

## 云南移依热风干燥动力学模型及品质变化

王安娜<sup>1</sup>, 彭小伟<sup>1</sup>, 胡艳<sup>1</sup>, 阚欢<sup>1</sup>, 王大玮<sup>2</sup>, 邱旭<sup>3\*</sup>, 刘云<sup>1,3\*</sup>

1. 西南林业大学生命科学学院, 云南昆明 650224; 2. 西南林业大学林学院, 云南昆明 650224; 3. 云南省高校大健康类森林资源开发利用工程研究中心, 云南昆明 650224

**摘要:** 为明确云南移依热风干燥特性及适宜的干燥温度, 实现其在热风干燥过程中的质量控制。以云南移依为研究对象, 探究不同温度(40、60、80、100 °C)下云南移依的干燥特性并建立动力学模型, 同时以色泽、复水比、活性成分(多酚、黄酮、多糖)含量和抗氧化能力为指标, 综合评价不同干燥温度对云南移依品质的影响。结果表明: 云南移依干燥过程中水分比曲线呈指数衰减, 干燥速率曲线分为加速、恒速及降速3个阶段, 随着干燥温度升高, 云南移依水分扩散加剧, 干燥速率明显增大, 有效水分扩散系数( $D_{\text{eff}}$ )为  $0.61 \times 10^{-6} \sim 1.78 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , 活化能( $E_a$ )为 17.64 kJ/mol; 通过数据分析发现 Page 模型拟合度较好, 决定系数( $R^2$ )均在 0.98 以上, 卡方( $X^2$ )、误差平方和( $SSE$ )分别在  $0.149 \times 10^{-3} \sim 0.548 \times 10^{-3}$ 、 $0.184 \times 10^{-2} \sim 0.493 \times 10^{-2}$  范围内, 能够较好地反映热风干燥过程中云南移依水分比随干燥温度的变化规律。不同干燥温度下云南移依的品质表现出一定的差异, 60 °C 能够最大程度地保持移依的色泽, 40 °C 有较好的复水性, 60 °C 时总酚、总黄酮、总多糖含量最高且抗氧化能力较好。干燥后的品质分析结果表明, 温度对云南移依的品质有较显著影响, 60 °C 对其色泽的保持及活性物质的保留较好。品质相关性分析表明, 云南移依的色泽、复水比、活性物质含量及抗氧化能力之间存在一定的相关性, 其中活性物质含量与总色差值( $\Delta E$ )呈负相关, 与复水比及抗氧化能力呈正相关, 同时也证实了云南移依的抗氧化能力是多种活性物质共同作用的结果。综上所述, 云南移依的最佳热风干燥温度为 60 °C, 在此温度下干燥的云南移依品质较为突出, 研究结果为云南移依的进一步开发利用奠定基础。

**关键词:** 云南移依; 热风干燥; 干燥动力学; 品质分析

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A

## Kinetic Model and Quality Change in Hot Air Drying of *Docynia delavayi* (Franch.) Schneid.

WANG Anna<sup>1</sup>, PENG Xiaowei<sup>1</sup>, HU Yan<sup>1</sup>, KAN Huan<sup>1</sup>, WANG Dawei<sup>2</sup>, QIU Xu<sup>3\*</sup>, LIU Yun<sup>1,3\*</sup>

1. College of Life Sciences, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 3. Forest Resources Exploitation and Utilization Engineering Research Center for Grand Health of Yunnan Provincial Universities, Kunming, Yunnan 650224, China

**Abstract:** The drying characteristics of *Docynia delavayi* at different temperatures (40, 60, 80 and 100 °C) were investigated and a kinetic model was established to clarify the hot air drying characteristics and appropriate drying temperature for *D. delavayi* and to achieve its quality control in the hot air drying process. The effect of different drying temperatures on the dried product quality in terms of color, rehydration ratio (RR), the contents of active ingredients (polyphenols, flavonoids, polysaccharides) and antioxidant capacities were evaluated. The moisture ratio curve of *D. delavayi* decayed exponentially during the drying process, and the drying rate curve was divided into three stages, acceleration, constant rate and decreasing rate. With the increase of drying temperature, the moisture diffusion of *D. delavayi* intensified, and the drying rate increased obviously, the effective diffusion coefficient of water ( $D_{\text{eff}}$ ) and activation energy ( $E_a$ ) was  $0.61 \times 10^{-6} \sim 1.78 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  and 17.64 kJ/mol, respectively. The data analysis revealed that the Page model fitted well,

