

基于 Dincer 模型不同干燥方式下光皮木瓜干燥特性研究

巨浩羽¹, 赵海燕², 张 菊¹, 张卫鹏³, 于贤龙⁴, 王吉强⁴, 高振江⁴, 肖红伟^{4*}

1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061

2. 河北经贸大学工商管理学院, 河北 石家庄 050061

3. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048

4. 中国农业大学工学院, 北京 100083

摘要: 目的 基于 Dincer 模型探究不同干燥方式下光皮木瓜的干燥特性, 为应用 Dincer 模型分析中药干燥传热传质过程及筛选适宜的光皮木瓜干燥技术和工艺提供理论依据。方法 采用气体射流冲击、中短波红外和真空脉动干燥技术干燥厚度为 12 mm 的光皮木瓜切片, 采用气体射流冲击干燥 9、12、15 mm 厚度的光皮木瓜切片, 研究其干燥特性并测定干燥后的色泽、维生素 C (VC)、总黄酮、复水比和微观结构。结果 相同干燥温度下, 3 种干燥技术干燥速率从大到小分别为气体射流冲击、中短波红外及真空脉动干燥技术, 对应干燥活化能 (E_a) 为 43.10、36.95、20.37 kJ/mol; 减小切片厚度有助于提高干燥效率。Weibull 分布函数模拟结果表明, 不同干燥条件下的尺度参数 α 为 47.85~324.51, α 越小干燥时间越短, 气体射流冲击和中短波红外干燥形状参数 β 在 0.859 9~0.980 6, 说明干燥为内部水分扩散控制的降速干燥过程, 而真空脉动干燥条件下 β 介于 1.218 7~1.290 8, 说明干燥受内部水分扩散和表面水分蒸发所共同主导; 估算水分扩散系数 (D_{cal}) 在 $1.66 \times 10^{-8} \sim 1.13 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 随着 α 值的增大而减小。Dincer 模型分析干燥特性表明, 不同干燥条件下滞后因子 (G) 为 1.135 6~1.337 6, 说明干燥初期均有短暂的升速干燥过程; 传热毕渥数 (Bi) 值在 1.171 4~136.041 2, 且随着干燥温度的升高而减小, 水分有效扩散系数 (D_{eff}) 在 $3.26 \times 10^{-9} \sim 6.33 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 相同干燥温度下 $D_{eff} < D_{cal}$; 传质系数 (k) 为 $9.02 \times 10^{-6} \sim 8.82 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 随着干燥温度的升高而增大。气体射流冲击干燥适合于光皮木瓜片的干燥加工, 在实验参数范围内, 干燥温度 60 °C、切片厚度 12 mm 为最优干燥工艺, 干燥时间为 5 h、明亮度 L^* 为 62.80 ± 1.70 、色差值 ΔE 为 19.62 ± 2.60 、VC 和黄酮质量分数分别为 $(1.107 8 \pm 0.005 0) \text{ mg/g}$ 和 $(36.74 \pm 0.60) \text{ mg/g}$ 、复水比为 7.11 ± 0.24 。结论 该研究可为应用 Dincer 模型在中药干燥过程分析传热传质特性及筛选适宜的光皮木瓜干燥条件提供理论依据和技术支持。

关键词: 光皮木瓜; 干燥; 干燥特性; Weibull 分布函数; Dincer 模型; 气体射流冲击干燥; 中短波红外干燥; 真空脉动干燥; 色泽; 维生素 C; 总黄酮; 复水比; 微观结构; 活化能; 内部水分扩散; 表面水分蒸发

中图分类号: R283.3 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2020)15-3911-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2020.15.010

Drying characteristics of *Chaenomeles sinensis* with different drying methods based on Dincer model

JU Hao-yu¹, ZHAO Hai-yan², ZHANG Ju¹, ZHANG Wei-peng³, YU Xian-long⁴, WANG Ji-qiang⁴, GAO Zhen-jiang⁴, XIAO Hong-wei⁴

1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China

2. College of Business Administration, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China

3. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

4. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract: Objective Based on Dincer model, the drying characteristic of *Chaenomeles sinensis* under different drying condition was investigated in order to provide theoretical foundation for applying Dincer model to analyze heat and mass transfer during Chinese herbs drying process and select suitable drying technology and process. **Methods** *C. sinensis* slice of thickness 12 mm was dried by

收稿日期: 2020-05-23

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (C2020207004); 北京市自然科学基金 (6204035); 北京市教委组织部优秀人才项目 (2018000020124G034)

作者简介: 巨浩羽, 博士, 讲师, 研究方向为中药材干燥技术与装备。E-mail: ju56238@163.com

*通信作者 肖红伟, 男, 博士, 博士生导师, 副教授, 研究方向为农产品干燥技术与装备。E-mail: xhwcaugxy@163.com

the three different drying methods, namely air impingement drying, medium and short infrared waved drying and pulsed vacuum drying. Also, 9, 12 and 15 mm *C. sinensis* slices were dried under air impingement drying method. The drying characteristic, color value, rehydration ration, vitamin C (VC), general flavone, and microstructure were studied. **Results** At the same drying temperature, the drying rate sorted in order of size was air impingement drying, medium and short infrared waved drying and pulsed vacuum drying and the drying activation energy was 43.10, 36.95 and 20.37 kJ/mol in corresponding. Decreasing slice thickness enhanced drying rate. The Weibull distribution model simulation result showed that the scale parameter α ranged from 47.85 to 324.51. Smaller α value meant short drying time. The shape parameter β was between 1.218 7 and 1.290 8 under air impingement drying as well as medium and short infrared waved drying method, which showed that drying was falling rate process controlled by internal moisture diffusion. However, the shape parameter β was between 1.218 7 and 1.290 8 under pulsed vacuum drying method, which illustrated that drying was controlled both by internal moisture diffusion and surface moisture evaporation. The calculated moisture diffusion coefficient was ranged from (1.66×10^{-8}) to (1.13×10^{-7}) m²/s and decreased as α increased. The Dincer model simulation result showed that the lag factor (G) was range from 1.135 6 to 1.337 6, which declared that there was a short raising rate drying period during the initial drying process. Heat transfer Biot number (Bi) value was between 1.171 4 and 136.041 2 and decreased as drying temperature increased. Effective moisture diffusion (D_{eff}) value calculated by Dincer model was range from (3.26×10^{-9}) to (6.33×10^{-8}) m²/s. At the same drying temperature, (D_{eff}) value was larger than (D_{eff}^*), but smaller than (D_{cal}). Mass transfer (k) was ranged from (9.02×10^{-6}) to (8.82×10^{-5}) m/s and increased as drying temperature increased. Air impingement drying method was suitable for *C. sinensis* slice drying, and drying temperature of 60 °C and thickness of 12 mm was the most optimum drying process. Under above drying circumstance, the drying time, brightness L^* , color difference value ΔE , VC, general flavone and rehydration ratio were 5 h, 62.80 ± 1.70 , 19.62 ± 2.60 , $(1.107\ 8 \pm 0.005\ 0)$ mg/g, (36.74 ± 0.60) mg/g and 7.11 ± 0.24 , respectively. **Conclusion** Such investigation result can provide theoretical foundation for applying Dincer model to describe heat and mass transfer characteristics during Chinese herbs drying and filtrating suitable *C. sinensis* slice drying method and process.

