

# 桑椹对流-红外联合干燥特性及品质变化研究

李兆路, 陈芹芹, 毕金峰, 吴昕焯, 段玉权, 司旭

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 本实验研究了不同对流干燥温度(60、70和80℃)和红外功率(675、1350和2025W)对桑椹对流-红外联合干燥特性和干燥产品品质的影响。结果表明:干燥温度对干燥速率影响较红外功率大;干燥过程属降速干燥,由费克第二定律求出桑椹有效水分扩散系数在 $2.67 \times 10^{-9} \sim 8.41 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内,并随对流干燥温度和红外功率的增大而增大;由阿伦尼乌斯公式计算出桑椹干燥活化能为53.99 kJ/mol;干燥实验数据拟合结果显示,桑椹的对流-红外联合干燥过程符合Page模型;且在对流温度70℃,红外功率675W干燥条件下物料品质最优。相比热风干燥与真空冷冻干燥,对流-红外联合干燥大大缩短了干燥时间,具有最高的总酚含量(30.33 mg/g)和较高的花色苷含量(11.55 mg/g),提高了产品的营养品质。该研究为对流-红外联合干燥技术应用于桑椹干燥提供了理论依据。

**关键词:** 桑椹; 联合干燥; 干燥特性; 品质变化

文章编号: 1673-9078(2015)1-166-172

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.1.030

## Effects of Combined Convective-infrared Radiation on Quality of Mulberries

LI Zhao-lu, CHEN Qin-qin, BI Jin-feng, WU Xin-ye, DUAN Yu-quan, SI Xu

(Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The effects of convective-infrared radiation on the product quality of dried mulberries at different convective drying temperatures (60, 70 and 80 °C) and infrared powers (675, 1350 and 2025 W) were investigated. The result showed that the convective drying temperature had a more significant impact on the drying rate. The drying process was a falling rate drying. The effective moisture diffusion coefficient of mulberries ranged from  $2.67 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  to  $8.41 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  according to Fick's Second Law, and it increased with increasing temperature and power. The drying activation energy of mulberry was 53.99 kJ/mol according to the Arrhenius equation. The experimental data regarding the combined convective-infrared radiation drying process of mulberries was fit according to the Page model. The best product quality was obtained under the conditions of 70 °C and 675 W. As compared with hot air drying and freeze drying, the convective-infrared radiation combination significantly shortened the drying time and improved the product quality, as indicated by the greatest total phenol content (30.33 mg/g) and greater anthocyanin content (11.55 mg/g). This study could serve as a theoretical foundation for convective-infrared radiation drying of mulberries.

**Key words:** mulberry; combination drying; drying characteristics; quality change

桑椹, 桑科植物桑(*Morus alba* L.)的穗状果实, 起源于非洲、亚洲、南美洲和北欧的亚热带地区, 在我国各地均有栽培。成熟桑椹, 富含人体必需氨基酸、维生素、矿物质、微量元素、黄酮类化合物等多种功能成分, 具有滋补肝肾, 养血祛风的药用价值。桑椹

收稿日期: 2014-06-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费资助(201303073); 新疆生产建设兵团科技支疆计划(2013AB020)资助

作者简介: 李兆路(1987-), 女, 硕士生, 研究方向食品科学

通讯作者: 段玉权(1972-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农产品加工及贮藏理论与技术研究

成熟于夏季, 上市时间集中, 水分含量极高, 易变质腐烂。干燥加工可以延长桑椹产品的货架期, 提高原料利用率, 且干燥产品易于运输和贮藏, 有效解决了桑椹采后损失严重的问题。

目前桑椹干燥以热风干燥为主, 且多侧重干燥特性的研究: Doymaz等<sup>[1]</sup>于2004年研究了白桑椹热风干燥动力学, 发现拟合度最高的干燥模型是Logarithmic模型, 有效水分扩散系数范围为 $2.23 \times 10^{-10} \sim 6.90 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。之后, Doymaz<sup>[2]</sup>又研究了预处理对桑椹太阳能干燥特性的影响, 结果表明用乙酸乙酯处理过的桑椹更容易干燥, 其干燥过程模型更

接近于 Exponential 模型,有效水分扩散系数为  $4.69 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,而未经处理的桑椹有效水分扩散系数为  $4.26 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 。Chottamom 等<sup>[3]</sup>,进一步研究发现桑椹渗透脱水后再进行热风干燥品质更好,也更有利于干燥,干燥模型为 Page 模型。Adabi 等<sup>[4]</sup>研究了热风干燥、红外干燥、真空干燥和热风-红外联合干燥四种干燥方式下桑椹的干燥动力学,研究发现桑椹干燥过程与 Page 模型拟合度最高。但是,目前关于桑椹干燥产品品质,尤其是先进的干燥方式对于桑椹干燥产品品质影响的研究较少。

