

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

巨浩羽¹, 赵士豪¹, 赵海燕², 刘月英¹, 刁春英¹, 郑志安³, 高振江³, 肖红伟^{3*}

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. 中国农业大学工学院, 北京 100083

摘要: 目的 以枸杞为研究对象, 探索枸杞的真空脉动干燥过程中水分变化规律及动力学模型, 为改善表面结壳, 缩短干燥时间提供理论依据。方法 将真空脉动干燥技术应用于枸杞的干燥, 研究不同干燥温度(50、55、60、65 ℃)、真空时间(5、10、20、30 min)和常压时间(2、4、8 min)对枸杞干燥动力学、水分有效扩散系数(D_{eff})和干燥活化能(E_a)的影响, 利用 Weibull 分布函数对干燥过程进行模拟与分析。结果 干燥温度、常压时间和真空时间均对枸杞的干燥有显著影响, 当干燥温度 60 ℃, 常压时间 4 min, 真空时间 10 min 时, 干燥时间为 284 min; Weibull 分布函数能很好地描述枸杞的真空脉动干燥过程; 尺度参数 α 与干燥时间有关, 并随干燥温度的升高而降低; 干燥温度、真空时间和常压时间对形状参数 β 的影响较小, β 值和干燥方式相关; 水分 D_{eff} 在 $2.02 \times 10^{-8} \sim 3.56 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 干燥 E_a 为 36.27 kJ/mol。结论 Weibull 分布函数可预测枸杞药材真空脉动干燥过程中的水分脱除规律, 对于枸杞干燥过程的预测、调控和工艺优化具有重要意义。

关键词: 枸杞; 真空脉动干燥; Weibull 分布函数; 干基含水率; 干燥速率; 水分扩散系数; 活化能

中图分类号: R283.3 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2018)22-5313-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2018.22.014

Vacuum pulsed drying characteristics of *Lycii Fructus* based on Weibull distribution model

JU Hao-yu¹, ZHAO Shi-hao¹, ZHAO Hai-yan², LIU Yue-ying¹, DIAO Chun-ying¹, ZHENG Zhi-an³, GAO Zhen-jiang³, XIAO Hong-wei³

1. College of Biology Science 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 Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract: Objective To mitigate *Lycii Fructus* surface crust and save drying time during drying process, vacuum pulsed drying technology was applied to dry *Lycii Fructus* so as to investigate moisture diffusion regulation and build the drying model. **Methods** The effect of different drying temperature (50, 55, 60, and 65 ℃), vacuum pressure holding time (5, 10, 20, and 30 min), and atmosphere pressure holding time (2, 4, and 8 min) on drying characteristics, moisture diffusion coefficients and drying activation energy was explored in vacuum pulsed drying process. Weibull model distribution was used to simulate and analyze *Lycii Fructus* drying curves. **Results** All the drying temperature, atmosphere pressure holding time, and vacuum pressure time holding time had significant influence on drying time. When drying temperature, atmosphere pressure holding time, and vacuum pressure time holding time was 60 ℃, 4 min, and 10 min, respectively, the minimum drying time was achieved to be 284 min. Weibull distribution model can be well described the vacuum pulsed drying process of *Lycii Fructus*. The scale parameter was related to drying time and decreased as drying temperature increased. The drying temperature, atmosphere pressure holding time, and vacuum pressure time holding time had little influence on the shape parameter. The shape parameter was associated with drying method. The moisture diffusion coefficient and activation energy were calculated to be $2.02 \times 10^{-8} \sim 3.56 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ and 36.27 kJ/mol, respectively. **Conclusion** Weibull distribution model can well describe the moisture diffusion regulation of vacuum pulsed drying process of *Lycii Fructus*. The drying result had a great significance for predicting, controlling and optimizing drying process. On the other hand, the research could provide technical basis for industrial drying of *Lycii Fructus* by vacuum pulsed drying technology.