Key words: *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne; drying; drying characteristic; Weibull distribution model; Dincer model; air impingement drying; medium and short infrared waved drying; pulsed vacuum drying; color value; vitamin C; general flavone; rehydration ration; microstructure; activation energy; internal moisture diffusion; surface moisture evaporation

光皮木瓜 *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne 又名榲桲、木李、海棠、土木瓜, 为蔷薇科木瓜属植物木瓜的干燥成熟果实。光皮木瓜富含维生素 C (VC)、木瓜蛋白酶、有机酸、黄酮类等成分, 具有抗肿瘤、抗癌、免疫调节、美容及治疗咳嗽痰多、痢疾等功效, 是我国重要的药食两用资源^[1-2]。新鲜光皮木瓜采收后, 水分含量很高、呼吸强度大, 极易腐烂变质, 除少部分鲜食外, 大部分则须在短期内通过干燥的方法加工成木瓜干, 作为制药或食品的重要原料。因此, 干燥是光皮木瓜采后的重要加工过程。

目前, 热风干燥方式普遍应用于光皮木瓜片的干燥加工, 此外还有自然晾晒、微波真空干燥和热风微波耦合干燥方法等^[2-5]。光皮木瓜和番木瓜果实形状相似, 干燥特性也较为相似。陈健等^[3-4]研究了番木瓜的热风和微波真空干燥干燥特性, 番木瓜的热风干燥过程只有降速干燥阶段, 无明显的加速和恒速干燥阶段, 且热风温度 80 °C, 风速 1.0 m/s, 切片厚度为 4 mm 时干燥时间为 85 min; 而番木瓜的微波真空干燥过程微波可分为加速、恒速和降速 3 个阶段, 当微波功率 4 kW, 相对压力-80 kPa,

切片厚度为 6 mm 时, 干燥时间最短为 23.5 min。da Silva Júnior 等^[5]研究发现, 超声波预处理光皮木瓜片而后采用真空干燥的方式可缩短干燥时间。自然晾晒成本较低, 但受天气影响较大; 热风干燥效率较低且易导致色泽劣变和有效成分的降解; 微波真空和热风微波耦合干燥方式应用成本较高^[6]。因此, 探讨光皮木瓜的不同干燥技术、选取合适的干燥工艺, 解决干燥时间长、干制品质差的问题势在必行。

光皮木瓜的干燥过程涉及到水分传递、热量传递和产品品质控制等重要环节。理论模型、经验模型及半经验模型被广泛用来描述干燥过程, 主要包括 Newton、Lewis、Page、Modified Page、Two-Terms 等模型。模型参数仅由水分比和干燥时间回归计算得出, 缺乏物理意义, 并不能分析干燥传热传质过程。Weibull 分布函数中尺度参数 α 和形状参数 β 可对干燥过程中传质过程分析, 用于求解估算水分扩散系数及分析干燥过程是否具有升速干燥阶段, 但不能分析传热过程及求解对流传质系数^[7-9]。Dincer 基于冷却过程温度变化曲线和干燥特性曲线的相似性, 提出的 Bi-G 模型(简称 Dincer 模型)^[10-11],

基于模型中的滞后因子 (lag factor, G) 和干燥系数 (drying coefficient, S) 可对干燥过程进行分析, 比如求解水分有效扩散系数、传热毕渥数及传质系数等, 现已用于分析茯苓、山药片、桂圆等物料的干燥过程^[12-14]。

气体射流冲击干燥技术、中短波红外干燥技术及真空脉动干燥技术是新型中药干燥加工技术。3 种干燥技术均具有干燥效率高、干燥产品品质好的优点^[9,15]。但鲜见 3 种干燥技术用于光皮木瓜干燥加工的报道。为筛选出适宜的光皮木瓜干燥技术和工艺, 本研究将气体射流冲击、中短波红外和真空脉动干燥技术应用于光皮木瓜的干燥, 研究 3 种干燥技术及气体射流冲击下不同切片厚度的光皮木瓜干燥特性, 基于 Dincer 模型分析干燥过程中的传热传质特性, 并与 Weibull 分布函数进行比较。测定干燥后色泽、复水比、VC 含量、总黄酮含量, 观察干燥对微观结构的影响, 为选择合适的光皮木瓜干燥工艺提供理论依据和技术支持。

1 仪器与材料

DHG-9140A 型电加热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科技有限公司, 功率为 1.6 kW; 中短波红外干燥箱, 江苏泰州圣泰科红外科技有限公司, 红外加热管功率范围 0~2 kW; 气体射流干燥机、真空脉动干燥机, 中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室, 功率分别为 2.2、4.45 kW; YP 型电子秤, 上海精密科学仪器有限公司, 精度 0.1 g; 70A 型切片机, 永康市雨诺清洗设备有限公司。

光皮木瓜采购于北京当地农贸市场, 经中国农业大学肖红伟副教授鉴定为蔷薇科木瓜属植物光皮木瓜 *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne 的果实, 选择大小均匀、无机械伤、无病虫害的样品。经 105 °C 恒温干燥法测定原料的初始湿基含水率为 89.2%。实验前将光皮木瓜放置于 (4±1) °C, 相对湿度为 90% 的冰箱中冷藏保存。

2 方法

2.1 光皮木瓜干燥参数计算

(1) 水分比 (moisture ratio, MR): 不同时间 MR 的计算可简化为公式 (1) 计算^[16]。

$$MR = M_t / M_0 \quad (1)$$

M_t 为 t 时刻的干基含水率, M_0 为初始干基含水率

其中干基含水率按公式 (2) 计算^[16]。

$$M_t = (W_t - G) / G \quad (2)$$

W_t 为干燥任意时刻的总质量, G 为绝干物质质量

(2) 干燥速率 (drying rate, DR): DR 按照公式 (3) 计算^[16]。

$$DR = (M_{t_1} - M_{t_2}) / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

t_1 和 t_2 为干燥时间, DR 为干燥时间为 t_1 和时间 t_2 之间的干燥速率, M_{t_1} 和 M_{t_2} 为干燥时间为 t_1 和 t_2 时刻的干基含水率

2.2 基于 Weibull 分布函数拟合干燥特性曲线

Weibull 分布函数如公式 (4) 所示^[17]。

$$MR = e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (4)$$

α 为尺度参数, 表示干燥过程中的速率常数, 约等于干燥过程中物料脱去 63% 水分所需要的时间; β 为形状参数, 其值与干燥过程开始时的干燥速率有关

估算水分扩散系数 (D_{cal}) 和有效水分扩散系数 (D_{eff}^*) 的估算公式如下^[16]。

$$D_{cal} = r^2 / \alpha \quad (5)$$

D_{cal} 为干燥过程中估算的水分扩散系数; r 表示物料的当量体积半径, 此处值为 0.018 mm

$$D_{eff}^* = D_{cal} / R_g \quad (6)$$

D_{eff}^* 为由费克第二定律计算得出的有效水分扩散系数, R_g 为与尺寸相关的常数

2.3 基于 Dincer 模型拟合干燥特性曲线

Dincer 模型如公式 (7) 所示^[10]。

$$MR = G \cdot \exp(-St) \quad (7)$$

G 为滞后因子 (lag factor), 无量纲常数, 表征干燥传热传质过程中受到的内部阻力的大小; S 为干燥系数 (drying coefficient), 表示单位时间内物料的干燥能力, S 越大, 物料干燥速度越快

