程中表现出很强的非稳态性与异质性,并同时测得了果壳、果仁及核桃平均有效水分扩散系数,核桃 D_{avg} 为果壳的 1.01 倍,为果仁的 1.41 倍;有效水分扩散系数与干基含水率符合三阶-多项式关系($R^2 > 0.99$);模型 4 预测值与试验实测值拟合度较高,说明适合用于预测核桃热风 43 °C 干燥过程中果壳、果仁及核桃水分比的变化规律,且果壳、果仁的拟合度相比核桃更优。研究结果可为核桃工业化的干燥工艺和设备研发提供理论依据。

参考文献:

- [1] CAGLARIRMAK N. Biochemical and physical properties of some walnut genotypes (*Juglans regia* L.) [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2003, 47(1): 28.
- [2] 马艳萍,刘兴华,袁德保,等. 不同品种鲜食核桃冷藏期间呼吸强度及品质变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 384-388.
- [3] 郭忠明. 谈核桃的采收与贮藏[J]. 北京农业, 2013(24): 189.
- [4] 高军龙,赵文革,陈岳祥. 新鲜山核桃坚果原料产地即时热风干燥工艺及优化[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(12): 128-131.
- [5] ZHOU X, GAO H Y, MITCHAM E J, et al. Comparative analyses of three dehydration methods on drying characteristics and oil quality of in-shell walnuts [J]. Drying Technology, 2017, 36(4): 477-490.
- [6] 朱德泉,马 锦,蒋 锐,等. 山核桃坚果分段变功率微波干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 268-274.
- [7] 马 锦,丰韶雷,朱德泉,等. 山核桃微波干燥动力学模型研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 108-112.
- [8] ATUNGULU G G, TEH H E, WANG T, et al. Infrared pre-drying and dry-dehulling of walnuts for improved processing efficiency and product quality [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29: 961-971.
- [9] 刘东琴,王 维,卢军党,等. 核桃热泵穿流干燥特性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 216-218, 306.
- [10] 陈智平,陈盈希,吴潇潇,等. 热泵干燥设备在干燥核桃的试验中的应用[J]. 农村实用技术, 2018(6): 18-20.
- [11] QU Q L, YANG X Y, FU M R, et al. Effects of three conventional drying methods on the lipid oxidation, fatty acids composition, and antioxidant activities of walnut (*Juglans regia* L.) [J]. Drying Technology, 2016, 34(7): 822-829.
- [12] FU M R, QU Q L, YANG X Y, et al. Effect of intermittent oven drying on lipid oxidation, fatty acids composition and antioxidant activities of walnut [J]. LWT Food Science & Technology, 2016, 65: 1126-1132.
- [13] 张 波. 核桃射频热风联合干燥特性及品质变化研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2017.
- [14] 杨忠强,闫圣坤,崔宽波,等. 中美青核桃加工成套装备及技术分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 228-232.
- [15] 孙洁琼. 漾濞县热风炉核桃烘烤技术的推广研究[D]. 昆明:云南师范大学, 2019.
- [16] CHEN C, ZHANG W P, VENKITASAMY C, et al. Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristics [J]. Drying Technology, 2020, 38(8): 975-986.
- [17] 朱德泉,曹成茂,丁正耀,等. 山核桃坚果热风干燥特性及其工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 364-369.
- [18] HASSAN-BEYGI 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.
- [19] YANG W, JIANG M, GUO H, et al. Mass transfer simulation of sigillate walnut (*Juglans sigillata* Dode) during convection drying [J]. Journal of Kunming University of Ence & Technology, 2015, 40(3): 84-91.
- [20] MAMANI I. Modeling of thermal properties of persian walnut kernel as a function of moisture content and temperature using response surface methodology [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2015, 39(6): 2762-2772.
- [21] 卢映洁,任广跃,段 续,等. 热风干燥过程中带壳鲜花生水分

- 迁移特性及品质变化[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 86-92.
- [22] KHIR R, PAN Z L, ATUNGULU G G. Size and moisture distribution characteristics of walnuts and their components[J]. Food & Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 771-782.
- [23] CHEN C, VENKITASAMY C, ZHANG W P, et al. Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150:1-10.
- [24] CRANK J. The mathematics of diffusion[M]. Oxford: Oxford University Press, 1975.
- [25] MOHSENIN N N. Physical characteristics: physical properties of plant and animal materials[M]. New York, USA: Gordon and Breach Sci Press, 1986.
- [26] SRIKIATDEN J, ROBERTS J S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(1): 143-152.
- [27] 于镇伟, 陈坤杰, 高 崎, 等. 有机污泥干燥特性与干燥模型研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 286-291.
- [28] 于海明, 李海源, 张欣悦, 等. 水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥动力学模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 339-348.
- [29] 王凤贺, 丁冶春, 陈鹏泉, 等. 油茶籽热风干燥动力学研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 433-439.
- [30] LIU X, QIU Z, WANG L, et al. Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of *Panax notoginseng* extract[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(4): 928-932.
- [31] LI C, LIAO J J, YIN Y, et al. Kinetic analysis on the microwave drying of different forms of water in lignite[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 176: 174-181.
- [32] 王汉羊, 刘 丹, 于海明. 山药微波热风耦合干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 115-121.
- [33] MIRZABEIGI K O, SADEGHI M, MIREEI S A, et al. Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2016, 9(3): 216-223.
- [34] JAFARI H, KALANTARI D, AZADBAKHT M. Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and its qualitative study[J]. Energy, 2017, 138: 1016-1029.
- [35] YALDYZ O, ERTEKYN C. Thin layer solar drying of some vegetables[J]. Drying Technology, 2007, 19(3/4): 583-597.
- [36] 徐建国, 张森旺, 徐 刚, 等. 莲子薄层热风干燥特性与水分变化规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 303-309.
- [37] WEIBULL W. A statistical distribution of wide applicability[J]. J Appl Mech, 1951, 18(2): 293-297.
- [38] 刁卓越. 澳洲坚果干燥特性及力学特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [39] 楚文靖, 盛丹梅, 张 楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 150-155.
- [40] MUJUMDAR A S. Handbook of industrial drying[M]. fourth ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [41] WANG S, IKEDIALA J N, TANG J, et al. Radio frequency treatments to control codling moth in in-shell walnuts[J]. Postharvest Biology & Technology, 2001, 22(1): 29-38.
- [42] WANG S, TANG J, JOHNSON J A, et al. Process protocols based on radio frequency energy to control field and storage pests in in-shell walnuts[J]. Postharvest Biology & Technology, 2002, 26(3): 265-273.
- [43] 张 宏, 马 岩, 郭文松, 等. 基于细胞水平上的温 185 核桃壳脆裂机理分析[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3): 128-132.
- [44] PANKAEW P, JANJAI S, NILNONT W, et al. Moisture desorption isotherm, diffusivity and finite element simulation of drying of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) [J]. Food & Bioprocess Technology, 2016, 100: 16-24.
- [45] AREGBESOLA O A, OGUNSINA B S, SOFOLAHAN A E, et al. Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels[J]. Nigerian Food Journal, 2015, 33(1): 83-89.

(责任编辑: 陈海霞)