收稿日期: 2018-06-26

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-21); 石家庄市科学技术研究开发项目(171170982A)

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, 从事农产品干燥技术与装备研究。E-mail: xhwcaugxy@163.com

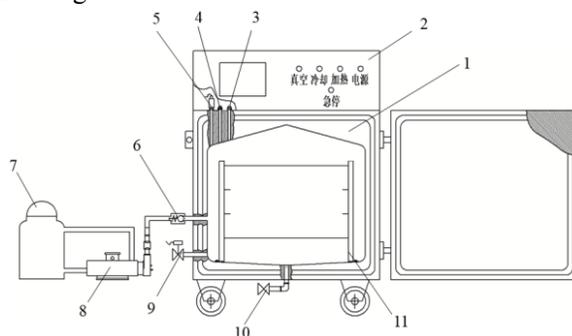
Key words: *Lycii Fructus*; vacuum pulsed drying; Weibull model distribution; dry basis moisture content; drying rate; moisture diffusion coefficient; activation energy

枸杞为茄科多年生落叶灌木，具有滋肝补肾、益精明目的功效，主治虚劳精亏、腰膝酸痛、眩晕耳鸣、内热消渴、血虚萎黄、目昏不明^[1-2]。现代科学测试分析和临床试验研究枸杞的化学成分及功能因子，证明枸杞不仅营养丰富，还具有多方面的保健功能与药理作用，如增强免疫、抗疲劳、抗辐射、降血糖、调血脂、养颜美容等^[3-4]。而枸杞的干燥动力学和干燥品质是目前研究难点，其干燥后经常出现结壳、色泽劣变等现象^[5]。现有的枸杞干燥研究局限于干燥方式的效率，对干燥动力学及内部传热、传质机制涉及较少。

枸杞的烘干方法主要有热风、微波、真空冷冻和太阳能干燥等^[6]。贾清华等^[7]研究了枸杞的热风干燥特性，发现热风温度是影响干燥速率的主要因素，风速是次要因素；干燥温度为 70 °C，风速为 0.2 m/s 时干燥时间为 10 h。马林强等^[5]研究了枸杞的微波干燥特性，结果表明微波干燥作用于枸杞干燥降速阶段可大幅度的缩短枸杞干燥周期，微波组合干燥较自然晾晒缩短时间 65 h。热风干燥技术虽然设备简单，生产量大，但普遍存在着干燥时间长，干燥品质差的现象；真空冷冻干燥法加工的枸杞色泽鲜红、生物活性成分和营养成分保持良好，但其设备昂贵，能耗较高，较适合应用于生产高附加价值枸杞产品^[6]；太阳能干燥应用于农产品干燥探索刚开始。真空脉动干燥技术是一种新型干燥技术，在干燥过程中干燥室处于真空与常压交替循环状态，不仅可以使物料内部组织形成蜂窝状孔隙结构，而且还能破坏物料表层蒸气压与干燥室内压力的平衡状态，具有干燥效率高、产品品质好等优点^[8-9]，现已经被应用于茯苓^[10]、枣片^[11]等物料的干燥研究中。Weibull 分布函数具有很好的适用性，近年来已广泛应用于湿物料的干燥动力学研究中，并取得较高的拟合精度，对相关物料干燥加工的预测、调控提供了依据^[12-13]。基于此本实验将真空脉动干燥技术应用于枸杞的干燥加工中，探究在不同干燥温度、不同真空时间和常压时间下的干燥特性、水分有效扩散系数 (D_{eff})、干燥活化能 (E_a)，并基于 Weibull 分布函数模拟分析干燥过程，为优化枸杞干燥工艺，提高枸杞干燥效率和干燥品质提供理论依据和技术支持。

1 仪器与材料

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自制）如图 1 所示。其主要由真空系统（水环式真空泵、真空管路、干燥室等）、加热系统（加热水箱、温度传感器、循环水路以及电加热板等）和控制系统组成。实验过程中干燥室内真空状态所达真空度为绝对压强 6 kPa，真空脉动干燥机每 5 秒自动称量物料质量，称量精度为 ± 0.01 g。



1-真空箱 2-控制箱 3-传感器接口 4-电源接口 5-压力传感器接口 6-单向阀 7-冷凝器机组 8-真空泵 9-电磁阀 10-手动球阀 11-料架
1-vacuum chamber 2-control chamber 3-sensor interface 4-power interface 5-pressure sensor interface 6-one-way valve 7-condenser unit 8-vacuum pump 9-electromagnetic valve 10-manual ball valve 11-rack