毕渥数 (Bi) 和水分有效扩散系数 (D_{eff}) 的计算分别如公式 (8) 和 (9) 所示。

$$Bi = 0.0576 G^{26.7} \quad (8)$$

$$D_{eff} = S \cdot L^2 / \mu_1^2 \quad (9)$$

L 为物料厚度, 此处取 0.012 mm; μ_1 为特征式 (10) 的特征根, 由于光皮木瓜规则排列于料盘中, 可简化为平板问题, 此处特征根 μ_1 由式 (11) 确定^[18]

$$\mu_1 = -419.24 G^4 + 2103.8 G^3 - 3615.8 G^2 + 2880.3 G - 858.94 \quad (10)$$

结合公式 (8) 和 (9), 得出对流传质系数 (k)。

$$k = 2D_{eff}Bi/L \quad (11)$$

2.4 光皮木瓜的干燥活化能 (E_a)

光皮木瓜在不同干燥方式下的干燥活化能由阿伦尼乌斯公式确定^[19]。

$$D_{eff} = D_0 \cdot \exp\{-E_a/[R(T+273.15)]\} \quad (12)$$

D_0 为物料水分的扩散基数, 为定值; E_a 为物料的干燥活化能, kJ/mol; R 为气体摩尔常数, 8.314 J/(mol·K)

2.5 色泽的测定

色泽采用 SMY-2000SF 型色差计（北京盛名扬科技开发有限公司）测定干燥后光皮木瓜片绿红值 a^* 、蓝黄值 b^* 、明亮度 L^* 和色差值 (ΔE)，其中， ΔE 的计算公式见 (13) [20]。

$$\Delta E = [(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2]^{1/2} \quad (13)$$

L^* 、 a^* 、 b^* 为干燥后光皮木瓜的色泽值， L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为干燥前新鲜光皮木瓜的色泽值

2.6 复水比 (rehydration ratio, RR) 的测定

将称好的一定质量的样品放入 40 °C 恒温蒸馏水中，30 min 后，取出沥干 20 min，并用吸水纸拭干表面水分，称取复水后的质量 [21]。

$$RR = m_2 / m_1 \quad (14)$$

m_2 为复水后质量， m_1 为复水前质量

2.7 VC 和总黄酮含量测定 [22]

2.7.1 VC (还原型抗坏血酸) 的测定 采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定 VC。

2.7.2 总黄酮含量测定

(1) 样品溶液制备：将干燥后的光皮木瓜粉碎后过 40 目筛，准确称取 2 g 于 100 mL 锥形瓶中，加入 40 mL 70% 乙醇溶液，进行超声提取 30 min，提取结束后，抽滤去除滤渣，将滤液转入 100 mL 量瓶中定容。

(2) 标准曲线绘制：准确称取 20.000 mg 芦丁 (质量分数高于 95%) 对照品，以 60% 乙醇超声溶解并定容至 100 mL，制备芦丁标准液。分别吸取芦丁标准液 0、1、2、3、4、5 mL 于 10 mL 量瓶中，加 0.3 mL 5% 的 NaNO_2 溶液还原 6 min；加 0.3 mL 10% 的 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液络合 6 min；加入 4 mL 质量分数为 4% (1 mol/L) 的 NaOH 溶液；最后用 60% 乙醇溶液定容至 10 mL，摇匀使之显色 20 min；在 506 nm 下测定吸光度 (A) 值，以 A 值为纵坐标 (Y)，质量浓度为横坐标 (X) 绘制标准曲线，得回归方程为 $Y = 6.4429X + 0.0469$ ，线性相关系数 $r^2 = 0.9995$ 。

(3) 样品测定：精确量取样品溶液 1 mL 于 10 mL 量瓶中，测定总黄酮含量。

2.8 光皮木瓜的干燥

实验前选取无机械损伤、无腐烂的光皮木瓜，清水洗净后，去皮去籽，使用切片机将物料横切为扇形片状。将其单层平铺于不锈钢料盘上。考察 50、60、70 °C 下真空脉动、气体射流冲击和中短波红外干燥技术对光皮木瓜干燥特性的影响。预试验结果

表明，不同干燥方式下，切片厚度对光皮木瓜干燥特性影响结论相一致，以气体射流冲击干燥条件下，切片厚度为 9、12、15 mm 光皮木瓜的干燥特性为例研究。干燥条件见表 1。其中真空脉动干燥过程中，脉动比 (真空时间：常压时间) 为 10：4，每当真空时间结束时测定物料质量；气体射流冲击和中短波红外干燥，干燥风速为 15 m/s，每间隔 30 min 称量物料质量。干燥实验均干燥至湿基含水率 10% 时停止。

表 1 试验设计与试验参数

Table 1 Design for experiments with run conditions included

干燥方式	干燥温度/°C	切片厚度/mm	初始质量/g
气体射流冲击干燥	50	12	117.73 ± 0.18
	60		117.51 ± 0.61
	70		117.08 ± 0.04
	60	9	117.05 ± 0.13
	60	15	117.94 ± 0.12
中短波红外干燥	50	12	116.68 ± 0.11
	60		114.28 ± 0.21
	70		115.52 ± 0.59
真空脉动干燥	50	12	104.79 ± 0.29
	60		99.58 ± 1.61
	70		100.31 ± 1.92

3 结果与分析

3.1 不同干燥方式对光皮木瓜干燥特性的影响

不同干燥方式、不同干燥温度下光皮木瓜的干燥特性曲线如图 1 所示，不同干燥方式下，温度对于干燥时间均有显著性影响，提高干燥温度均有利于缩短干燥时间。当干燥温度均为 60 °C 时，气体射流冲击、中短波红外和真空脉动的干燥时间分别为 5、7、12 h。气体射流冲击干燥相对于中短波红外、真空脉动干燥方式，干燥时间分别缩短了 28.6% 和 58.3%。采用气体射流冲击干燥方式可大幅度提高干燥效率。

3.2 不同干燥方式对干燥速率的影响

不同干燥方式及不同温度下的光皮木瓜的干燥速率曲线见图 2。

不同干燥方式下，干燥速率随干基含水率的降低而降低。气体射流冲击干燥和中短波红外干燥条件下，光皮木瓜的干燥过程均为降速干燥。因此，光皮木瓜的气体射流冲击和中短波红外干燥为内部