对流-红外联合干燥技术结合了对流干燥与红外线干燥两种干燥方式的优点。在干燥过程中红外线辐射间断性供给,在苏缓阶段为纯对流干燥,这样既能利用红外线辐射提高干燥效率,又有对流冷却阶段使得产品的温度不会太高,从而避免热力退化问题的产生。而且,在对物料干燥的同时,红外线也具有杀菌功效,已应用于一些果蔬的干燥加工中。本研究全面研究了桑椹的对流-红外联合干燥曲线、有效水分扩散系数、干燥活化能,考察不同的干燥温度和功率对桑椹对流-红外联合干燥特性和干燥品质的影响;并对干燥曲线进行拟合,构建桑椹对流-红外联合干燥模型,以期为其工业应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

鲜桑椹:采摘自北京市大兴区安定镇古林御桑园,液氮速冻后贮藏于-40℃深冻冰箱中,待用。

### 1.2 主要设备与仪器

STC 对流-红外联合干燥设备,泰州圣泰科红外科技有限公司。

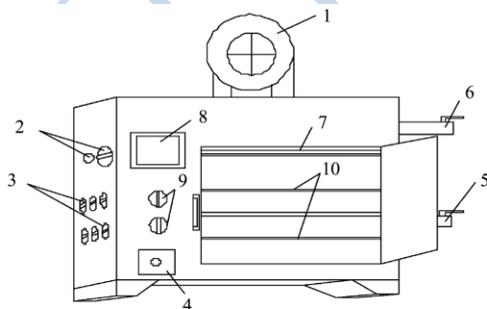


图1 对流-红外联合干燥箱示意图

Fig.1 Schematic diagram of connective-infrared combination dryer

注: 1.风机; 2.电源控制开关; 3.红外灯管开关; 4.风速调节按钮; 5.进风口; 6.出风口; 7.红外灯管; 8.触摸控制屏; 9.

触摸屏及风机开关; 10.载物板。

该设备示意图,见图1。载料板面积为  $0.26 \text{ m} \times 0.35 \text{ m}$ ,其中功率为 450 W 和功率为 225 W 的红外灯管各 3 只,不同波长的灯管平行且相互交替放置。载料板距红外灯管有 10, 14, 18 cm 三个距离段。在本实验中,固定物料与红外灯管的距离为 14 cm。

### 1.3 试验方法

桑椹室温解冻后,单层(直径为 15 mm)均匀摆放在细金属丝网托盘中。在 2.1 m/s 的风速和 1350 W 红外功率下,采用不同的干燥温度(60、70、80℃)进行干燥试验,每隔 30 min 测定样品质量指标,直至样品重量(精确至 0.01 g)不再变化为止;同样的,在 2.1 m/s 的风速和 70℃干燥温度下,采用不同的红外功率(675、1350 和 2025 W)进行干燥试验,每组试验设 3 个平行,作图时取其平均值。

### 1.4 干燥曲线和干燥速率曲线的数学计算方法

#### 1.4.1 水分比

水分比(moisture ratio, MR)计算公式,见式(1):

$$MR = \frac{M_t - M_f}{M_i - M_f} \quad (1)$$

此处,  $M_i$ 、 $M_f$  和  $M_t$  分别为桑椹初始干基含水率(g/g)、桑椹干燥平衡时干基含水率和桑椹在干燥 t 时刻的干基含水率。式中,由于  $M_f$  远小于  $M_i$  和  $M_t$ ,故公式(1)可简化为公式(2):

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (2)$$

#### 1.4.2 干燥速率

干燥速率(drying rate, DR)用来表示物料脱水速率的快慢。其计算公式如式(3)所示:

$$DR = \frac{M_1 - M_2}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中:  $M_1$  和  $M_2$  为干燥过程中为  $t_1$  和  $t_2$  时桑椹的干基含水率。

### 1.5 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数( $D_{\text{eff}}$ )是物料的重要传质特性,它表示了物料在干燥过程中水分扩散能力或程度,对计算和模拟干燥过程至关重要。果蔬的降速干燥期干燥特性可用菲克第二扩散方程来描述。据菲克方程,可用干燥中  $\ln MR$  对时间的直线方程(4)来描述物料有效水分扩散系数,如下式:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \quad (4)$$

(4)式中, t为干燥时间(s); L为物料厚度(m)。

利用斜率法计算有效扩散系数。由式(4)可知, lnMR对时间的图为直线, 直线斜率为式(5):

$$slope = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} \quad (5)$$

### 1.6 干燥活化能

干燥活化能表示干燥过程中除去单位摩尔的水分所需要的能量, 活化能越大越难干燥。由于物料的水分有效扩散系数和干燥温度的关系可以用阿伦尼乌斯公式(Arrhenius equation)表示为:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right] \quad (6)$$

式中: D<sub>0</sub>是物料中的扩散基数, 为定值, m<sup>2</sup>/s; E<sub>a</sub>是物料的干燥活化能, kJ/mol; R是气体摩尔常数, 其值为 8.314 J/(mol k); T是物料的干燥温度, °C。

