

红枣片冷冻—红外组合干燥特性

Characteristics of freeze-infrared combined drying of jujube slices

刘德成^{1,2} 郑霞^{1,2} 肖红伟³ 姚雪东^{1,2} 单春会⁴

LIU De-cheng^{1,2} ZHENG Xia^{1,2} XIAO Hong-wei³ YAO Xue-dong^{1,2} SHAN Chun-hui⁴

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 农业部西北农业装备重点实验室,

新疆 石河子 832003; 3. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 4. 石河子大学食品学院, 新疆 石河子 832003)

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2. Ministry of Agriculture in Northwest China Key Laboratory of Agricultural Equipment, Shihezi, Xinjiang

832003, China; 3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

4. College of Food Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

摘要:目的:优化红枣片干燥工艺,改善产品品质。方法:以红枣片为研究对象,研究转换含水率、红外温度和切片厚度与干燥时间和干燥速率的相关关系,计算红枣片在FD-IRD中水分有效扩散系数随转换含水率、红外温度和切片厚度的变化规律,并根据试验数据计算红枣片FD-IRD的干燥活化能。结果:转换含水率越低,红外干燥时间越短,但过低的转换含水率,会使冷冻干燥时间大幅延长;适当提高红外干燥温度有利于提高水分有效扩散系数;红枣片越薄干燥速率越大,减小切片厚度能够提高水分有效扩散系数,利于缩短干燥时间;前后两段均为降速干燥过程,通过费克第二定律求解得到不同干燥条件下的冷冻干燥和红外干燥的水分有效扩散系数分别为 $3.39 \times 10^{-9} \sim 9.47 \times 10^{-9}$ 、 $3.34 \times 10^{-9} \sim 2.01 \times 10^{-8}$ m²/s;通过阿尼乌斯公式计算出红外干燥阶段干燥活化能为59.03 kJ/mol。结论:在转换含水率30%,红外温度60℃,切片厚度6mm的条件下,冷冻—红外组合干燥技术所用干燥时间短、效率高。

关键词:红枣片;干燥;冷冻—红外组合干燥;干燥特性;干燥动力学

Abstract: Objective: Optimized the drying process of jujube slices and improved the product quality. **Methods:** Taking jujube slices as the research object, the correlation between conversion moisture content, infrared temperature and slice thickness and drying time and drying rate was studied, and the change rule of

effective moisture diffusion coefficient of jujube slices in FD-IRD with conversion moisture content, infrared temperature and slice thickness was calculated, and the drying activation energy of jujube slices in FD-IRD was calculated according to the test data.

Results: The lower the conversion moisture content is, the shorter the infrared drying time was. But the lower the conversion moisture content would greatly increase the freeze drying time. Proper increase of infrared drying temperature was beneficial to increase the effective diffusion coefficient of water. The thinner the slice is, the higher the drying rate was. Reducing the slice thickness can improve the effective water diffusion coefficient and shorten the drying time. The front and rear two stages were both speeds reducing drying processes. The effective moisture diffusion coefficients of freeze-drying and infrared drying under different drying conditions by solving Fick's second law were $3.39 \times 10^{-9} \sim 9.47 \times 10^{-9}$ and $3.34 \times 10^{-9} \sim 2.01 \times 10^{-8}$ m²/s, respectively; The drying activation energy of the infrared drying stage was 59.03 kJ/mol calculated by Anius formula. **Conclusion:** The conversion moisture content is 30%, and the infrared temperature is 60℃. Under the condition of slice thickness of 6 mm, the freeze infrared combined drying technology has short drying time and high efficiency.

Keywords: jujube slices; dry; freeze-infrared drying; drying characteristics; drying kinetics

基金项目:石河子大学成果转化与技术推广计划项目(编号:CGZH201808);国家自然科学基金项目(编号:31960488)

作者简介:刘德成,男,石河子大学在读硕士研究生。

通信作者:郑霞(1969—),女,石河子大学教授,硕士生导师,博士。E-mail:124899256@qq.com

收稿日期:2022-07-21 **改回日期:**2022-11-20

红枣(*Zizyphus jujuba* Mill.)是中国特有的果品资源^[1]。采后鲜红枣含水量高,极易发生失水皱缩、软化褐变以及发酵霉烂^[2]。干燥是延长红枣货架期的重要加工方式,去除水分后大大减少了红枣中的微生物滋生和腐败变质发生,同时也能得到独特的风味与口感^[3]。已有多钟果蔬干燥技术被用于红枣片的干制加工,其中冷冻干燥(FD)在去除果蔬中水分的同时维持果蔬内部原有的

主要微观形态与孔隙结构,较好地保留维生素 C 等营养成分,最终得到既营养又酥脆的果蔬脆片^[4]。但 FD 后期干燥缓慢,耗时长,成本高^[5-7]。红外干燥(IRD)是果蔬干燥加工的新技术,具有加热效率高、速率快、无热惯性、可选择性加热等特点^[8-9]。因此,可以将二者组合起来,提高干燥效率。冷冻—红外组合干燥技术是指前期利用 FD 去除大部分自由水,后期将剩余的少量自由水和部分结合水由 IRD 去除的一种新型干燥技术^[10]。