图 1 真空脉动干燥机

Fig. 1 Vacuum pulsed dryer

新鲜枸杞购自甘肃省靖远县，经中国农业大学工学院肖红伟副教授鉴定为茄科枸杞属植物宁夏枸杞 *Lycium barbarum* L. 的成熟果实。挑选新鲜、色红、无虫害、表面完整无机械伤、大小均匀的原料作为实验材料。枸杞长度约为 18.73 mm，质量为 0.56 g，湿基含水率为 83.2% (105 °C 烘 24 h)。实验前将新鲜枸杞放于纸箱中，置于 (3 ± 1) °C 的冰箱中保存。

2 方法与结果

2.1 枸杞干燥参数计算

2.1.1 枸杞的水分比 (moisture ratio, MR) 不同时间 MR 的计算可按公式 (1) 计算^[14-15]，干基含水率按公式 (2) 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

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

W_t 为干燥任意时刻的总质量， G 为绝干物质质量

2.1.2 枸杞的干燥速率 (drying rate, DR) 枸杞的 DR 是指两相邻时刻物料干基含水率的差值与时间间隔的比值, 按照公式 (3) 计算^[17]。

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

2.1.3 数据处理与模型分析 Weibull 分布函数由公式 (4) 表示^[18]。

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

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, 当 $\beta > 1$ 时, 干燥速率会先升高后降低

模型的拟合程度使用如下指标来评价^[19]:

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

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

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

$MR_{exp,i}$ 为干燥实验实测的第 i 个水分比, $MR_{pre,i}$ 为模型计算得出的第 i 个水分比, N 为实验测得数据个数, r^2 为拟合决定系数, RMSE 为均方根误差, χ^2 为离差平方和, n 为常数的个数

水分 D_{eff} 通常用简化的费克第 2 定律计算^[20], 即:

$$MR = M_t / M_0 \approx 8 e^{-\pi^2 D_{eff} t / L^2} / \pi^2 \quad (8)$$

L 为物料的厚度, t 为干燥时间

干燥温度对水分 D_{eff} 的影响关系可用阿仑尼乌斯公式表达, 干燥 E_a 按公式 (9) 计算^[21]。

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - E_a / [R(T + 273.15)] \quad (9)$$

D_0 为 D_{eff} 的频率因子, 为定值; E_a 为物料的干燥活化能; R 为气体摩尔常数, 值为 8.314 J/(mol·K); T 为物料的干燥温度

2.2 枸杞的干燥

按实验要求预先设定温度, 真空脉动机预热 30 min。自冰箱取出枸杞, 清洗、沥干、等待其达到室温。将沥干后的枸杞在 30 cm × 20 cm 的平盘上平铺一层, 每隔 0.5 h 测定样品的质量变化, 直到湿基含水率达到 13% 停止实验。干燥结束后, 放入保鲜袋, 置于干燥皿中贮存。具体实验设置见表 1。每次实验重复 3 次, 结果取平均值。

2.2.1 干燥温度对枸杞干燥特性的影响 在恒定常压时间 4 min, 真空时间 10 min 时, 研究干燥温度为 50、55、60、65 °C 对枸杞干燥特性的影响, 得

到各干燥温度下的干燥特性和干燥速率曲线, 见图 2、3。由图 2 可知, 枸杞的水分比随着干燥时间的延长呈下降趋势。干燥温度为 50、55、60、65 °C 条件下, 干燥时间分别为 476、380、284、236 min。干燥温度为 60 °C 时, 干燥时间比 50 °C 时干燥时间缩短了 40.3%。当干燥温度过高时, 则使枸杞表面

表 1 实验设计与实验参数

Table 1 Design for experiments with run conditions included

序号	干燥温度/°C	常压时间/min	真空时间/min
1	50	4	10
2	55	4	10
3	60	4	10
4	65	4	10
5	60	2	10
6	60	8	10
7	60	4	5
8	60	4	20
9	60	4	30