对公式(6)两边取自然对数得:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{(T+273.15)} \quad (7)$$

由公式(7)可知有效水分扩散系数的自然对数 lnD<sub>eff</sub>与 1/(T+273.15)成线性关系, 斜率为 -E<sub>a</sub>/R。由于 lnD<sub>eff</sub>与 1/(T+273.15)均已知, 因此可通过斜率求得 E<sub>a</sub>值。

### 1.7 数学模型

表1 干燥数学模型

Table 1 Mathematical models for drying

| 序号 | 模型名称                 | 模型方程  |
|----|----------------------|---|
| 1  | Page                 | MR=exp(-kt <sup>n</sup> )                             |
| 2  | Modified page        | MR=exp(-kt) <sup>n</sup>                              |
| 3  | Henderson and Pebis  | MR=aexp(-kt)  |
| 4  | Logarithmic          | MR= aexp(-kt)+c                                       |
| 5  | Two-term             | MR= aexp(-kt <sub>1</sub> ) + bexp(-k <sub>2</sub> t) |
| 6  | Two-term exponential | MR= aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat)                          |

注: 表中模型引自参考文献<sup>[1-6]</sup>。

经文献查阅, 选用表1中较常用的6个经典模型方程, 对干燥实验中的数据进行拟合。决定系数(R<sup>2</sup>)的大小表明试验值和预测值之间的相关性, 是筛选干燥模型方程的一个首要因素, 除决定系数以外卡方值(χ<sup>2</sup>)和误差平方和(SSE)也可用于描述拟合程度。在最适干燥模型筛选中, R<sup>2</sup>越接近于1, χ<sup>2</sup>和SSE值越小说明拟合结果越好。这些统计参量依据方程(8)~(10)计算:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (9)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (10)$$

(8)~(10)式中, MR<sub>exp,i</sub>表示第i个取样点测得的干基水分含量; MR<sub>pre,i</sub>表示第i个预测点的干基水分含量; N是取样次数; n为模型常数个数。

### 1.8 理化指标测定方法

#### 1.8.1 色泽

干燥产品的色泽利用 HunterLab-D25LT 色差仪测量。其中 L 值为明度指数; a 值为红绿指数; b 值为黄蓝指数; ΔE 值为色差; 干燥产品的ΔE 值越小说明干燥产品色泽品质越好。ΔE 计算公式如式(11)所示:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (11)$$

式中: L<sub>0</sub>、a<sub>0</sub>、b<sub>0</sub>为桑椹鲜果的色泽测定值; L、a、b为干制样品的色泽测定值。

#### 1.8.2 花色苷保留量

精确称取 1 g 桑椹粉置于 25 mL 试管中, 用 20 mL 体积分数为 80% 酸化的乙醇常温下提取 24 h, 用水溶液定容于 50 mL 容量瓶中至刻度, 将上清液过 0.45 μm 滤膜, 所得滤液为待测液, 采用 pH 示差分光光度法测定待测液中花色苷含量, 具体测定步骤与计算方法参照 Kara 等<sup>[7]</sup>人的 pH 示差分光光度测定法。

#### 1.8.3 总酚含量

总酚的测定采用福林酚法。精确称取果粉 1 g, 用 15 mL 70% 乙醇移入 25 mL 试管中。超声提取 10 min, 于 100 mL 容量瓶中定容后抽滤, 所得滤液即为待测液。取 0.1 mL 待测液, 加入 1 mL 10% (V/V) Folin-Ciocalteu 显色剂, 放置 6 min, 加入 2 mL 20% 碳酸钠溶液, 定容至 10 mL, 30 °C 放置 60 min, 并于 765 nm 波长下测定其吸光度。每个浓度做三次平行, 取平均值。标准曲线的制作中, 没食子酸标液的浓度为 50 μg/mL, 制作方法同测定方法, 结果以 μgGAE 没食子酸/g 干基样品计算。

#### 1.8.4 复水比(rehydration ratio, RR)

称取干燥的桑椹样品,放入盛有 80 mL 蒸馏水的烧杯中,于 70 °C 恒温水浴锅中保温 10 min,取出沥干,用吸水纸除去表面水分,称重。计算公式如下所示:

$$RR = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (12)$$

式中,  $M_1$  为复水前质量(g);  $M_2$  为复水后质量(g)。

### 1.8.5 硬度和脆度

用 TA-XT2i/50 型物性仪测定,测定操作重复 10 次,分析后取平均值。

测量过程中,测定模式设为下压过程测量力;探头型号选用 P50;下压距离为 5 mm;测试前探头速度为 1 mm/s;测试中速度为 0.1 mm/s;测试后速度为 1 mm/s。由仪器计算机自动输出应力随时间变化曲线。产品脆度通过测试中脆裂峰数的个数来表示,单位为“个”。峰的个数越多,产品脆度越好。硬度以样品断裂所需要的最大力来表示,单位为“N”。硬度值越大,被测物体的硬度越大。