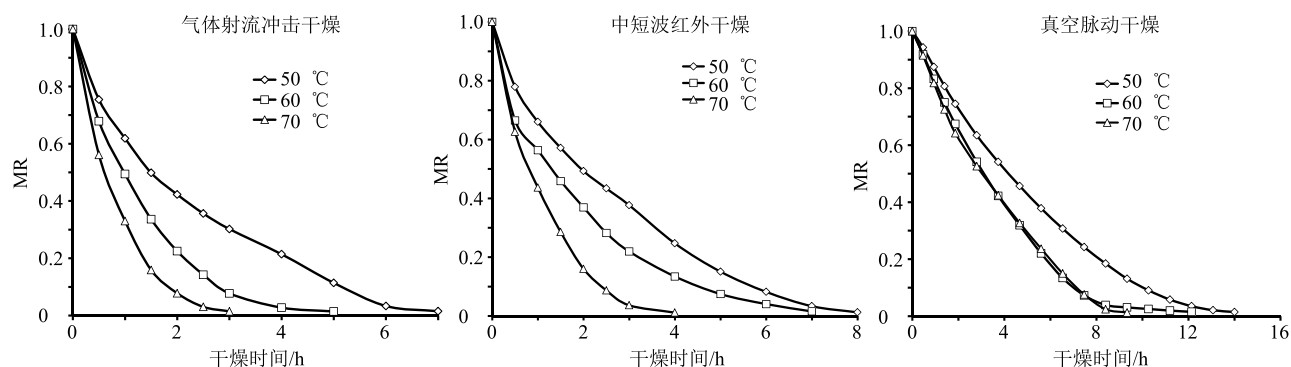


图 1 不同干燥方式下光皮木瓜的干燥特性曲线

Fig. 1 Drying curves of *C. sinensis* by different drying methods

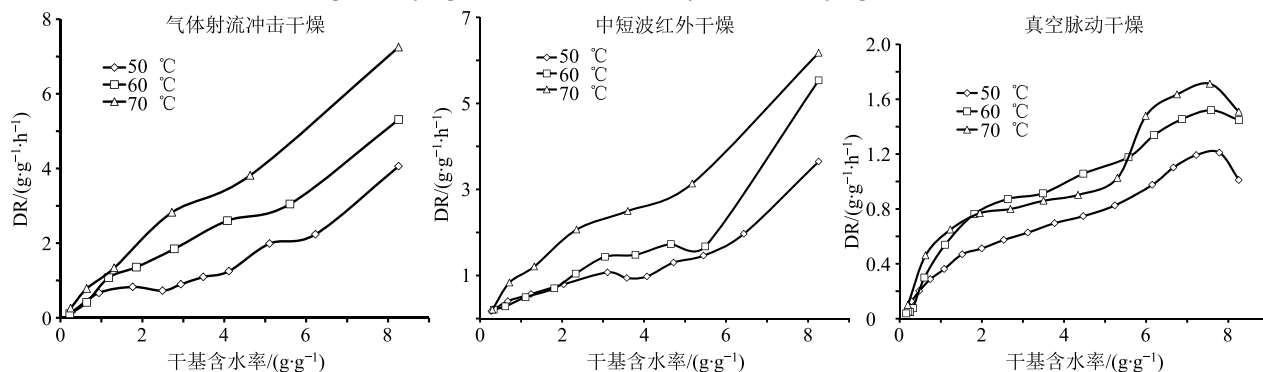


图 2 不同干燥方式下光皮木瓜的干燥速率曲线

Fig. 2 Drying rate curves of *C. sinensis* by different drying method

水分扩散迁移所控制的干燥过程^[23]。气体射流冲击干燥方式，对流传热系数较大，能够将物料迅速升温，物料具有较高温度后促使内部物料的迁移扩散。中短波红外干燥过程和气体射流冲击干燥过程相类似，而干燥速率慢于气体射流冲击干燥，原因可能是因为物料厚度较大，与中短波的穿透深度不匹配，物料升温速率较慢。光皮木瓜的真空脉动干燥过程，干燥速率先上升后下降，干燥过程由表面水分蒸发和内部水分扩散迁移所共同控制^[24]。真空状态下，光皮木瓜内部水分降低，当升高到某一温度后，会发生剧烈的汽化，干燥速率加快。因此，气体射流冲击干燥技术更适合于光皮木瓜片的干燥。

3.3 不同切片厚度对干燥特性和干燥速率的影响

不同干燥方式下，切片厚度对光皮木瓜干燥特性影响趋势相一致。以气体射流冲击干燥条件下，不同厚度光皮木瓜干燥特性为例说明。当干燥温度为 60 °C，切片厚度分别为 9、12、15 mm 时，光皮木瓜的干燥特性和干燥速率曲线分别见图 3-a 和图 3-b。切片厚度为 9、12、15 mm 时，干燥时间分别为 3.0、5.0、7.0 h。减小切片厚度可显著缩短干燥时间和提高干燥速率。这是因为切片厚度增大后

内部水分迁移扩散所需要克服的阻力越大，干燥速率越低，干燥时间延长。

3.4 干燥特性曲线模型对比分析

3.4.1 基于 Weibull 分布函数对干燥特性曲线的分析 基于 Weibull 分布函数模拟不同干燥条件下的光皮木瓜的干燥特性曲线，并求解 D_{cal} 、 D_{eff} ，结果见表 2。由决定系数 (r^2) 可知，Weibull 分布函数可很好地描述光皮木瓜在不同干燥方式下的干燥过程。尺度参数 α 表示干燥过程中脱去 63% 水分所需要的时间，不同干燥条件下的 α 介于 47.85~324.51 变化， α 越小反映该干燥方式所消耗的干燥时间越短，气体射流冲击 70 °C 时， α 最小为 47.85，对应该干燥条件下干燥时间最短。气体射流冲击和中短波红外干燥方式下的 β 在 0.859 9~0.980 6 变化，且都小于 1。 $\beta < 1$ 说明干燥过程为内部水分扩散控制的降速干燥过程。而真空脉动干燥条件下的 β 介于 1.218 7~1.290 8，说明干燥过程受内部水分扩散和表面水分蒸发所共同主导，表现为先升速后降速的干燥趋势^[25]。此结论与测定的干燥速率曲线变化规律相吻合。 β 值范围和干燥过程之间的关系与张卫鹏等^[9]和 Bantle 等^[26]的研究结论相一致。因此，

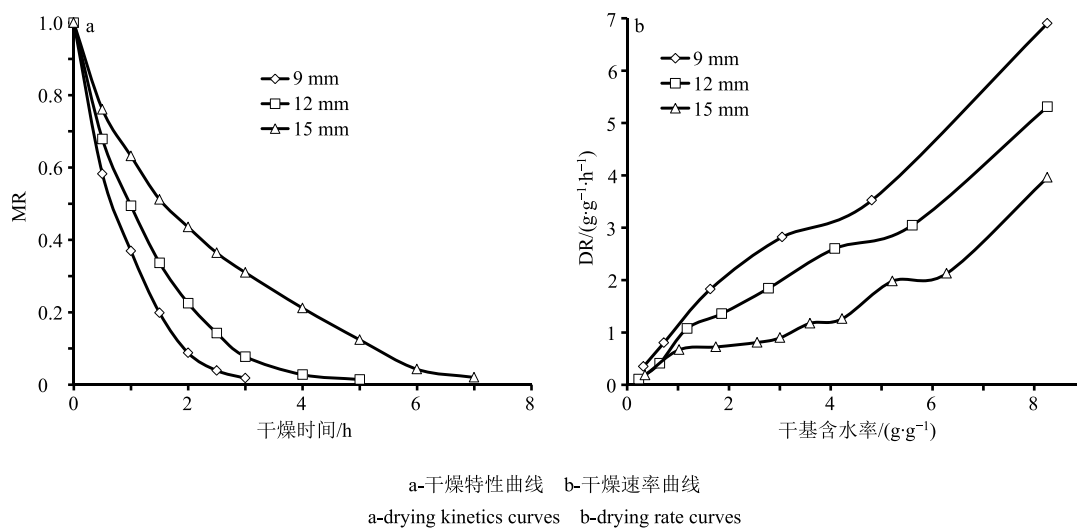


图 3 不同切片厚度下光皮木瓜的气体射流冲击干燥特性

Fig. 3 Drying curves and drying rate curves of *C. sinensis* at different thickness under air impingement drying method