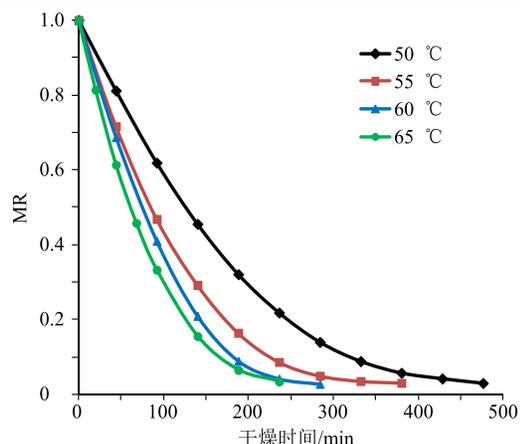


图 2 不同干燥温度枸杞的真空脉动干燥曲线

Fig. 2 Drying curves of Lycii Fructus at different drying temperatures

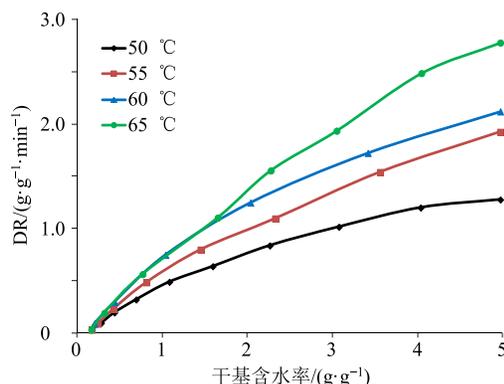


图 3 不同干燥温度枸杞的真空脉动干燥速率曲线

Fig. 3 Drying rate curves at different drying temperatures

出现干燥结壳、色泽劣变等现象，不利于枸杞的干燥品质。由此可知，提高干燥温度可显著地缩短干燥时间，提高干燥效率。这与 Xie 等^[22]和吴中华等^[6]的研究结论相一致。

由图 3 可知，干燥速率随着干基含水率的降低而降低，不同干燥温度下，枸杞的整个干燥过程没有升速和恒速干燥阶段，而处于降速干燥阶段。由此可知枸杞的真空脉动干燥过程属于内部水分扩散的干燥过程。

2.2.2 不同常压时间对枸杞干燥特性的影响 在恒定真空时间 10 min，干燥温度为 60 °C 时研究常压时间为 2、4、8 min 时对枸杞干燥特性的影响，得到各常压时间下的干燥特性和干燥速率曲线，见图 4、5。由图 4 可知，枸杞的干燥时间随着常压时间的升高先减小后增大，常压时间对枸杞干燥速率具有显著性的影响。当常压时间为 4 min 时，干燥时间最短为 284 min。在常压阶段，枸杞处于被加热的状态而蒸发速率小，2 min 常压时间枸杞没有充

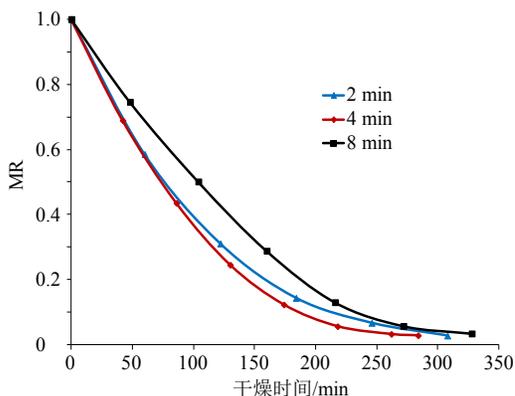


图 4 不同常压时间枸杞的真空脉动干燥曲线

Fig. 4 Drying curves at different normal atmosphere pressure holding time

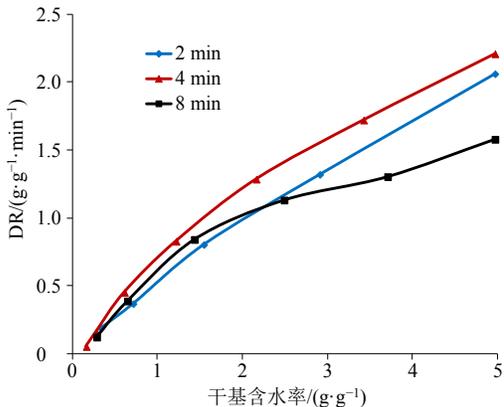


图 5 不同常压时间枸杞的真空脉动干燥速率曲线

Fig. 5 Drying rate curves at different normal atmosphere pressure holding time

分的加热导致内部水分扩散的推动力减小，从而导致干燥时间延长。而当常压时间为 8 min 时，枸杞已经被充分加热，但由于常压时间过长而使总的干燥时间延长。

由图 5 可知，不同常压时间干燥条件下，枸杞的干燥过程处于降速干燥阶段。当真空时间为 10 min 时，常压时间为 2 min 时的干燥速率先是大于常压时间为 8 min 时的干燥速率，而后小于 8 min 时的干燥速率。这可能是由于当常压时间为 2 min 时的干燥初期，枸杞脱除的是非结合水部分，真空时间比例大使得干燥速率较大；而当常压时间为 8 min 时干燥后期，枸杞脱除的是非结合水部分，由于枸杞被充分加热，因而干燥速率较大。