收稿日期 2022-07-05; 修回日期 2022-08-20

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32060350); 云南省万人计划青年拔尖人才专项 (No. YNWR-QNBJ-2020-23)。

作者简介 王安娜 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农林食品开发利用。\*通信作者 (Corresponding author): 邱旭 (QIU Xu), E-mail: 29928979@qq.com; 刘云 (LIU Yun), E-mail: liuyun0402001@163.com。

with the coefficient of determination ( $R^2$ ) all above 0.98, and  $X^2$ , SSE in the range of  $0.149 \times 10^{-3}$ – $0.548 \times 10^{-3}$  and  $0.184 \times 10^{-2}$ – $0.493 \times 10^{-2}$ , respectively, which could better reflect the variation pattern of *D. delavayi* according to moisture ratio with drying temperature during the hot air drying process. The quality of the *D. delavayi* exhibited some differences under different drying temperatures. *D. delavayi* dried at 40 °C had good rehydration that at 60 °C could maintain the maximum color, and possess the highest total polyphenols, total flavonoids, total polysaccharides content and better antioxidant capacities. The results of the post-drying quality analysis showed that temperature had a significant effect on the quality of *D. delavayi*, and 60 °C was better for the retention of color and active substances content. Correlation analysis showed that there was a correlation between color, rehydration ratio (RR), active substances content and antioxidant capacities of *D. delavayi*, while the active substances content was negatively correlated with the total color difference value ( $\Delta E$ ) and positively correlated with the rehydration ratio (RR) and antioxidant capacities. In addition, it also confirmed that the antioxidant capacities of *D. delavayi* were the combined effect results of multiple active substances. In conclusion, the quality of *D. delavayi* dried at the optimal temperature of 60 °C was more outstanding. The present study would provide an experimental basis for the further development and utilization of *D. delavayi*.

**Keywords:** *Docynia delavayi*; hot air drying; drying kinetic; quality analysis

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.06.019

云南柃依 [*Docynia delavayi* (Franch.) Schneid.] 为蔷薇科 (Rosaceae) 柃依属 (*Docynia*) 植物, 其资源丰富<sup>[1]</sup>, 具有药食两用的特性, 在云南一带极为常见, 当地人经常用其果替代山楂来食用, 果实富含多酚、黄酮、多糖等多种活性成分<sup>[2]</sup>, 具有抗氧化、抗炎、降低心血管疾病等功效<sup>[3-5]</sup>。

目前, 云南柃依的研究集中于活性物质<sup>[4-6]</sup>及产品开发等方面, 主要产品有果醋、果酒、果汁、果脯等<sup>[7-10]</sup>。然而, 新鲜云南柃依在储存运输过程中会发生物理损坏、营养流失及腐败变质等情况, 导致其品质下降, 成本也随之增加。干燥是食品保存的方法之一<sup>[11]</sup>, 主要通过使材料脱水, 达到延长保质期、延缓食品腐烂的目的<sup>[12]</sup>, 也是活性成分提取的必要工艺。现阶段食品原料的干燥方式主要集中于热风、热泵、真空、微波等<sup>[13]</sup>, 与自然干燥相比, 不仅能提高效率, 而且能获得更优质的产品原料<sup>[14]</sup>。

对于果蔬而言, 不同的干燥方式、干燥温度等均会影响品质的变化, 其中干燥温度的影响最大<sup>[15]</sup>。同时, 筛选适合果蔬的干燥模型对于准确预测其水分扩散的变化规律至关重要<sup>[14]</sup>。传统自然干燥易受外部条件的影响, 且品质差<sup>[12]</sup>; 冷冻干燥、真空干燥是重要的脱水方法, 产品品质较好, 但成本高、操作不便<sup>[13]</sup>; 热泵干燥节能、成本低, 但产品品质较差<sup>[15]</sup>; 热风干燥是果蔬干燥中较为常见的方法, 操作方便、成本低, 适用于大批量生产加工<sup>[11]</sup>。忻晓庭等<sup>[16]</sup>以冷冻干燥为对照, 研究了热风干燥对冰菜品质的影响, 发现热风 80 °C 下与冷冻干燥的品质接近。目前对于云南