### 1.9 统计分析

干燥试验数据录入 EXCEL2007 进行计算;利用 origin8.0 软件进行干燥数学模型的拟合及图形绘制;采用 SPSS19.0 分析软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同对流干燥温度和功率下桑椹干燥特性

不同对流干燥温度和功率下桑椹的干燥曲线和干燥速率曲线分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 可以看出随着干燥温度的升高,干燥时间显著缩短 ( $P < 0.05$ )。在风速与功率恒定,对流干燥温度 60、70、80 °C 条件下,桑椹干燥完成的时间分别为 10、6、和 4 h。桑椹在 80 °C 条件下比其在 60 °C 条件下缩短了 60% 的干燥时间。

由图 3 可以看出,功率恒定,随温度的升高干燥速率显著增大 ( $P < 0.05$ ),造成这一试验现象的原因可能有:(1)较高的对流温度使物料的水分有效扩散系数增大;(2)高温下红外线辐射时间加长,苏缓阶段纯对流的时间减少,干燥效率升高,干燥速度加快。从图 3 还可以看出,在干燥初期,干燥速率随着红外功率的增大而显著递减 ( $P < 0.05$ )。这可能是因为,在较小的功率下维持恒定的对流温度时,红外灯管发射红外线的时间较长,物料在较长时间的红外线干燥

下,干燥速率相应加快。而在干燥后期当物料干燥到一定程度,表层出现干斑不利于红外线的穿透作用,红外功率对干燥过程影响不再显著。

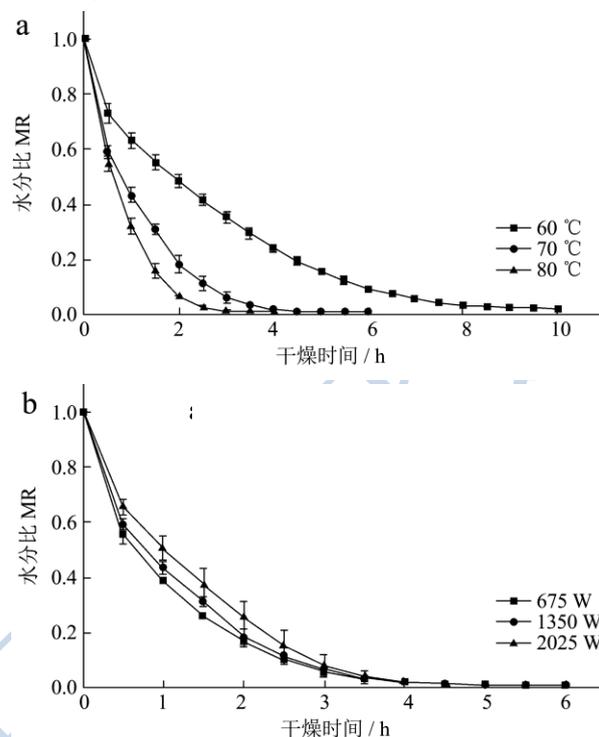


图 2 不同对流干燥温度(a)和红外功率(b)下的桑椹对流-红外联合干燥曲线

Fig.2 Convective-infrared radiation combination drying curves of mulberry under different convective drying temperatures (a) and infrared powers (b)

### 2.2 不同干燥温度和功率下桑椹的有效水分扩散系数

表 2 不同干燥条件桑椹的有效扩散系数

Table 2 Effective diffusivity coefficients obtained for mulberries under different drying conditions

| 干燥条件       | 线性回归公式                                     | R <sup>2</sup> | D <sub>eff</sub> (×10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s) |
|------------|--|----------------|--|
| 60°C,1350W | ln MR = -1.17 × 10 <sup>-4</sup> t - 0.098 | 0.983          | 2.67   |
| 70°C,1350W | ln MR = -2.53 × 10 <sup>-4</sup> t - 0.119 | 0.982          | 5.77   |
| 80°C,1350W | ln MR = -3.69 × 10 <sup>-4</sup> t - 0.12  | 0.983          | 8.41   |
| 70°C,650W  | ln MR = -2.32 × 10 <sup>-4</sup> t - 0.122 | 0.988          | 5.29   |
| 70°C,2025W | ln MR = -2.48 × 10 <sup>-4</sup> t - 0.183 | 0.973          | 5.66   |

表 2 列出了不同试验条件下桑椹对流-红外联合干燥有效水分扩散系数。由表 2 可知,干燥温度对有效水分扩散系数影响显著,随着对流干燥温度的升高,样品有效水分扩散系数由 60 °C 时的 2.67 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s 升至 70 °C 时的 5.77 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s,最后在 80 °C 时达到最大