基于 Weibull 分布函数中的 α 和 β 值可分析光皮木瓜干燥过程中的干燥时间的长短及干燥速率的变化规律。

Weibull 分布函数可估算干燥过程中的水分扩散系数 D_{cal} , D_{cal} 在 $1.66 \times 10^{-8} \sim 1.13 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 随着 α 值的增大而减小。基于 Fick 第二定律计算出的不同干燥条件下有效水分扩散系数 D_{eff} 在 $2.63 \times 10^{-9} \sim 1.30 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 同样随着干燥时间的增大而减小。相同干燥条件下 D_{cal} 大于 D_{eff} , 这可能是因为, 基于 Fick 第二定律计算 D_{eff} 时认为干燥过程为降速干燥过程, 且干燥过程中物料无收缩, 忽略了干燥初期短暂的升速干燥段及后期物料收缩而引起的扩散路径的减小。因此 D_{eff} 的值被低估, 而基于

Weibull 分布函数中 α 值计算水分扩散系数, 不用考虑干燥为内部水分迁移控制或表面水分蒸发控制。 R_g 为 5.96~9.67, 与 D_{cal} 无关, 其大小和干燥后产品的形状相关^[11]。

3.4.2 基于 Dincer 模型对干燥特性曲线的分析 基于 Dincer 模型分析光皮木瓜在不同干燥条件下的干燥特性, 结果见表 3, 由 r^2 可知, Dincer 模型能够很好地描述光皮木瓜在不同干燥方式下的干燥过程。不同干燥方式下的 G 介于 1.135 6~1.337 6, 均大于 1, 说明干燥初期均有短暂的升速干燥过程, 并且 G 越大, 升速干燥阶段时间越长, 这与基于 Weibull 分布函数中 β 参数分析得出的结论不同^[10,14]。这可能是因为, 在气体射流冲击和中短波干燥方式下, 升

表 2 基于 Weibull 分布函数模拟光皮木瓜干燥特性

Table 2 Drying characteristic of *C. sinensis* simulation result based on Weibull distribution model

干燥方式	干燥条件	α/min	β	$D_{\text{eff}}^*/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{\text{cal}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	R_g	r^2
气体射流冲击干燥	50 °C; 12 mm	136.28	0.931 6	5.09×10^{-9}	3.96×10^{-8}	7.78	0.991 7
	60 °C; 12 mm	79.06	0.980 6	8.05×10^{-9}	6.83×10^{-8}	8.48	0.980 5
	70 °C; 12 mm	47.85	0.955 8	1.30×10^{-8}	1.13×10^{-7}	8.69	0.996 2
	60 °C; 9 mm	52.57	0.967 7	1.18×10^{-8}	1.03×10^{-7}	8.73	0.993 6
	60 °C; 15 mm	140.42	0.943 6	4.76×10^{-9}	3.85×10^{-8}	8.07	0.993 1
中短波红外干燥	50 °C	162.70	0.992 0	4.60×10^{-9}	3.32×10^{-8}	7.21	0.989 0
	60 °C	110.36	0.859 9	6.01×10^{-9}	4.89×10^{-8}	8.14	0.992 9
	70 °C	64.84	0.960 3	1.03×10^{-8}	8.33×10^{-8}	8.10	0.992 2
真空脉动干燥	50 °C	324.51	1.245 9	2.50×10^{-9}	1.66×10^{-8}	6.66	0.996 4
	60 °C	236.72	1.290 8	3.45×10^{-9}	2.28×10^{-8}	6.61	0.996 9
	70 °C	233.49	1.218 7	3.88×10^{-9}	2.31×10^{-8}	5.96	0.992 1

表 3 基于 Dincer 模型模拟光皮木瓜干燥特性曲线
Table 3 Drying characteristic of *C. sinensis* simulation result based on Dincer model

干燥方式	干燥条件	G	S/s^{-1}	r^2	Bi	$D_{eff}/(m^2 \cdot s^{-1})$	$k/(m \cdot s^{-1})$	μ_1
气体射流冲击干燥	50 °C; 12 mm	1.149 8	1.55×10^{-4}	0.947 3	2.392 3	1.26×10^{-8}	9.02×10^{-6}	1.330 0
	60 °C; 12 mm	1.137 8	2.45×10^{-4}	0.993 3	1.809 9	3.87×10^{-8}	1.17×10^{-5}	0.955 0
	70 °C; 12 mm	1.135 6	3.95×10^{-4}	0.992 5	1.717 4	6.33×10^{-8}	1.81×10^{-5}	1.095 4
	60 °C; 9 mm	1.137 0	3.58×10^{-4}	0.986 2	1.774 9	5.68×10^{-8}	1.68×10^{-5}	0.952 4
	60 °C; 15 mm	1.152 7	1.45×10^{-4}	0.959 1	2.557 6	2.08×10^{-8}	8.85×10^{-6}	1.002 9
中短波红外干燥	50 °C	1.292 5	1.40×10^{-4}	0.950 6	54.380 2	7.52×10^{-9}	6.81×10^{-5}	1.637 8
	60 °C	1.248 5	1.54×10^{-4}	0.986 9	21.597 0	1.33×10^{-8}	4.79×10^{-5}	0.599 6
	70 °C	1.243 4	3.13×10^{-4}	0.985 1	19.336 4	2.36×10^{-8}	7.61×10^{-5}	1.381 6
真空脉动干燥	50 °C	1.337 6	0.80×10^{-4}	0.951 4	136.041 2	3.26×10^{-9}	7.40×10^{-5}	1.750 2
	60 °C	1.322 2	1.04×10^{-4}	0.980 7	99.697 7	4.80×10^{-9}	7.97×10^{-5}	1.751 0
	70 °C	1.312 9	1.18×10^{-4}	0.910 4	82.671 0	6.40×10^{-9}	8.82×10^{-5}	0.966 5

速干燥时间很短, 由于称重采样时间滞后, 未能体现出升速干燥, 故主要呈现为降速干燥。真空脉动干燥方式下 G 大于另 2 种干燥方式。干燥系数 (S) 表明单位时间内物料的脱水能力, 干燥速率越大, S 值越大。当气体射流冲击干燥温度为 70 °C 时, G 最小为 1.135 6, S 最大为 $3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ 。