2.2.3 不同真空时间对枸杞干燥特性的影响 在恒定干燥温度为 60 °C、常压时间为 4 min 时，探究真空时间为 5、10、20、30 min 时对枸杞干燥特性的影响，得到各真空时间下的干燥特性和干燥速率曲线，见图 6、7。由图 6 可知，枸杞的干燥时间随着真空时间的延长呈先减少后增大的趋势。当真空时间为 10 min 时，干燥时间最短为 284 min。真空保持时间对枸杞干燥时间具有显著地影响。当真空时间为 20 或 30 min 时，由于常压时间的减少导致枸杞没有充分的加热，从而使总的干燥时间延长。

由图 7 可知，不同真空时间下的枸杞干燥速率随着干基含水率的降低而降低。枸杞的干燥过程处于降速干燥阶段。当真空时间为 10 min 时，干燥速率大于真空时间为 5、20、30 min 时的干燥速率。由方差分析结果可知，干燥温度、常压时间和真空时间均对枸杞的干燥时间具有显著性地影响 ($P < 0.05$)，且干燥温度 > 常压时间 > 真空时间。且当干燥温度为 60 °C，常压时间为 4 min 和真空时间为

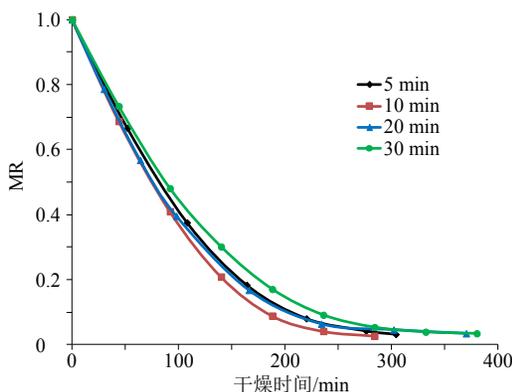


图 6 不同真空时间枸杞的真空脉动干燥曲线

Fig. 6 Drying curves at different vacuum pressure holding time

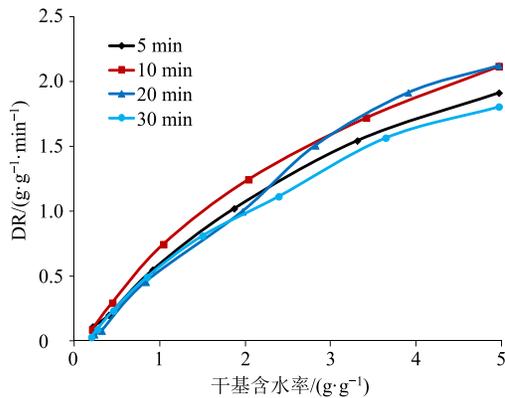


图 7 不同真空时间枸杞的真空脉动干燥速率曲线

Fig. 7 Drying rate curves at different vacuum pressure holding time

10 min 时, 干燥时间为 284 min。

2.3 干燥曲线的 Weibull 分布函数模拟

利用 Weibull 分布函数模拟经过不同干燥温度、真空时间、常压时间处理的枸杞干燥曲线, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, r^2 区间在 0.999 0~0.999 6, RMSE 在 0.004 2~0.015 1, χ^2 在 2.57×10^{-5} ~ 3.22×10^{-4} 。由此可见, Weibull 分布函数可以较好地模拟枸杞的真空脉动干燥过程, 为进一步利用 Weibull 分布函数对干燥过程分析提供了基础条件。

表 2 不同干燥条件下的 Weibull 分布函数模拟结果

Table 2 Weibull distribution model simulation result at different drying conditions

序号	α /min	β	r^2	RMSE	χ^2
1	116.96	1.23	0.999 6	0.006 2	4.81×10^{-5}
2	114.99	1.17	0.999 4	0.007 8	7.72×10^{-5}
3	98.00	1.27	0.999 4	0.008 1	9.41×10^{-5}
4	82.89	1.15	0.994 0	0.007 9	8.20×10^{-5}
5	104.49	1.14	0.999 8	0.004 2	2.72×10^{-5}
6	131.73	1.33	0.998 0	0.015 1	3.22×10^{-4}
7	108.27	1.25	0.999 7	0.004 9	3.46×10^{-5}
8	103.58	1.16	0.998 9	0.011 1	1.67×10^{-4}
9	118.56	1.19	0.999 4	0.007 9	8.10×10^{-5}