目前,关于 FD-IRD 的干燥工艺已有较多研究报道。王洪彩等^[11]分别采用 FD-IRD 和 IRD-FD 两种顺序组合模式干燥香菇,发现 FD-IRD 形式较 IRD-FD 模式干燥用时更短,香菇的干燥品质和营养成分与单一 FD 的更加接近,而且节约了更多的能耗。郑霞等^[12]研究发现,采用 FD-IRD 干燥红枣泥片比气体射流—红外干燥时间更短,维生素 C 保留率更高。Pan 等^[13]采用 FD-IRD 干燥香蕉片,发现与单一 FD 相比,FD-IRD 所得香蕉片质地更脆,色泽更好,但如果采用 IRD-FD,会破坏香蕉片质地,导致后段 FD 期间干燥速率更慢。Shih 等^[14]采用 FD-IRD 的形式干燥草莓片,发现与单一 FD 相比组合干燥具有更理想的颜色、更高的脆度,收缩率更大,复水率更低,解决了单一 FD 脆度较低的问题。综上,FD-IRD 能够充分发挥 FD 和 IRD 的优点,在保证果蔬干燥品质的同时缩短干燥时间。

前人研究主要集中在 FD-IRD 的干燥排列顺序和干制品品质两方面,对于干燥特性和干燥动力学方面的研究鲜少报道。分析干燥过程中物料水分变化规律可以阐明物料的干燥规律,对于干燥工艺制定具有重要意义^[15-17]。研究拟将 FD-IRD 应用于红枣片干燥,研究红枣片在不同干燥条件下,其水分比、干燥速率的动态变化的规律,研究转换含水率、红外温度和切片厚度与干燥时间和干燥速率的相关关系,找出红枣片在 FD-IRD 中水分有效扩散系数随转换含水率、红外温度和切片厚度变化而变化的规律,并根据试验数据计算红枣片 FD-IRD 的干燥活化能,为后期干燥工艺的优化和改善产品品质建立理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

红枣:产地新疆阿克苏,挑选大小均匀,色泽红亮、外形完整的枣果,洗净去核后切成规定厚度的圆环形枣片。湿基含水率 $(52.06 \pm 0.50)\%$ (根据 AOAC 934.06 测定含水率)。根据预试验,每次检测前对 (200 ± 2) g 样品进行干燥,使其达到目标含水率 10% ,每组试验重复 3 次,结果取平均值进行分析,冷却后密封包装。

1.2 主要仪器与设备

真空冷冻干燥机(如图 1 所示):CHRIST ALPHA 1-2Ldplus 型,德国 CHRIST 冻干机有限公司;

中短波红外干燥箱(如图 2 所示):SAK-ZG-W0700

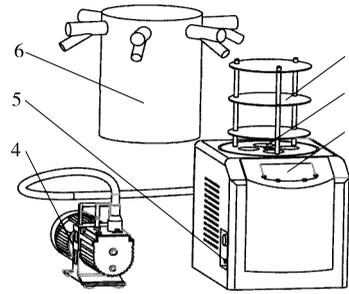


图 1 冷冻干燥机
Figure 1 Freeze dryer

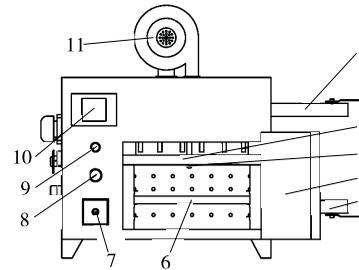


图 2 红外干燥机
Figure 2 Infrared dryer

型,功率 $0 \sim 2$ kW,圣泰科有限公司;

电动抽(充)气自动包装机:600 型,郑州九博机械设备有限公司;

电子天平:BSM-4200.2 型,精确度 0.0001 g,上海卓精电子科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 红枣片 FD-IRD 干燥参数的确定 通过预试验及参考文献^[4,15]发现装载量对产品品质影响较小,所以结合试验设备参数,固定适宜装载量 200 g 进行研究,辐射距离越近干燥速度越快,风速越大干燥速率越快,故选用最近的辐射距离(上层 80 mm)与最大的风速(2 m/s)以加速红枣片干燥。考虑到实际生产中干燥设备与试验设备的差异,以节省能耗为原则,参考相关学者^[6,10,18]的研究,使红枣片的冷冻温度和真空压力保持在尽可能接近红枣片的共晶共熔点温度,设定冷冻温度和真空压力 $(-40$ °C, 12 Pa),转换含水率范围为 $20\% \sim 40\%$ 。根据果蔬干燥的常见温度范围和干燥装备的参数可调范围设定红外温度范围 $50 \sim 80$ °C。参照文献^[12,18-20],设定切片厚度范围为 $2 \sim 10$ mm。

1.3.2 FD-IRD 干燥工艺流程

红枣→挑选→清洗→去核→切片(6 mm)→预冻→冷冻干燥(冷阱温度 -40 °C、干燥室压力 12 Pa)→红外干

燥(红外温度 50~80 ℃、辐射功率 6.75 W/g)→干燥终点(干基含水率≤11%)→封装→检测

1.3.3 红枣片 FD-IRD 干燥试验与干燥方法 参照文献[6,10],选定转换含水率、红外温度和切片厚度为影响因素。设定红外温度 65 ℃,切片厚度 6 mm,探究转换含水率(20%,25%,30%,35%,40%)对红枣片 FD-IRD 干燥特性及干燥动力学的影响;设定转换含水率 30%,切片厚度 6 mm,探究红外温度(50.0,57.5,65.0,72.5,80.0 ℃)对红枣片 FD-IRD 干燥特性及干燥动力学的影响;设定转换含水率 30%,红外温度 65 ℃,探究切片厚度(2,4,6,8,10 mm)对红枣片 FD-IRD 干燥特性及干燥动力学的影响。试验时,将每组(200±2) g 红枣片样品置于冷冻干燥箱中(冷阱温度-40 ℃,真空压力 12 Pa)进行干燥且每间隔 0.5 h 将红枣片取出称重后快速放回冷冻干燥机内,待样品干至规定转换含水率(按重量计)以后快速移至红外干燥箱(功率 1 350 W,温度范围 50~80 ℃)中继续干燥,之后每间隔 0.25 h 称取重量 1 次,干燥至干基含水率为 11%。每组试验重复 3 次,结果取平均值进行分析,冷却后密封包装。试验数据采用 OriginPro 2018C 软件进行绘图及数据非线性拟合和分析。