值  $8.41 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$ 。说明, 升温对桑椹的有效水分扩散系数的提高有显著影响。因此, 生产上在保证品质的基础上, 可通过提高生产温度来提高生产效率。而随干燥功率的升高, 样品有效水分扩散系数的变化较温度小: 在红外功率为 675 W 时最低, 为  $5.29 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$ ; 2025 W 时次之, 为  $5.66 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$ ; 在红外功率为 1350 W 时具有最高值  $5.77 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$ 。桑椹对流-红外联合干燥的有效水分扩散系数远大于热风干燥有效水分扩散系数  $4.69 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  [21]。这说明在对流-红外联合干燥过程中, 穿透能力较强的红外线辐射可能使物料内部传质的方向变为由内而外, 有效水分扩散系数增大, 桑椹脱水速率也较纯对流干燥快。

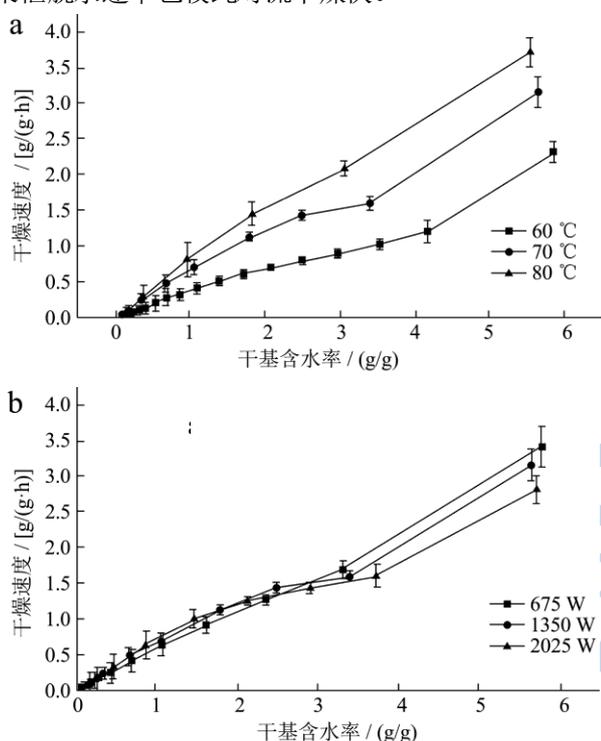


图3 不同对流干燥温度(a)与干燥功率(b)下的桑椹对流-红外联合干燥速率曲线

Fig.3 Convective-infrared radiation combination drying rate curves of mulberries under different connective drying temperatures (a) and infrared powers (b)

### 2.3 桑椹对流-红外联合干燥活化能

桑椹对流-红外联合干燥中干燥温度(红外功率固定为 1350 w)和水分有效扩散系数的关系如图4所示。由图中的直线回归方程的斜率值和式(7)可以求出桑椹的干燥活化能  $E_a$  为 53.99 kJ/mol。通过文献查阅可知, 桑椹对流-红外联合干燥的活化能高于山楂 (27.90 kJ/mol) [8]和苹果片 (36.58 kJ/mol) [9], 低于红枣 (54.51 kJ/mol) [10]、葡萄 (67.29 kJ/mol) [11]和南瓜片 (78.93 kJ/mol) [12]等。

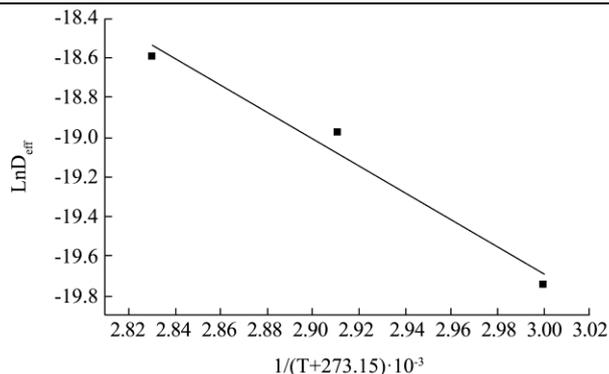


图4 对流-红外联合干燥温度与水分有效扩散系数的关系曲线  
Fig.4 Correlation curves of convective-infrared radiation combination drying temperatures and effective diffusion coefficients of moisture

注: T为干燥温度, °C;  $R^2$ 为相关系数;  $D_{eff}$ 为水分有效扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