传热毕渥数 Bi 表明干燥过程中物料内部导热热阻和外界对流传热或导热热阻之比。当 $0.1 < Bi < 100$ 表示物料温度的变化, 即受物料内部导热热阻和外界传热热阻共同影响, 在干燥过程中最为常见; $Bi > 100$ 表明物料内部温度变化完全取决于内部导热热阻; $0 < Bi < 0.1$ 表明各点温度在任一时刻都趋于均匀一致, 变化快慢取决于外界传热热阻^[11,14]。气体射流冲击和中短波红外干燥方式下, Bi 值在 1.171 4~54.380 2, 且随着干燥温度的升高而减小。 Bi 值越小, 说明物料内部热阻相对于外界对流传热热阻越小, 物料温度更易受外界对流传热的影响, 物料升温速率越快。

基于 Dincer 模型求解得出 D_{eff} 在 $3.26 \times 10^{-9} \sim 6.33 \times 10^{-8} m^2/s$, 当气体射流冲击干燥温度为 70 °C 时, D_{eff} 最大为 $6.33 \times 10^{-8} m^2/s$ 。 D_{eff} 变化规律同 D_{eff}^* 和 D_{cal} 一致, 且相同干燥条件下 $D_{eff}^* < D_{eff} < D_{cal}$, 这可能是因为 D_{eff} 计算过程综合衡量了物料内部导热阻、外界传热热阻和传质系数的影响。Rahman 等^[27]在大蒜片对流干燥试验中, 基于 Fick 第二定律得出 D_{eff}^* 为 $1.10 \times 10^{-9} \sim 1.70 \times 10^{-9} m^2/s$, 小于采用 Dincer 模型得出 D_{eff} 为 $2.07 \times 10^{-9} \sim 1.09 \times 10^{-8}$ 的计算结果。此外, 张卫鹏等^[24]在中短波干燥茯苓时也

得出相同的结论。因此, Dincer 模型包含了干燥过程传热和传质特性, 可为求解干燥过程中 D_{eff} 提供参考。

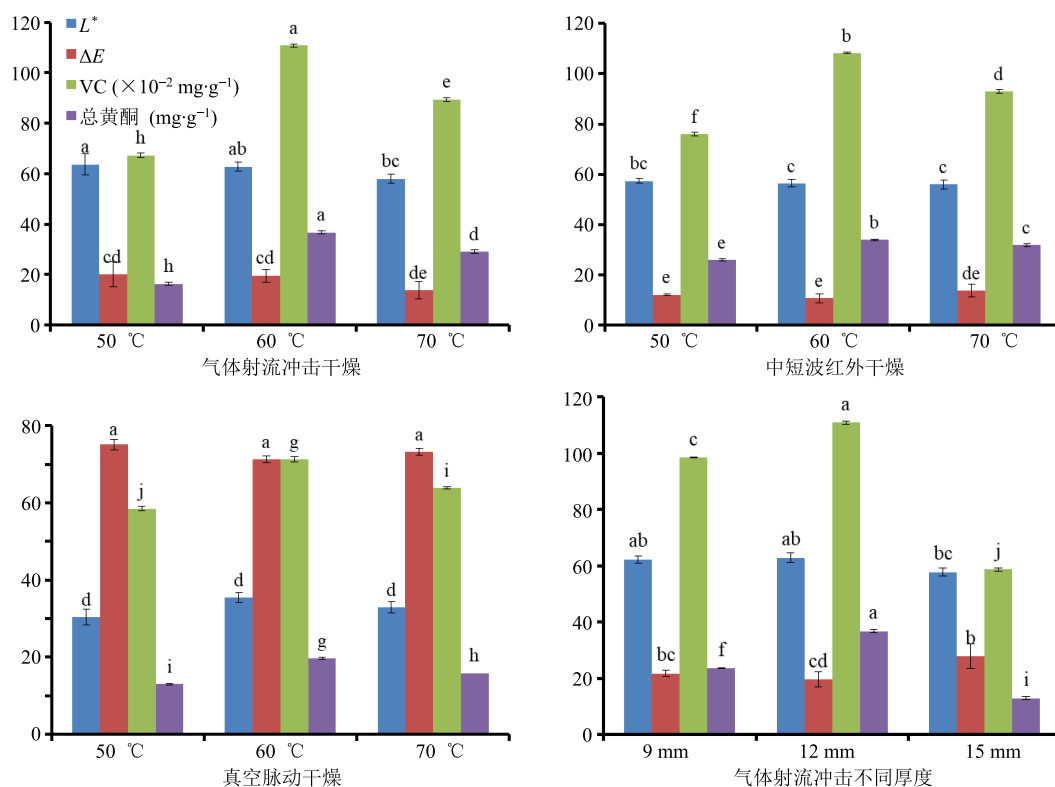
光皮木瓜在不同干燥方式下传质系数在 $9.02 \times 10^{-6} \sim 8.82 \times 10^{-5} m/s$, 且相同干燥方式下随着干燥温度的升高而增大。Dincer 模型提供了传质系数的计算方法, 为进一步使用数值分析方法模拟光皮木瓜在干燥过程中的温度和水分布提供参考^[28]。

3.5 E_a 对比分析

气体射流冲击、中短波红外和真空脉动干燥条件下光皮木瓜的 E_a 分别为 43.10、36.95、20.37 kJ/mol。 E_a 表示干燥脱除 1 mol 水分所需要的启动能量, 用于评价干燥进行的难易程度、估算干燥过程的能耗^[29]。干燥活化能是物料本身的固有属性, 与成分和组织方式有关, 不同干燥方式下干燥活化能不同可能由不同干燥方式对光皮木瓜结构的影响不同所致。光皮木瓜含有较多的多糖成分, 气体射流冲击干燥方式干燥速率较快, 可能使得多糖成分从细胞中溢出或使物料表面结壳, 从而对水分有较强的吸附作用, 干燥活化能增大。

3.6 色泽、VC 和总黄酮含量对比

色泽是评判干燥后光皮木瓜品质的重要外观依据, 且色泽优劣与干燥后 VC、总黄酮等含量有关。干燥后光皮木瓜明亮度 L^* 越大和色差值 ΔE 越小为佳^[2]。由图 4 可知, 气体射流冲击干燥条件下光皮木瓜的 L^* 随着干燥温度的升高而逐渐降低, 这可能与较高的干燥相率相关, 并且 L^* 值显著大于真空脉动干燥条件下的 L^* 值。真空脉动干燥条件下由于干



不同字母 a~j 表示不同干燥条件下差异性显著 (显著性 $P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著

Different letters a~j indicate significant difference ($P < 0.05$) of difference drying methods

图 4 不同干燥方式下光皮木瓜的色泽、VC 和总黄酮含量

Fig. 4 Color value, VC and general flavone content of *C. sinensis* by different drying methods

干燥时间长、光皮木瓜中的营养成分在高温下不断降解, VC 发生非酶促褐变, 使得 L^* 值降低。气体射流冲击干燥条件下, 色差值 ΔE 随着干燥温度的上升而减小, 当干燥温度为 70 °C 时, ΔE 为 13.82 ± 3.38 , 与中短波红外干燥方式没有显著性区别, 但显著性小于真空脉动干燥方式。