1.3.4 干燥动力学参数计算

(1) 干基含水率:按式(1)计算^[21]。

$$M_t = \frac{G_t - G_0}{G_0} \tag{1}$$

式中:

M_t ——红枣片干燥至 t 时刻的干基含水率, g/g;

G_t ——红枣片在任意干燥 t 时刻的总质量, g;

G_0 ——红枣片绝干质量, g。

(2) 水分比:按式(2)计算^[21]。

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \tag{2}$$

式中:

M_R ——不同时刻水分比;

M_0 ——红枣片初始干基含水率, g/g。

(3) 干燥速率:按式(3)计算^[22]。

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_1 - t_2} \tag{3}$$

式中:

D_R ——干燥速率, g/(g·h)

M_{t_1} —— t_1 时刻样品的干基含水率, %;

M_{t_2} —— t_2 时刻样品的干基含水率, %。

(4) 水分有效扩散系数:水分扩散规律可以采用 Fick 第二定律描述,按式(4)计算^[23]。

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t\right) \tag{4}$$

式中:

D_{eff} ——水分有效扩散系数, m²/s;

L ——枣片的厚度, mm;

t ——干燥时间, s。

将式(4)两边取自然对数可得:

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t \tag{5}$$

由式(5)可知,红枣片水分比的对数 $\ln M_R$ 与干燥时间 t 呈线性关系,且其斜率 k 为 $-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2}$ 。 D_{eff} 的表达式为:

$$D_{\text{eff}} = -\frac{L^2}{\pi^2} k \tag{6}$$

(5) 干燥活化能:用阿伦尼乌斯公式(Arrhenius equation)来表示红枣片的有效水分扩散系数和干燥温度的关系^[17]:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right] \tag{7}$$

式中:

D_{eff} ——有效水分扩散系数, m²/s;

D_0 ——扩散基数, m²/s;

E_a ——干燥活化能, J/mol;

R ——气体摩尔常数, 8.314 J/(mol·K);

T ——干燥温度, ℃。

对式(7)两边取自然对数得式(8)。

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T+273.15)} \tag{8}$$

由式(8)可知,自然对数 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/(T+273.15)$ 呈线性关系,其斜率 k 正好为 $-E_a/R$ 。干燥活化能的表达式为:

$$E_a = -kR \tag{9}$$

扩散系数数学表达式为^[22]:

$$D = a_0 \exp(a_1 M) \exp\left(-\frac{a_2}{T}\right) \tag{10}$$

式中:

a_0, a_1, a_2 ——常量,分别为 $7.817 \times 10^{-5}, 5.5, 4 850$ 。

2 结果与分析

2.1 转换含水率对红枣片 FD-IRD 干燥特性及干燥动力学的影响

2.1.1 水分比 由图 3 可知,红枣片干燥至终点的时间随转换含水率的降低而增加,FD 阶段干燥时间分别为 0.88,1.50,2.45,3.50,7.00 h,IRD 阶段干燥时间分别为 2.20,2.00,1.75,1.60,1.25 h。转换含水率越低,IRD 所需干燥时间越短,总干燥时间越长。当转换含水率(湿基)为 20%时,FD 阶段干燥时间最长为 7.00 h,IRD 阶段所需干燥时间最短为 1.25 h,这是因为 FD 后期处于解析干燥阶段,此时剩余的结合水较自由水更难升华^[22],同时 FD 阶段去除了一部分自由水,使得红枣片的内部结构及表面孔隙改变,利于后段 IRD 时水分的迁移,从而缩短了

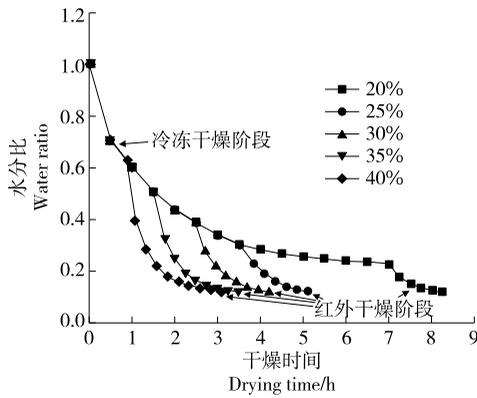


图3 不同转换含水率(湿基)下红枣片干燥曲线

Figure 3 Drying curve of jujube slices under different converted moisture content