### 2.4 干燥动力学模型的拟合

表3 不同对流-红外联合干燥条件下桑椹干燥模型  $\chi^2$ 、 $R^2$ 和SSE值

| 模型名称                | 干燥条件          | $R^2$   | $\chi^2$              | SSE                   |
|---------------------|---------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| Page                | 60 °C (1350W) | 0.99537 | $3.92 \times 10^{-4}$ | 0.00744               |
|                     | 70 °C (1350W) | 0.99712 | $2.89 \times 10^{-4}$ | 0.00318               |
|                     | 80 °C (1350W) | 0.99882 | $1.41 \times 10^{-4}$ | $9.86 \times 10^{-4}$ |
|                     | 650W(70 °C)   | 0.99791 | $1.82 \times 10^{-4}$ | 0.002                 |
|                     | 2025W(70 °C)  | 0.99141 | $8.49 \times 10^{-4}$ | 0.00934               |
| Modified page       | 60 °C (1350W) | 0.99463 | $4.54 \times 10^{-4}$ | 0.00864               |
|                     | 70 °C (1350W) | 0.99387 | $6.13 \times 10^{-4}$ | 0.00675               |
|                     | 80 °C (1350W) | 0.99428 | $6.81 \times 10^{-4}$ | 0.00477               |
|                     | 650W(70 °C)   | 0.99792 | $1.82 \times 10^{-4}$ | 0.002                 |
|                     | 2025W(70 °C)  | 0.99137 | $8.49 \times 10^{-4}$ | 0.00934               |
| Henderson and Pebis | 60 °C (1350W) | 0.99464 | $4.54 \times 10^{-4}$ | 0.00863               |
|                     | 70 °C (1350W) | 0.9942  | $5.80 \times 10^{-4}$ | 0.00638               |
|                     | 80 °C (1350W) | 0.99467 | $6.35 \times 10^{-4}$ | 0.00445               |
|                     | 650W(70 °C)   | 0.99591 | $3.55 \times 10^{-4}$ | 0.0039                |
|                     | 2025W(70 °C)  | 0.9905  | $9.37 \times 10^{-4}$ | 0.0103                |
| Logarithmic         | 60 °C (1350W) | 0.99675 | $2.76 \times 10^{-4}$ | 0.00496               |
|                     | 70 °C (1350W) | 0.99552 | $4.48 \times 10^{-4}$ | 0.00448               |
|                     | 80 °C (1350W) | 0.99591 | $4.88 \times 10^{-4}$ | 0.00292               |
|                     | 650W(70 °C)   | 0.99568 | $3.77 \times 10^{-4}$ | 0.00377               |
|                     | 2025W(70 °C)  | 0.99299 | $6.90 \times 10^{-4}$ | 0.0069                |
| Two-term            | 60 °C (1350W) | 0.99401 | $5.08 \times 10^{-4}$ | 0.00863               |
|                     | 70 °C (1350W) | 0.99292 | $7.09 \times 10^{-4}$ | 0.00638               |

转下页

接上页

|                      |            |         |                       |                       |
|----------------------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
|                      | 80℃(1350W) | 0.99253 | 8.89×10 <sup>-4</sup> | 0.00445               |
|                      | 650W(70℃)  | 0.99888 | 9.80×10 <sup>-4</sup> | 8.21×10 <sup>-4</sup> |
|                      | 2025W(70℃) | 0.98836 | 6.00×10 <sup>-4</sup> | 0.01031               |
|                      | 60℃(1350W) | 0.99593 | 3.45×10 <sup>-4</sup> | 0.00655               |
|                      | 70℃(1350W) | 0.99729 | 2.71×10 <sup>-4</sup> | 0.00298               |
| Two-term exponential | 80℃(1350W) | 0.9826  | 0.0014                | 0.00979               |
|                      | 650W(70℃)  | 0.99899 | 8.82×10 <sup>-4</sup> | 8.21×10 <sup>-4</sup> |
|                      | 2025W(70℃) | 0.99142 | 8.45×10 <sup>-4</sup> | 0.00845               |

本研究干燥过程的拟合结果如表 3 所示。由表 3 可知：所用 6 个数学模型中 R<sup>2</sup> 均在可接受的 0.9800 以上，其中 Page 模型的 R<sup>2</sup> 均值最高 (0.99613)，χ<sup>2</sup> 和 SEE 的均值最小 (3.706×10<sup>-4</sup>, 0.00549)，说明 Page 模型拟合程度最好，这与 Chottamom<sup>[5]</sup>和 Adabi 等<sup>[6]</sup> 研究结果相同。此外，Two Term 模型也与实验干燥数据具有较高的拟合度。

## 2.5 对流-红外联合干燥对桑椹干燥产品品质的影响

### 2.5.1 对流-红外联合干燥对流温度对桑椹干燥产品品质的影响

表 4 对流干燥温度对桑椹干燥产品品质的影响

Table 4 The effects of drying temperature on the quality of dehydrated mulberries

| 干燥温度/℃ | 花色苷保留量/(mg/g)           | ΔE                      | 复水比                      | 硬度(N)                       |
|--------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 60     | 9.70±0.014 <sup>a</sup> | 3.70±0.064 <sup>b</sup> | 0.86±0.045 <sup>b</sup>  | 11772.29±45.13 <sup>a</sup> |
| 70     | 8.75±0.012 <sup>b</sup> | 3.78±0.048 <sup>b</sup> | 1.11±0.136 <sup>a</sup>  | 9085.43±530.02 <sup>b</sup> |
| 80     | 6.05±0.06 <sup>c</sup>  | 4.01±0.048 <sup>a</sup> | 1.341±0.145 <sup>a</sup> | 6736.03±502.35 <sup>c</sup> |