对干燥过程而言, Weibull 分布函数中的尺度参数 α 表示干燥过程中的速率常数。当 $t=\alpha$ 时, 枸杞物料中的水分比占初始总自由水分量的 37%, 其值约等于干燥过程完成 63% 所需要的时间^[23]。不同干燥方法下, 尺度参数 α 在 82.89~131.73 min, 且 α 与干燥温度相关, 温度越高, 干燥时间越短, α 值越小; α 值随着常压时间的延长先减小后增大; 随着真空时间先减小而后增大。

形状参数表示干燥初始阶段物料的干燥速率^[24]。

当 $\beta > 1$, 干燥速率呈现先升速后降速的阶段, 干燥过程为表面和内部水分共同控制; 当 β 在 0.3~1.0 时, 干燥速率为降速干燥, 干燥过程为内部水分扩散控制。由表 2 可知 β 值在 1.14~1.33, 故理论上干燥过程存在短暂的升速干燥阶段, 而后干燥过程为内部水分控制的降速干燥过程。由于升速阶段时间短暂及称质量时间的影响, 干燥速率曲线主要呈现降速干燥过程, 不同干燥条件下的 β 没有显著性区别。因此, 对于同一种物料而言, 形状参数是与干燥方式有关的参数, 不同的干燥条件对其影响很小, 这与 Corzo 等^[25]的研究结论相一致。综上可知, 尺度参数 α 和总的干燥时间相关, 且值随着干燥温度的升高而降低; 形状参数 β 主要干燥方式和物料状态有关, 在同一干燥方式、不同干燥温度下形状参数 β 的变化很小, Weibull 分布函数可以很好的描述枸杞的真空脉动干燥过程, 尺幅参数 α 和形状参数 β 可以反映干燥过程。

2.4 水分 D_{eff}

干燥过程中湿分扩散是一个复杂的过程, 该过程可能包括分子扩散、毛细管流、吸水动力学流和表面扩散等, 这些现象结合起来由 Fick 第二定律定义为水分 D_{eff} , 水分 D_{eff} 是表征干燥过程中水分迁移速度快慢的参数^[14]。由公式 (8) 可知, 枸杞在干燥过程中 MR 的自然对数 $\ln MR$ 与干燥时间 t 呈线性关系。通过线性回归计算出枸杞的水分 D_{eff} , 结果见表 3。结果显示, 不同干燥条件下, 水分 D_{eff} 在 2.02×10^{-8} ~ 3.56×10^{-8} m^2/s 。温度对枸杞的水分 D_{eff} 具有显著性影响, 温度越高, 水分子运动越剧烈, 内部水分 D_{eff} 越大。这与郑霞等^[26]的研究结论一致。真空时间和常压时间对内部水分 D_{eff} 的影响结论与对干燥时间的影响结论相同。该水分 D_{eff} 范围与普遍的农产品和中草药的干燥中水分 D_{eff} 相一致^[27]。

2.5 干燥 E_a 及干燥产品

干燥 E_a 是表示物料干燥过程中脱除单位摩尔水分所需要的启动能量, 干燥 E_a 体现出干燥的难易程度并估算干燥能耗, E_a 越大表明物料越难被干燥, 能耗越大。物料的组成成分, 组织结构和比表面积影响着干燥 E_a , 且糖分和果胶含量高、组织结构紧密或比表面积小的物料具有较大的干燥 E_a 。由式 (9) 可知, 水分 D_{eff} 的自然对数 $\ln D_{eff}$ 与 $1/(T+273.15)$ 呈线性关系, 斜率为 $-E_a/R$, 如图 8 所示。因此可以通过斜率计算得出干燥 E_a 。由图 8 的直线回归方程