干燥时间^[22]。FD保持时间越长,红枣水分比也越低。但水分比也不应过低,选择转换含水率(湿基)在25%~40%为适宜。

2.1.2 干燥速率 由图4可知,FD干燥阶段与IRD干燥阶段均为降速干燥,随着干基含水率的降低,干燥速率减慢。FD阶段开始时红枣片处于快速失水期,故此时干燥速率较大^[17],随着FD保持时间的延长,干燥速率逐渐降低;在IRD阶段,干燥速率均出现了不同程度的迅速上升,一是因为IRD干燥速率要快于FD,二是因为FD去除了一部分水分,并保持了红枣片组织孔隙结构,利于后段IRD时水分的迁移。因此,先进行FD再进行IRD的干燥顺序是显著提高整体干燥速率,且干燥速率提升较明显对应的转换含水率(湿基)范围为30%~40%。

2.1.3 水分有效扩散系数 由表1可知,红枣片在FD阶

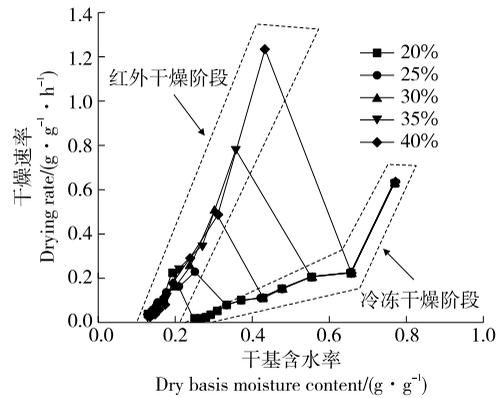


图4 不同转换含水率(湿基)下红枣片干燥速率曲线

Figure 4 Drying rate curve of jujube slices under different converted moisture content

段中,水分有效扩散系数随着转换含水率的减小而减小。在IRD阶段中,当转换含水率(湿基)在40%~30%时,水分有效扩散系数无明显变化,当转换含水率(湿基)降至30%~20%时,水分有效扩散系数随转换含水率的降低而减小,因此,选择转换含水率(湿基)为30%时,有较好的干燥效果。

2.2 红外温度对红枣片FD-IRD干燥特性及干燥动力学的影响

2.2.1 干燥曲线 由图5可知,为考察红外温度对红枣片FD-IRD干燥时间的影响,将红枣片FD至湿基含水率30%,再进行IRD,红外温度分别设定为50.0,57.5,65.0,72.5,80.0℃时,干燥时间分别为7.60,6.07,4.75,3.65,3.05h,其中IRD段干燥时间分别为5.60,4.07,2.75,1.65,1.05h。且随着红外温度的提高,干燥时间逐渐变

表1 不同转换含水率下lnM_R线性回归公式和水分有效扩散系数

Table 1 Linear regression formula of lnM_R and effective water diffusion coefficient under different converted water content

冷冻干燥阶段			
转换含水率(湿基)/%	线性回归拟合公式	相关系数 r ²	水分有效扩散系数 D _{eff} / (m ² · s ⁻¹)
40	lnM _R = -1.50 × 10 ⁻⁴ t - 0.022 7	0.964 32	9.47 × 10 ⁻⁹
35	lnM _R = -1.21 × 10 ⁻⁴ t - 0.053 3	0.961 71	7.68 × 10 ⁻⁹
30	lnM _R = -1.01 × 10 ⁻⁴ t - 0.094 8	0.965 72	6.39 × 10 ⁻⁹
25	lnM _R = -8.87 × 10 ⁻⁵ t - 0.134 8	0.968 95	5.62 × 10 ⁻⁹
20	lnM _R = -5.35 × 10 ⁻⁵ t - 0.341 3	0.891 24	3.39 × 10 ⁻⁹
红外干燥阶段			
红外温度/℃	线性回归拟合公式	相关系数 r ²	水分有效扩散系数 D _{eff} / (m ² · s ⁻¹)
65	lnM _R = -1.86 × 10 ⁻⁴ t - 0.260 1	0.861 83	1.17 × 10 ⁻⁸
65	lnM _R = -1.87 × 10 ⁻⁴ t - 0.047 9	0.890 19	1.18 × 10 ⁻⁸
65	lnM _R = -1.82 × 10 ⁻⁴ t - 0.499 9	0.935 04	1.15 × 10 ⁻⁸
65	lnM _R = -1.63 × 10 ⁻⁴ t - 0.792 4	0.970 05	1.03 × 10 ⁻⁸
65	lnM _R = -1.42 × 10 ⁻⁴ t - 2.005 3	0.939 66	8.96 × 10 ⁻⁹

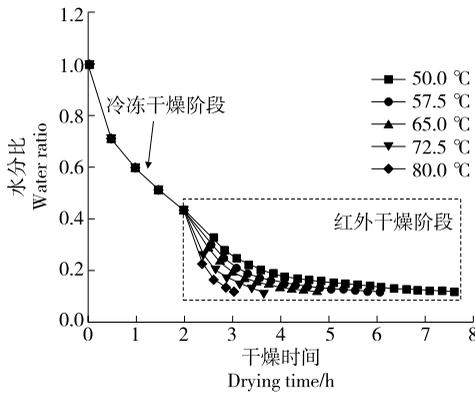


图 5 不同红外温度下红枣片干燥曲线

Figure 5 Drying curves of jujube slices at different infrared temperatures

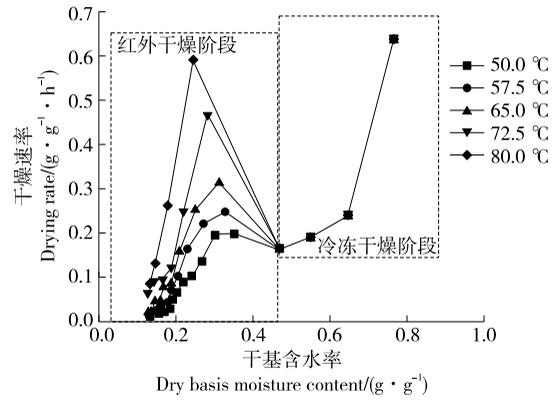


图 6 不同红外温度下红枣片干燥速率曲线

Figure 6 Drying rate curve of jujube slices under different converted moisture content