VC 和总黄酮含量随干燥温度和切片厚度的增大而先升高后降低, 见图 4。较长的干燥时间和较高的干燥温度均不利于 VC 和总黄酮等有效活性物质的保留。真空脉动干燥条件下, 光皮木瓜片的明亮度小、色差值大, 此时所对应的 VC 和总黄酮含量也较低。气体射流冲击干燥温度为 60 °C、切片厚度为 12 mm 时, 干燥后 VC 和总黄酮的包流量最高, 为 $(1.1078 \pm 0.0050) \text{ mg/g}$ 和 $(36.74 \pm 0.60) \text{ mg/g}$ 。气体射流冲击干燥技术能提高光皮木瓜片的干燥效率和干燥品质。

3.7 RR 和微观结构对比分析

不同干燥方式下, 干燥后光皮木瓜的复水性如图 5 所示, RR 主要受到物料细胞结构的破坏程度和复水前含水率的影响。相同干燥方式下, 复水比

随着干燥温度的升高而降低。这可能是因为干燥温度过高使得物料表面发生结壳硬化, 物料内部水分扩散通道发生收缩塌陷^[30]。气体射流冲击干燥条件下, RR 随切片厚度先上升后下降。干燥温度为 50 °C 或 60 °C 时, RR 从大到小依次为气体射流冲击干燥、真空脉动干燥、中短波红外干燥, 且有显著性区别。干燥温度为 70 °C 时, 气体射流冲击干燥 RR 最大, 但与另 2 种干燥方式无显著区别。气体射流冲击干燥温度为 50 °C, RR 最高为 8.45 ± 0.04 。

将干燥后的光皮木瓜中央部位的表皮部分切分成 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的立方体小样品, 采用扫描电镜观测其微观组织结构状态。其中选取了 50 °C 气体射流冲击干燥 (图 6-a)、70 °C 中短波红外干燥 (图 6-b) 以及 70 °C 真空脉动干燥 (图 6-c) 后的微观结构作为代表性实验结果。由图 6 可知, 50 °C 气体射流冲击干燥条件下, 光皮木瓜内部仍然保留了较多的水分迁移孔道, 故干燥后 RR 较大。而 70 °C 的中短波红外或真空脉动干燥方式下, 物料中央部分的水分扩散通道发生收缩或者结壳堵

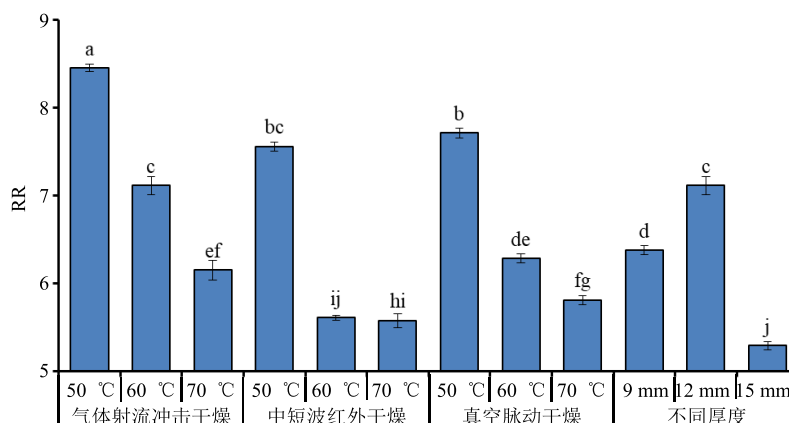
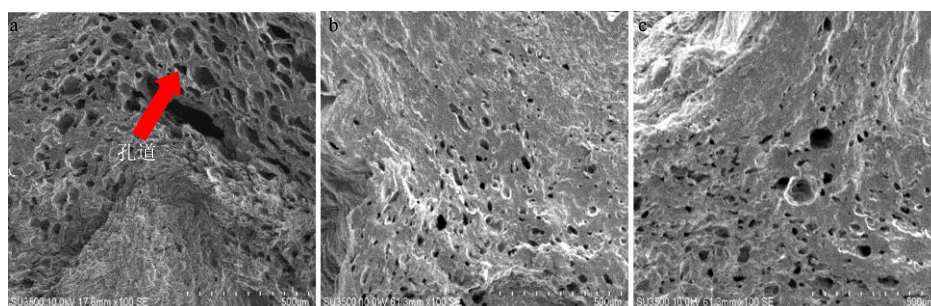


图 5 不同干燥方式下光皮木瓜的 RR

Fig. 5 Rehydration ratio of *C. sinensis* by different drying methods



a-50 °C 气体射流冲击干燥 b-70 °C 中短波红外干燥 c-70 °C 真空脉动干燥

a-50 °C air impingement drying b-70 °C medium and short infrared waved drying c-70 °C pulsed vacuum drying

图 6 不同干燥方式下光皮木瓜的微观组织结构

Fig. 6 Microstructure of *C. sinensis* by different drying methods

塞,故 RR 较低。综合考虑干燥速率和复水比,60 °C 气体射流冲击干燥适合光皮木瓜的干燥。

4 讨论

本研究考察了基于 Dincer 模型气体射流冲击、中短波红外干燥和真空脉动干燥条件下的干燥特性,并于 Weibull 分布函数进行比较。测定色泽、RR 和微观结构。结果表明,Dincer 模型能够很好的描述光皮木瓜在不同干燥方式下的干燥特性;60 °C 气体射流冲击干燥条件下,既能够提高干燥效率,又具有较好的干燥品质:干燥时间为 5 h、 L^* 为 62.80 ± 1.70 、 ΔE 为 19.62 ± 2.60 、VC 和黄酮含量分别为 (1.1078 ± 0.0050) mg/g 和 (36.74 ± 0.60) mg/g,RR 为 7.11 ± 0.24 。

Weibull 分布函数模拟干燥特性表明,不同干燥条件下的 α 为 47.85~324.51 变化, α 越小反映该干燥方式所消耗的干燥时间越短,气体射流冲击 70 °C 时, α 最小为 47.85。气体射流冲击和中短波红外干燥方式下的 β 在 0.8599~0.9806 变化,且都小于 1,说明干燥过程为内部水分扩散控制的降速干燥过

程;而真空脉动干燥条件下的 β 介于 1.2187~1.2908,说明干燥过程受内部水分扩散和表面水分蒸发所共同主导,表现为先升速后降速的干燥趋势。 D_{cal} 在 $1.66 \times 10^{-8} \sim 1.13 \times 10^{-7}$ m²/s,随着 α 值的增大而减小。Weibull 分布函数虽然已经大量用于描述中草药、农产品、食品的干燥过程,但 Weibull 分布函数不能求解传热毕渥数 Bi 和传质系数 k ,在分析干燥过程中的传热传质现象仍存在一定局限性。