表 3 不同实验条件下的水分 D_{eff}

Table 3 Moisture diffusion coefficient at different drying conditions

序号	线性回归公式	r^2	$D_{\text{eff}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	$\ln\text{MR} = -1.29 \times 10^{-4} t + 0.182 7$	0.993 4	2.02×10^{-8}
2	$\ln\text{MR} = -1.67 \times 10^{-4} t + 0.063 9$	0.987 5	2.62×10^{-8}
3	$\ln\text{MR} = -2.24 \times 10^{-4} t + 0.172 4$	0.989 6	3.51×10^{-8}
4	$\ln\text{MR} = -2.27 \times 10^{-4} t + 0.005 7$	0.986 1	3.56×10^{-8}
5	$\ln\text{MR} = -1.94 \times 10^{-4} t + 0.132 2$	0.994 1	3.04×10^{-8}
6	$\ln\text{MR} = -1.79 \times 10^{-4} t + 0.235 3$	0.981 3	2.81×10^{-8}
7	$\ln\text{MR} = -1.96 \times 10^{-4} t + 0.149 6$	0.994 3	3.07×10^{-8}
8	$\ln\text{MR} = -1.64 \times 10^{-4} t - 0.026 9$	0.975 4	2.57×10^{-8}
9	$\ln\text{MR} = -1.71 \times 10^{-4} t + 0.123 8$	0.993 6	2.68×10^{-8}

可以计算出枸杞真空脉动干燥的 E_a 为 36.27 kJ/(mol·K), 该 E_a 小于远红外真空脉动枸杞的 E_a [54.3 kJ/(mol·K)] [22], 说明电加热方式的真空脉动干燥方式有利于枸杞的干燥过程。

图 9 比较了真空脉动和热风干燥后的枸杞产品的色泽。色泽是评判枸杞品质的重要的外观依据, 且色泽与枸杞中多糖、氨基酸、总黄酮和类胡萝卜素等含量相关, 对商品价值有重要影响, 以鲜红色为佳[28]。其中真空脉动干燥温度为 60 °C、常压时间 4 min 和真空时间为 10 min; 热风干燥温度为

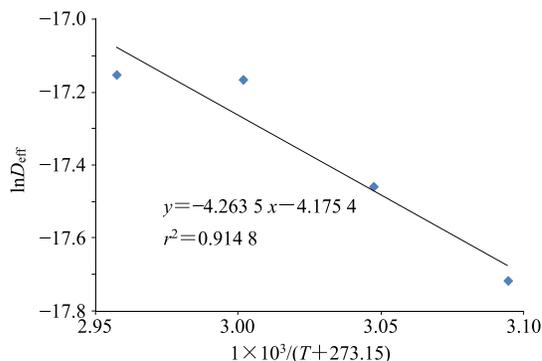


图 8 水分 D_{eff} 与干燥温度的关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between moisture diffusion coefficient and drying temperature



图 9 热风干燥 (左) 和真空脉动干燥 (右) 后的枸杞

Fig. 9 Drying *Lycii Fructus* products of hot air drying (left) and vacuum pulsed drying technology (right)

60 °C。由图 9 可以看出, 热风干燥条件下 (图 9 左), 干燥后的枸杞色泽阴暗, 褐变严重。真空脉动干燥后的枸杞色泽鲜红, 保持了枸杞原有的色泽。可能是因为在真空环境下, 枸杞没有发生有氧褐变, 且干燥时间短, 因此提高了干燥效率和干燥品质。

3 讨论

本实验研究了枸杞的不同干燥温度、常压时间、真空时间的真空脉动干燥过程中水分变化规律。结果表明, 枸杞的干燥时间随着干燥温度在 55 ~ 65 °C 的上升而缩短, 干燥温度为 60 °C 时, 干燥时间比 50 °C 时干燥时间缩短了 40.3%, 当干燥温度过高时, 枸杞表面容易产生表面结壳及品质劣变的现象; 在常压阶段, 物料需要充分被加热, 而在真空阶段具有较快的干燥速率, 干燥时间在常压时间 2 ~ 8 min 增加, 呈现先减小后增大的趋势; 在真空阶段, 充分加热后的枸杞需要保证足够的干燥脱水时间, 干燥时间随着真空时间在 5 ~ 30 min 增加, 呈现先减小后增大的趋势。适宜的干燥条件为干燥温度为 60 °C、常压时间为 4 min 和真空时间为 10 min, 此条件下枸杞的干燥时间为 284 min。

Weibull 分布函数可以很好的描述枸杞的真空脉动干燥过程, 尺度参数 α 和总的干燥时间相关, 且值随着干燥温度的升高而降低; 形状参数 β 主要干燥方式和物料状态有关, 在同一干燥方式下, 不同干燥温度下形状参数 β 的变化很小。不同试验条件下枸杞的水分 D_{eff} 在 $2.02 \times 10^{-8} \sim 3.56 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 且温度越高, 水分 D_{eff} 越高, E_a 为 36.27 kJ/(mol·K)。