注：同列数据中不同字母代表同一干燥条件下差异显著 (P < 0.05)，下同。

在红外功率恒定 (1350 W)，对流温度变化的条件下，由表 4 结果可知，桑椹花色苷保留量随对流干燥温度的升高而减少，ΔE 值随干燥温度的升高而增大。这可能是因为随温度的升高，热敏物质花色苷发生了降解，其降解导致桑椹干燥产品表面色泽呈现出

表 6 不同干燥方式对桑椹干燥产品品质的影响

Table 6 The effects of different drying methods on the quality of dehydrated mulberries

| 干燥方式      | 花色苷保留量/(mg/g)           | ΔE                     | 复水比                     | 总酚/(mg/g)               | 硬度(N)                         | 脆度                     | 干燥时间/h               |
|-----------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------|
| 热风干燥      | 3.77±0.02 <sup>c</sup>  | 3.9±0.04 <sup>b</sup>  | 0.84±0.002 <sup>c</sup> | 22.17±0.17 <sup>c</sup> | 14081.28±4362.63 <sup>a</sup> | 15.4±3.13 <sup>b</sup> | 9±0.00 <sup>b</sup>  |
| 对流-红外联合干燥 | 11.55±0.26 <sup>b</sup> | 3.78±0.05 <sup>c</sup> | 1.11±0.14 <sup>b</sup>  | 30.33±0.33 <sup>a</sup> | 8290.43±639.52 <sup>b</sup>   | 19.6±2.70 <sup>a</sup> | 6±0.00 <sup>c</sup>  |
| 真空冷冻干燥    | 18.88±0.35 <sup>a</sup> | 5.22±0.02 <sup>a</sup> | 1.58±0.05 <sup>a</sup>  | 27.66±0.17 <sup>b</sup> | 1833.22±647.36 <sup>c</sup>   | 3.2±1.30 <sup>c</sup>  | 48±0.00 <sup>a</sup> |

此处，三种干燥方式产品的含水率均为干基含水率 7% 左右。热风选择温度为 70℃，风速 2.5 m/s；红

外干燥选择最优条件干燥温度 70℃和红外功率 675 W；真空冷冻干燥真空度为 0.01 mbar，冷阱温度为

黄褐色，同时，高温下桑椹中的还原糖与游离氨基酸可能发生了美拉德反应<sup>[13]</sup>，促使干燥产品 ΔE 值增大。表 4 的结果显示，干燥产品的复水比随温度的升高而增大，硬度则反之。这是因为随着干燥温度的升高，桑椹的水分有效扩散系数从 2.67×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s 升至 8.41×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s，干燥速率也增大，干燥产品孔隙增多<sup>[14]</sup>，复水比增大，硬度也降低。但在干燥温度为 60℃时，干燥时间过长，产品硬度过大；而 80℃时，物料又会发生局部焦糊现象；干燥温度为 70℃时，物料干燥时间较短，品质较好。因此，综合考虑，桑椹的对流-红外联合干燥温度宜选择 70℃。

### 2.5.2 对流-红外联合干燥红外功率对桑椹干燥产品品质的影响

表 5 红外功率对桑椹干燥产品品质的影响

Table 5 The effects of infrared power on the quality of dehydrated mulberries

| 红外功率/W | 花色苷保留量/(mg/g)           | ΔE                      | 复水比                     | 硬度(N)                       |
|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 675    | 9.34±0.298 <sup>a</sup> | 3.71±0.064 <sup>b</sup> | 0.90±0.045 <sup>b</sup> | 8843.18±45.13 <sup>a</sup>  |
| 1350   | 8.75±0.012 <sup>b</sup> | 3.78±0.048 <sup>a</sup> | 1.11±0.136 <sup>a</sup> | 9085.43±530.02 <sup>a</sup> |
| 2025   | 8.78±0.121 <sup>b</sup> | 3.77±0.048 <sup>a</sup> | 1.17±0.145 <sup>a</sup> | 8620.40±402.35 <sup>a</sup> |

在温度恒定为 70℃时，不同红外功率下，干燥产品品质对比如表 5 所示。由表 5 可知，桑椹花色苷保留量随红外功率的升高而减少，ΔE 值随红外功率的升高而增大。这可能是因为随红外功率的增大，干燥时物料表皮的热流密度增大，在过高的功率下甚至会发生焦糊，桑椹花色苷也发生降解<sup>[13]</sup>，干燥产品色泽劣变，ΔE 值增大。表 5 的实验结果还显示，干燥产品复水比随红外功率的升高而增大，硬度则无显著性变化。与升温的效果不同，随着红外功率的升高，桑椹干燥速率并无规律性变化，在红外功率 1350 和 2025 W 条件下，物料水分有效扩散系数增大，干燥产品孔隙增多，复水比略有上升，但物料表层易焦糊。当红外功率为 675 W 时，干燥产品色泽优良，营养物质保留量高，因此干燥功率宜选择 675 W。