Dincer 模型分析干燥特性表明,不同干燥方式下的滞后因子 G 介于 1.1356~1.3376,均大于 1,说明干燥初期均有短暂的升速干燥过程,干燥系数 S 表明单位时间内物料的脱水能力,干燥速率越大, S 值越大。当气体射流冲击干燥温度为 70 °C 时, G 最小为 1.1356, S 最大为 3.95×10^{-4} s⁻¹。气体射流冲击和中短波红外干燥方式下, Bi 值在 1.1714~54.3802,且随着干燥温度的升高而减小。 Bi 值越小,物料温度更易受外界对流传热的影响,物料升温速率越快。基于 Dincer 模型求解得出 D_{eff} 在 $3.26 \times 10^{-9} \sim 6.33 \times 10^{-8}$ m²/s,当气体射流冲击干燥温度为

70 °C时, D_{eff} 最大为 $6.33 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。 D_{eff} 变化规律同 D_{eff}^* 和 D_{cal} 一致, 且相同干燥条件下 $D_{\text{eff}}^* < D_{\text{eff}} < D_{\text{cal}}$ 。 光皮木瓜在不同干燥方式下传质系数在 $9.02 \times 10^{-6} \sim 8.82 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 且相同干燥方式下随着干燥温度的升高而增大。

本实验基于 Dincer 模型研究了气体射流冲击、中短波红外和真空脉动干燥特性, 并于 Weibull 分布函数进行比较。测定干燥后产品的色泽、RR 和微观结构。结果表明基于 Dincer 模型求解的 D_{eff} 小于基于 Weibull 分布函数计算出的 D_{cal} , 且同样适用于非降速干燥过程, 此外 Dincer 模型优于 Weibull 分布函数之处在于其还可求解传热毕渥数 Bi、传质系数 k 。3 种干燥技术相对于现有的热风干燥技术均具有较高的对流传热系数, 可提高干燥速率, 减少有效成分的降解。气体射流冲击干燥方式相对于中短波干燥和真空脉动干燥方式, 能够提高光皮木瓜片干燥效率和干燥品质, 且运行成本低, 在生产实际中可完成连续大批量的光皮木瓜片的干燥加工, 具有广泛的应用前景。

综上, 在实验参数范围内, 气体射流冲击干燥 60 °C、光皮木瓜切片厚度 12 mm 为最优干燥条件; 该研究结论为应用 Dincer 模型在中草药干燥过程分析传热传质特性及筛选适宜的光皮木瓜干燥条件提供理论依据和技术支持。

参考文献

- [1] 陈衍男, 赵恒强, 卢 丙, 等. 基于低场核磁共振技术的不同干燥过程中光皮木瓜水分迁移规律研究 [J]. 中草药, 2018, 49(7): 4022-4028.
- [2] 易 丽, 杨 薇, 王 晨. 番木瓜片热风微波耦合干燥条件及干燥模型建立 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 221-227.
- [3] 陈健凯, 王绍青, 林河通, 等. 番木瓜片的热风干燥特性与动力学模型 [J]. 热带作物学报, 2017, 38(12): 2366-2375.
- [4] 陈健凯, 王绍青, 林河通, 等. 番木瓜片的微波真空干燥特性与动力学模型 [J]. 热带作物学报, 2017, 38(8): 157-165.
- [5] da Silva Junior E V, de Melo L L, de Medeiros R A B, et al. Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 97: 317-322.
- [6] 孟建升, 蒋俊春, 郑志安, 等. 3 种干燥方式对山药片干燥动力学和品质的影响 [J]. 中草药, 2019, 50(11): 2575-2582.
- [7] 李武强, 万芳新, 罗 燕, 等. 当归切片远红外干燥特性及动力学研究 [J]. 中草药, 2019, 50(18): 4320-4328.
- [8] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 基于 Weibull 分布函数的枸杞真空脉动干燥过程模拟及动力学研究 [J]. 中草药, 2018, 49(22): 5313-5319.
- [9] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317-324.
- [10] Dincer I, Hussain M M. Development of a new Biot number and lag factor correlation for drying applications [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2004, 47(4): 653-638.
- [11] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 269-276.
- [12] Dincer I, Hussain M M. Development of a new Bi-Di correlation for solids drying [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2002, 45(15): 3065-3069.
- [13] Ju H Y, Zhao S H, Mujumdar A S, et al. Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models [J]. *Food Bioprod Process*, 2018, 111: 20-29.
- [14] Ju H Y, El-Mashad H M, Fang X M, et al. Drying characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions [J]. *Dry Technol*, 2016, 34(3): 296-306.
- [15] 钱婧雅, 张 茜, 王 军, 等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 259-265.
- [16] 巨浩羽, 肖红伟, 郑 霞, 等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2015(16): 304-312.
- [17] Prestes F S, Pereira A A M, Silva A C M, et al. Effects of peanut drying and blanching on *Salmonella* spp [J]. *Food Res Int*, 2019, 119: 411-416.
- [18] Mrki V, Ukrainczyk M, Tripalo B. Applicability of moisture transfer Bi-Di correlation for convective drying of broccoli [J]. *J Food Eng*, 2006, 79(2): 640-646.
- [19] 林 冰, 孙 悦, 廖 力, 等. 4 种藤类中药材干燥模型、动力学及有效成分稳定性研究 [J]. 中草药, 2018, 49(13): 3001-3008.
- [20] Seerangurayar T, Al-Ismaili A M, Jeewantha L H J, et al. Effect of solar drying methods on color kinetics and texture of dates [J]. *Food Bioprod Process*, 2019, 116: 227-239.
- [21] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 干燥介质相对湿度对西洋参根干燥特性和品质的影响 [J]. 中草药, 2020, 51(3): 631-638.
- [22] 雷 苗, 蔡 杰, 何静仁. 不同干燥方法对光皮木瓜全粉品质的影响 [J]. 武汉轻工大学学报, 2018, 37(1):

- 6-10.
- [23] Cuevas M, Martínez-Cartas M L, Pérez-Villarejo L, *et al.* Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning [J]. *Renew Energ*, 2019, 132: 911-920.
- [24] Pu Y Y, Sun D W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution [J]. *Biosyst Eng*, 2017, 156: 108-119.
- [25] Uribe E, Vega-Gálvez A, Scala K D, *et al.* Characteristics of convective drying of pepino fruit (*Solanum muricatum* Ait.): Application of Weibull distribution [J]. *Food Bioprocess Tech*, 2011, 4: 1349-1356.
- [26] Bantle M, Kolsaker K, Eikevik T M. Modification of the weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food [J]. *Dry Technol*, 2011, 29(10): 1161-1169.
- [27] Rahman M S, Al-Shamsi Q H, Bengtsson G B, *et al.* Drying kinetics and allicin potential in garlic slices during different methods of drying [J]. *Dry Technol*, 2009, 27(3): 467-477.
- [28] 王学成, 康超超, 伍振锋, 等. 二至丸热风干燥过程温度均匀性模拟与实验 [J]. *中草药*, 2020, 51(3): 1226-1232.
- [29] Ju H Y, Law C L, Fang X M, *et al.* Drying kinetics and evolution of sample's core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot air drying [J]. *Dry Technol*, 2015, 8(11): 9435-9441.
- [30] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空-蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响 [J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 206-210.