短,红外温度为 80.0 °C 时的 IRD 段干燥时间(1.05 h)比 50.0 °C 时的 IRD 段干燥时间(5.60 h)减少了 81.25%,即升高红外温度可减少红枣片的干燥时间。这是因为后段红外温度升高强化了物料内部水分向表面的迁移与扩散,提高了红枣片中的水分蒸发,从而缩短了干燥时间^[23]。由此可见,适当提高后段红外温度有利于缩短干燥时间。

2.2.2 干燥速率 由图 6 可知,红枣片在 FD-IRD 过程中,红外温度越大,红枣片的干燥速率越高,在转换为 IRD 初期,红枣片的干燥速率大幅增加,随后干燥速率又快速下降,直至干燥终点,说明红枣片 FD-IRD 过程为内部水分扩散控制,FD 初期红枣片水分含量较高,红枣片处于快速失水期,干燥速率较高,随着自由水的大量升华,剩余水分越来越少,干燥速率开始下降,转换为 IRD 阶段后,一方面物料迅速升温,水分蒸发量再次加大,干燥速率迅速增加,另一方面可能是由于 FD 使红枣片的内部组织及表面孔隙结构变化,利于后期 IRD 时水分的蒸发,但随着红枣片表面水分的迅速蒸发,红枣片内部水分扩散至表面的速率小于表面水分汽化速率,干燥速率逐

渐降低^[24],因此,红外温度越高越利于缩短红枣片的干燥时间,但由于红枣片为热敏性物料,温度过高其热敏性营养成分损失更严重,此外,由图 6 可知红外温度由 72.5 °C 升至 80.0 °C 干燥速率增幅已经明显小于红外温度从 65.0 °C 升至 72.5 °C,因此红外温度选择也不宜过高,综合考虑干燥品质与干燥时间的情况下,选择温度范围为 57.5~72.5 °C。

2.2.3 水分有效扩散系数 设定固定转换含水率为 30%,切片厚度为 6 mm,由表 2 可知,红枣片的水分有效扩散系数随红外温度的升高逐渐变大,其值从 $3.34 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 升高到 $2.01 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$,与戈晓康等^[25]和王雪媛等^[26]的研究结论基本一致;但红外温度每升高 7.5 °C 时,水分有效扩散系数的增加值不同。当红外温度从 50.0 °C 上升到 57.5 °C 时,水分有效扩散系数增加值最小为 $1.46 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,当红外温度从 72.5 °C 上升到 80.0 °C 时,其值增加最大为 $0.67 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。红外温度为 80.0 °C 时的水分有效扩散系数是 50.0 °C 时的 6.02 倍,因此,提高红外温度能够大大提高组合干燥后段红枣片的水分有效扩散系数,红外温度为 65.0 °C 时较为适宜。

表 2 不同红外温度下 $\ln M_R$ 线性回归公式和水分有效扩散系数[†]

Table 2 Linear regression formula of $\ln M_R$ and effective water diffusion coefficient under different infrared temperatures

冷冻干燥阶段		红外干燥阶段				
红外温度/°C	线性回归拟合公式	相关系数 r^2	水分有效扩散系数 $D_{\text{eff}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	线性回归拟合公式	相关系数 r^2	水分有效扩散系数 $D_{\text{eff}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
50.0				$\ln M_R = -5.28 \times 10^{-5}t - 1.2655$	0.86756	3.34×10^{-9}
57.5	$\ln M_R = -1.12 \times 10^{-4}t - 0.0757$	0.96557	7.06×10^{-9}	$\ln M_R = -7.58 \times 10^{-5}t - 1.2669$	0.85151	4.80×10^{-9}
65.0				$\ln M_R = -1.22 \times 10^{-4}t - 1.1891$	0.89275	7.73×10^{-9}
72.5				$\ln M_R = -2.11 \times 10^{-4}t - 1.1011$	0.94227	1.34×10^{-8}
80.0				$\ln M_R = -3.18 \times 10^{-4}t - 1.0928$	0.91424	2.01×10^{-8}

† 转换含水率(湿基)30%。

2.2.4 平均有效扩散系数随干燥时间变化规律 由图 7 可知,不同干燥温度下的水分有效扩散系数 D_{eff} 在 IRD 段干燥开始时达到峰值[转换含水率(湿基)为 30%],然后随着干燥时间的推移接近平衡值。红外温度为 80.0 °C 的水分有效扩散系数峰值和平衡值之间的变化范围大于红外温度为 50.0 °C 时的变化范围,选择的 IRD 段干燥温度越高,扩散系数越大。