本实验研究了枸杞真空脉动干燥过程中的干燥动力学、水分 D_{eff} 和干燥 E_a , 并基于 Weibull 分布函数模拟分析了干燥过程, 为枸杞干燥过程水分的

扩散与迁移提供了理论依据, 并对比了真空脉动和热风干燥的枸杞品质。结果表明真空脉动干燥技术适用于枸杞的干燥加工, 可提高干燥效率和干燥品质, 为真空脉动干燥加工枸杞提供了理论依据和技术支持。

参考文献

- [1] 冯美玲, 王书芳, 张兴贤. 枸杞子的化学成分研究 [J]. 中草药, 2013, 44(3): 265-268.
- [2] 陈芳, 郑新恒, 王瑞, 等. 枸杞根化学成分研究 [J]. 中草药, 2018, 49(5): 1007-1012.
- [3] 呼蕾, 董玲, 屈蕾, 等. 枸杞多糖通过上调脂联素的表达缓解小鼠动脉粥样硬化 [J]. 药物评价研究, 2017, 40(3): 292-299.
- [4] 张芳, 郭盛, 钱大玮, 等. 枸杞多糖的提取纯化与分子结构研究进展及产业化开发现状与前景分析 [J]. 中草药, 2017, 48(3): 424-432.
- [5] 马林强, 慕松, 李明滨, 等. 枸杞的微波干燥特性及其对品质的影响 [J]. 农机化研究, 2015(5): 208-211.
- [6] 吴中华, 李文丽, 赵丽娟, 等. 枸杞分段式变温热风干燥特性及干燥品质 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 287-293.
- [7] 贾清华, 赵士杰, 柴京富, 等. 枸杞热风干燥特性及数学模型 [J]. 农机化研究, 2010, 32(6): 153-157.
- [8] Chua K J, Chou S K. On the experimental study of a pressure regulatory system for bioproducts dehydration [J]. *J Food Eng*, 2004, 62(2): 151-158.
- [9] Wang J, Law C L, Nema P K, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices [J]. *J Food Eng*, 2018, 224(5): 129-138.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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, 31(16): 296-304.
- [13] 沙秀秀, 朱邵晴, 段金殿, 等. 基于 Weibull 分布函数的当归干燥过程模拟及其动力学研究 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(11): 2117-2122.
- [14] 齐娅汝, 李远辉, 韩丽, 等. 二至丸热风干燥动力学及干燥过程数学模拟研究 [J]. 中草药, 2017, 48(15): 3056-3063.
- [15] 葛进, 刘大会, 崔秀明, 等. 昭通产乌天麻的变温干燥工艺研究 [J]. 中草药, 2015, 46(24): 3675-3681.
- [16] 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.
- [17] Bai J W, Sun D W, Xiao H W, et al. Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2013, 20(4): 230-237.
- [18] Dai J W, Rao J Q, Wang D, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves [J]. *Drying Technol*, 2015, 33(3): 365-376.
- [19] Ju H Y, Zhang Q, Mujumdar A S, et al. Hot-air drying kinetics of yam slices under step change in relative humidity [J]. *Int J Food Eng*, 2016, 12(8): 783-792.
- [20] Deng L Z, Yang X H, Mujumdar A S, et al. Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure [J]. *Dry Technol*, 2018, 36(8): 893-907.
- [21] Wang D, Dai J W, Ju H Y, et al. Drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer [J]. *Int J Food Eng*, 2015, 11(5): 701-711.
- [22] Xie L, Mujumdar A S, Fang X M, et al. Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of Wolfberry: Effects on drying kinetics and quality attributes [J]. *Food Bioprod Process*, 2017, 102(3): 320-331.
- [23] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 基于 Weibull 分布函数对猕猴桃切片中短波红外干燥过程模拟及应用 [J]. 现代食品科技, 2014, 30(6): 146-151.
- [24] 白竣文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 278-285.
- [25] Corzo O, Bracho N, Pereira A, et al. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2008, 41(10): 2023-2028.
- [26] 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 262-269.
- [27] Ju H Y, Elmashad 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.
- [28] Xiao H W, Law C L, Sun D W, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying [J]. *Dry Technol*, 2014, 32(4): 418-427.