## 2.6 不同干燥方式下桑椹干燥产品品质对比

外干燥选择最优条件干燥温度 70℃和红外功率 675 W；真空冷冻干燥真空度为 0.01 mbar，冷阱温度为

-55 ℃。由表 6 中的实验结果可以看出, 桑椹真空冷冻干燥产品营养品质较优, 具有最高的花色苷保留量 (18.88 mg/g) 和较高的总酚含量 (27.66 mg/g), 但产品硬度 (1833.22 N) 和脆度 (3.2) 较低, 口感较差, 且干燥时间过长 (48 h); 对流-红外联合干燥产品综合品质最佳, 有最高的总酚含量 (30.33 mg/g), 较高的花色苷保留量 (11.55 mg/g), 最低的色差值(3.78), 最高的脆度值 (19.6) 和最短的干燥时间 (6 h); 而热风干燥产品综合品质为三者中最差。在对流-红外联合干燥过程中, 红外具有一定的穿透能力, 可以在很短的时间内使物料均匀受热, 增加物料的有效水分扩散系数, 并且红外线具有一定的杀菌灭酶能力, 可以使物料多酚类物质更好的保留, 故对流-红外联合干燥, 既缩短了干燥时间, 又使干燥产品具有较好的品质。

### 3 结论

3.1 在桑椹的对流-红外联合干燥过程中, 对流干燥温度对干燥速率的影响比红外功率更为突出。且随着对流干燥温度和红外功率升高而干燥时间缩短, 干燥速率增大。

3.2 桑椹的对流-红外联合干燥属于降速干燥, 其水分有效扩散系数随着对流干燥温度和干燥功率的升高而升高, 其范围是  $2.67 \times 10^{-9} \sim 8.41 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。桑椹的对流-红外联合干燥活化能是 53.99 kJ/mol, 最适干燥模型为 Page 模型。

3.3 在干燥温度 70 ℃, 红外功率为 675 W 的条件下, 桑椹干燥产品的理化品质最好。且与其他干燥方式相比对流-红外干燥时间短, 综合品质更佳。

### 参考文献

- [1] Doymaz I. Drying kinetics of white mulberry [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 341-346
- [2] Doymaz I. Pretreatment effect on sun drying of mulberry fruits (*Morus Alba L.*) [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(2): 205-209
- [3] Chottamom P, Kongmanee R, Manklang C, et al. Effect of osmotic treatment on drying kinetics and antioxidant properties of dried mulberry [J]. Drying Technology, 2012, 30(1): 80-87
- [4] Adabi M E, Nikbakht A M, Motevali A, et al. Investigation of black mulberry drying kinetics applying different pretreatments [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 15(1): 23-34
- [5] Shi Q, Zheng Y, Zhao Y. Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 71: 208-216
- [6] 李文峰,肖旭霖,王玮.紫薯气体射流冲击干燥效率及干燥模型的建立[J].中国农业科学,2013,46(2):356-366  
LI Wen-feng, XIAO Xu-lin, WANG wei. Drying characteristics and model of purple sweet potato in air-impingement jet dryer [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2): 356-366
- [7] Fazaeli M, Yousefi S, Emam-Djomeh Z. Investigation on the effects of microwave and conventional heating methods on the phytochemicals of pomegranate (*Punica granatum L.*) and black mulberry juices [J]. Food Research International, 2013, 50(2): 568-573
- [8] Amiri Chayjan R, Kaveh M, Khayati S. Modeling drying characteristics of hawthorn fruit under microwave-convective conditions [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014. DOI: 10.1111/jfpp.12226
- [9] 巨浩羽,肖红伟,白竣文,等.苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J].农业机械学报,2013,44(z2):186-191  
JU Hao-yu, XIAO Hong-wei, BAI Jun-wen, et al. Medium and short wave infrared drying characteristics and color changing of apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(z2): 186-191
- [10] Fang S, Wang Z, Hu X. Hot air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba Miller*): thin-layer mathematical modeling [J]. International Journal of Food science and Technology, 2009, 44(9): 1818-1824
- [11] Xiao H W, Pang C L, Wang L H, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 233-240
- [12] Doymaz İ. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 243-248
- [13] Jorge A, Almeida D M, Canteri M H G, et al. Evaluation of the chemical composition and colour in long-life tomatoes (*Lycopersicon esculentum Mill*) dehydrated by combined drying methods [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, DOI: 10.1111/ijfs.12501
- [14] Thuwapanichayanan R, Prachayawarakorn S, Kunwisawa J, et al. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(6): 1502-1510