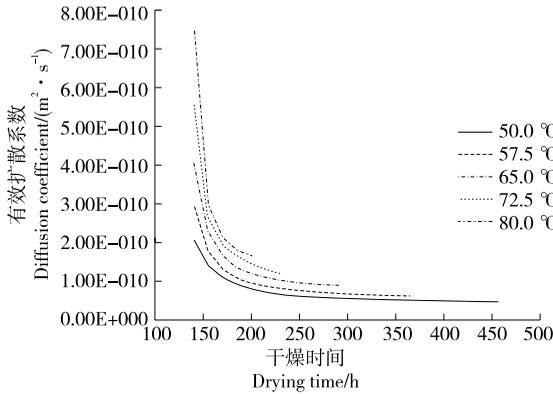


图 7 不同温度下的水分有效扩散系数曲线

Figure 7 Curves of effective water diffusion coefficient at different temperatures

2.2.5 干燥活化能 根据阿仑尼乌斯公式,干燥过程的活化能可由不同红外温度下的 $\ln D_{\text{eff}}$ 和红外温度 $1/(T+273.15)$ 两者的关系式得到,见图 8。由图 8 可得: $E_a/R = 7.10 \times 10^3$, 计算得到红枣片的 FD-IRD 中 IRD 段的活化能 $E_a = 59.03 \text{ kJ/mol}$, 即每除去 1 mol 水需要能量 59.03 kJ, 略大于万江静^[20] 研究所得红枣泥红外干燥活化能 53.79 kJ/mol, 原因为试验中 FD 阶段已将红枣片干燥至转换含水率(湿基)30%, 后期 IRD 阶段红枣片含水率较低水分相对不容易迁移所导致。

2.3 切片厚度对红枣片 FD-IRD 干燥特性及干燥动力学的影响

2.3.1 对水分比的影响 由图 9 可知,切片厚度为 2 mm

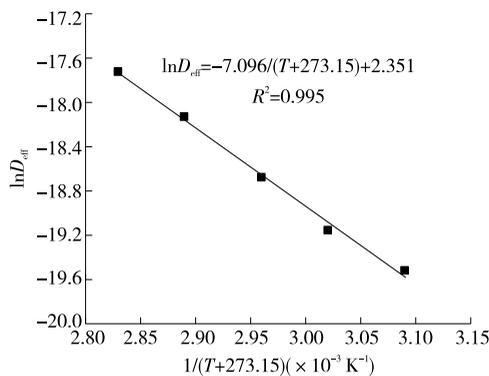


图 8 水分有效扩散系数与红外温度的关系

Figure 8 Relationship between effective moisture diffusion coefficient and drying temperature

(3.22 h) 和 4 mm (3.75 h) 时的干燥时间相差 0.53 h。切片厚度为 2 mm (3.22 h) 时的干燥时间比 10 mm (6.97 h) 时减少了 53.80%。因为随着切片厚度的减小,红枣片表面升温速度加快,内外温度梯度增大,水分迁移速率加快,相同时间内损失水分更多,因此 IRD 干燥时间就越短,与白冰玉等^[27] 研究结果基本一致。由此可见,红枣片越薄,越有利于缩短干燥时间,但切片厚度也不应过薄,过薄的切片厚度会影响产品口感与外观,也会造成更多的营养损失。

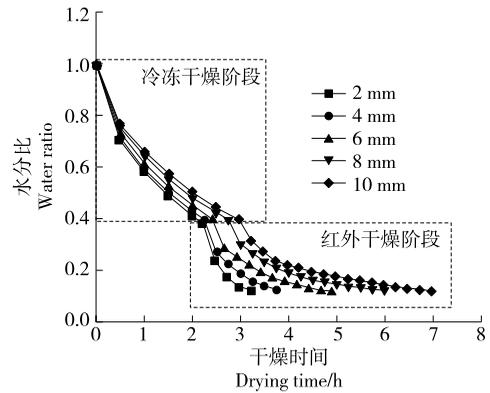


图 9 不同切片厚度下红枣片干燥曲线

Figure 9 The drying curve of jujube slices with different slice thickness

2.3.2 对干燥速率的影响 由图 10 可知,不同切片厚度下 FD 阶段和 IRD 干燥阶段的干燥速率变化趋势一致,由 FD 转换为 IRD 时,干燥速率均大幅上升,且随着切片厚度的减小,增幅逐渐增大,不同切片厚度之间干燥速率有显著差异,且切片厚度越薄时转换后的初始 IRD 干燥速率越高,之后继续进行降速干燥,当切片厚度在 4~6 mm 时,干燥速率提升最明显。切片厚度越薄,内部温度升温越快,同时水分扩散的距离较短且扩散阻力相对较小,因此,切片厚度越薄,干燥速率越大。

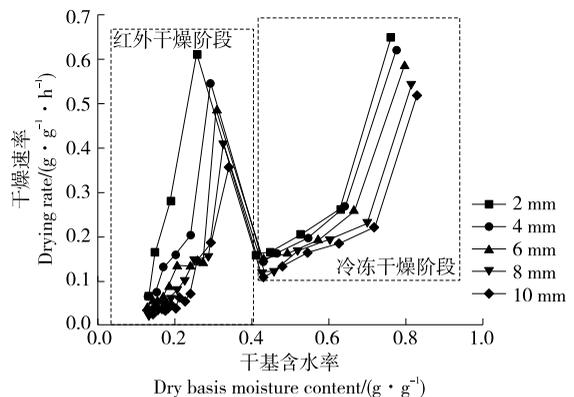


图 10 不同切片厚度下红枣片干燥速率曲线

Figure 10 The drying rate curve of jujube slices with different slice thickness

2.3.3 对水分有效扩散系数的影响 由表 3 可知,当切片厚度 < 6 mm 时,IRD 段的水分有效扩散系数高于 FD 段,即红外段有相对更大的干燥速率,使总干燥时间变短,但当切片厚度 > 6 mm 时,IRD 阶段的水分有效扩散系数略小于 FD 阶段,原因可能与红外辐射穿透深度的影响有关^[11]。切片厚度在 2~10 mm 时,FD 阶段的水分有效扩散系数随着切片厚度的减小而逐渐增大,IRD 阶段

的水分有效扩散系数随着切片厚度减小也逐渐增大。说明减小切片厚度能够很大程度上提高水分有效扩散系数,因此,综合考虑干燥效率和产品感官品质,选取 6 mm 为较优的切片厚度参数。徐庚等^[28]研究切片厚度对芡菁水分有效扩散系数的影响时,发现切片厚度的降低能够有效地提高芡菁干燥过程中水分有效扩散系数,与此试验结果一致。

表 3 不同切片厚度下 lnM_R 线性回归公式和水分有效扩散系数[†]

Table 3 Linear regression formula of lnM_R and effective water diffusion coefficient under different slice thickness

切片厚度/mm	冷冻干燥阶段			红外干燥阶段		
	线性回归拟合公式	相关系数 r ²	水分有效扩散系数 D _{eff} /(m ² ·s ⁻¹)	线性回归拟合公式	相关系数 r ²	水分有效扩散系数 D _{eff} /(m ² ·s ⁻¹)
2	lnM _R = -1.15 × 10 ⁻⁴ t - 0.082 1	0.976 86	7.28 × 10 ⁻⁹	lnM _R = -2.51 × 10 ⁻⁴ t - 0.754 5	0.962 15	1.59 × 10 ⁻⁸
4	lnM _R = -1.09 × 10 ⁻⁴ t - 0.080 9	0.975 41	6.90 × 10 ⁻⁹	lnM _R = -1.73 × 10 ⁻⁴ t - 0.211 7	0.987 46	1.09 × 10 ⁻⁸
6	lnM _R = -1.02 × 10 ⁻⁴ t - 0.076 0	0.978 13	6.46 × 10 ⁻⁹	lnM _R = -1.12 × 10 ⁻⁴ t - 0.237 1	0.979 66	7.09 × 10 ⁻⁹
8	lnM _R = -8.92 × 10 ⁻⁵ t - 0.079 7	0.980 93	5.65 × 10 ⁻⁹	lnM _R = -8.24 × 10 ⁻⁵ t - 0.423 0	0.962 28	5.22 × 10 ⁻⁹
10	lnM _R = -8.31 × 10 ⁻⁵ t - 0.077 9	0.981 53	5.26 × 10 ⁻⁹	lnM _R = -6.49 × 10 ⁻⁵ t - 0.541 9	0.972 69	4.11 × 10 ⁻⁹

† 转换含水率(湿基)30%。

3 结论

将冷冻—红外组合干燥技术应用于红枣片干燥加工,分析了红枣片在不同干燥条件下的组合干燥特性,结果表明:① 在不同转换含水率下,冷冻阶段含水率越低,干燥速率越慢,干燥时间越长,红外阶段红枣片中的水分在低含水率时蒸发,极大地提高了干燥速率,较佳转换含水率为 30%。② 在不同红外温度下,转换后的红外干燥温度越高干燥速率增幅越大,越有利于缩短红枣片的干燥时间;红外阶段的水分有效扩散系数随着红外温度的升高而增大;较佳红外温度为 60 ℃。通过阿仑尼乌斯公式得到其红外阶段的干燥活化能为 59.03 kJ/mol。③ 在不同切片厚度下,切片厚度越薄时转换后的初始红外干燥速率越高,之后继续进行降速干燥过程。水分有效扩散系数随着切片厚度的减小而增加,较佳切片厚度为 6 mm。冷冻—红外组合干燥技术所用干燥时间短、效率高,弥补了红枣片单一干燥时间长的不足。但对于冷冻—红外组合干燥技术在干燥能耗和干燥成本等方面还需要进一步探究。

参考文献

[1] 张丽. 红枣的射频热风联合干制技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010: 1-6.
ZHANG L. Research on the RF hot air combined drying technology of jujube[D]. Xianyang: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2010: 1-6.

[2] 刘小丹, 张淑娟, 贺虎兰, 等. 红枣微波—热风联合干燥特性及其品质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 28(24): 280-286.
LIU X D, ZHANG S J, HE H L, et al. Microwave hot air combined

drying characteristics of jujube and its effect on its quality [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2013, 28(24): 280-286.

[3] 李翔, 聂青玉, 许彦, 等. 三种干燥方式制备的猕猴桃脆片品质比较[J]. 南方农业, 2021, 15(28): 33-36.
LI X, NIE Q Y, XU Y, et al. Quality comparison of Kiwi chips prepared by three drying methods[J]. Southern Agriculture, 2021, 15(28): 33-36.

[4] 张裕仁. 板枣热风—真空分段联合干燥的干燥动力学及工艺优化[D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 11-23.
ZHANG Y R. Drying kinetics and process optimization of combined hot-air-vacuum segmented drying of jujube[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 11-23.

[5] 郭玉霞, 毕金峰, 易建勇, 等. 添加果皮对真空冷冻干燥重组芒果和火龙果脆片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 178-189.
GUO Y X, BI J F, YI J Y, et al. Effect of adding peel on the quality of vacuum freeze-dried reconstituted mango and pitaya chips[J]. Chinese Journal of Food, 2022, 22(3): 178-189.

[6] DUAN X, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Study on a combination drying technique of sea cucumber[J]. Drying Technology, 2007, 25(12): 2 011-2 019.

[7] 段续, 刘文超, 任广跃, 等. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 295-302.
DUAN X, LIU W C, REN G Y, et al. Microwave freeze drying characteristics and drying quality of Agaricus bisporus[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 295-302.

[8] 段续, 张萌, 任广跃, 等. 玫瑰花瓣红外喷动床干燥模型及品质变化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 238-245.
DUAN X, ZHANG M, REN G Y, et al. Drying model and quality change of rose petals in infrared spouted bed [J]. Journal of

- Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 238-245.
- [9] 徐保国, 周天楚, 马海乐, 等. 催化式红外辐照改善樱桃番茄去皮效果及品质[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 299-305.
XU B G, ZHOU T C, MA H L, et al. Catalytic infrared irradiation improves the peeling effect and quality of cherry tomatoes [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 299-305.
- [10] WANG H C, ZHANG M, ADHIKARI B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation [J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 507-510.
- [11] 王洪彩. 香菇中短波红外干燥及其联合干燥研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 34-49.
WANG H C. Study on medium and short wave infrared drying of shiitake mushrooms and its combined drying[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 34-49.
- [12] 郑霞. 基于不同干燥技术的红枣泥片干燥特性及品质研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 57-70.
ZHENG X. The drying characteristics and quality of jujube tablets based on different drying technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 57-70.
- [13] PAN Z, SHIH C, MCHUGH T H, et al. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1944-1951.
- [14] SHIH C, PAN Z, MCHUGH T, et al. Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries [J]. Transactions of the ASAE, 2008, 51(1): 205.
- [15] 段隹. 海参微波—冻干联合干燥工艺与机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 26-44.
DUAN X. Study on microwave freeze drying combined drying process and mechanism of sea cucumber [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 26-44.
- [16] 吴小华, 马渊博, 宁旭丹, 等. 西洋参分段式热风干燥动力学模型构建[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 318-324.
WU X H, MA Y B, NING X D, et al. Construction of staged hot-air drying dynamic model for American ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 318-324.
- [17] 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.
WANG H Y, LIU D, YU H M. Drying characteristics and kinetic model of Chinese yam using microwave coupled with hot air[J]. Food Science, 2018, 39(15): 115-121.
- [18] 王浩, 张明, 王兆升, 等. 不同干燥方式对灰枣片感官及营养品质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(6): 102-107.
WANG H, ZHANG M, WANG Z S, et al. Effects of different drying methods on sensory and nutritional quality of jujube slices [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(6): 102-107.
- [19] 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.
QIAN J Y, ZHANG Q, WANG J, et al. Effects of three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 259-265.
- [20] 万江静, 郑霞, 高振江, 等. 红枣片远红外辐射干燥的干燥特性及Vc变化[J]. 食品工业科技, 2016, 36(8): 110-115.
WAN J J, ZHENG X, GAO Z J, et al. Drying characteristics and Vc changes of jujube slices dried by far infrared radiation[J]. Food Industry Science and Technology, 2016, 36(8): 110-115.
- [21] 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.
ZHANG W P, XIAO H W, GAO Z J, et al. Improving quality of Poria cocos using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 269-276.
- [22] 廉苗苗. 猕猴桃冻干—真空微波联合干燥及其益生菌浸渍干制品工艺优化[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020: 9-19.
LIAN M. Kiwifruit freeze-drying-vacuum microwave combined drying and its probiotic impregnated dry product process optimization [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020: 9-19.
- [23] 李湘利, 刘静, 王印壮, 等. 鸡枞菌热风—微波联合干燥特性及动力学模型[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 107-114.
LI X L, LIU J, WANG Y Z, et al. Characteristics and kinetics model of Termitomyces albuminosus using hot-air combined with microwave drying[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(21): 107-114.
- [24] 陈建福, 汪少芸, 林梅西. 白玉菇中短波红外干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1): 46-53.
CHEN J F, WANG S Y, LIN M X. Drying characteristics and kinetics model of white Hypsizyugus Marmoratus with medium and short wave infrared radiation [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(1): 46-53.
- [25] 戈晓康. 红枣热风干燥特性及品质试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 15-36.
GE X K. Experimental study on hot air drying characteristics and quality of red jujube[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 15-36.
- [26] 王雪媛, 高琨, 陈芹芹, 等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 275-292.
WANG X Y, GAO K, CHEN Q Q, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during mid short wave infrared drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 275-292.
- [27] 白冰玉, 傅鑫程, 丁胜华, 等. 切片厚度对苦瓜片热风干燥特性及相关品质的影响研究[J]. 农产品加工, 2019(9): 1-5.
BAI B Y, FU X C, DING S H, et al. Effect of slice thickness on hot air drying characteristics and related quality of Momordica charantia tablets[J]. Agricultural Products Processing, 2019(9): 1-5.
- [28] 徐庚, 马月虹, 王庆惠, 等. 芜菁干燥特性及收缩动力学模型研究[J]. 农机化研究, 2021(10): 142-149.
XU G, MA Y H, WANG Q H, et al. Study on drying characteristics and shrinkage dynamics modelling of turnip [J]. Agricultural Mechanization Research, 2021(10): 142-149.