柃依干燥动力学及其品质变化的研究鲜有报道。

为了云南柃依的储运及最大程度保留其营养成分, 增加经济效益, 推动云南柃依产业的现代化发展, 本研究通过不同热风温度干燥云南柃依, 探究其干燥特性、干燥动力学模型, 综合评价不同温度对云南柃依品质的影响并对其进行相关性分析, 为云南柃依的进一步开发利用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

云南柃依产自云南省临沧市。芦丁、没食子酸、福林酚、1-二苯基-2-苦肼基自由基 (DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 (ABTS) 购于上海源叶生物科技有限公司; 苯酚、过氧化氢购于天津市风船化学试剂科技有限公司; 以上试剂均为分析纯。

DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海齐欣科学仪器有限公司; BJ-800A 粉碎机, 永康市铂欧五金制品有限公司; DT-1 电子天平, 赛多利斯科学仪器有限公司; DK-98-2 恒温水浴锅, 天津市泰斯特仪器有限公司; ST3100 电子 pH 计, 奥豪斯仪器 (常州) 有限公司; SC-80 轻便色彩色差计, 北京康光仪器有限公司; SB25-12DTDS 超声波清洗机, 宁波新艺超声设备有限公司; UV-2600 紫外可见分光光度计, 日本岛津公司。

### 1.2 方法

1.2.1 云南柃依预处理 取大小均匀、成熟度一致的新鲜云南柃依, 洗净、沥干水分, 后去籽、

切片（厚度为 5 mm），备用。

1.2.2 云南柃依的干燥工艺 取 200.0 g 大小一致的云南柃依切片分散于不锈钢烘盘上，在风速为 1.5 m/s，干燥温度分别为 40、60、80、100 °C 的电热恒温鼓风干燥箱中进行干燥，每隔 1 h 取样测定质量。

1.2.3 干燥特性指标的测定 （1）干基含水量。干燥过程中干基含水量的测定参考《食品安全国家标准 食品中水分的测定》GB 5009.3—2016 的直接干燥法进行，计算如公式（1）所示。

$$S_t = \frac{Q_t - Q}{Q} \quad (1)$$

式中， $S_t$  为  $t$  时刻样品的干基含水量，g/g； $Q_t$  为  $t$  时刻样品的质量，g； $Q$  为样品干燥后的质量，g。

（2）水分比。云南柃依干燥的水分比（ $MR$ ）根据公式（2）计算<sup>[17]</sup>：

$$MR = \frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e} \quad (2)$$

式中， $MR$  为水分比； $S_t$  为时间  $t$  时样品的干基含水量，g/g； $S_0$  为初始干基含水量，g/g； $S_e$  为物料平衡时的干基含水量，g/g， $S_e$  值很小，通常可忽略，则公式（2）可简化为公式（3）对水分比进行计算：

$$MR = \frac{S_t}{S_0} \quad (3)$$

（3）干燥速率。干燥速率为单位时间内在单位面积上除去汽化水分量<sup>[18]</sup>，云南柃依干燥速率根据公式（4）计算：

$$DR = \frac{S_{t_1} - S_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

式中， $DR$  为干燥速率，g/(g·h)； $S_{t_1}$ 、 $S_{t_2}$  分别为干燥  $t_1$ 、 $t_2$  时刻的云南柃依干基含水量，g； $t_1$ 、 $t_2$  为干燥时间，h。

1.2.4 水分有效扩散系数及活化能 水分有效扩散系数（ $D_{eff}$ ）是衡量物料水分扩散的一个重要指标，它反映云南柃依在干燥条件下的脱水情况，在公式（5）基础上，以  $t$ 、 $\ln MR$  为横纵坐标，进行线性拟合，通过斜率（ $k$ ）和云南柃依切片厚度（ $L_0$ ），得公式（6）计算  $D_{eff}$ <sup>[19-20]</sup>：

$$\ln MR = \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L_0^2} t \quad (5)$$

$$D_{eff} = -\frac{L_0^2 k}{\pi^2} \quad (6)$$

式中， $D_{eff}$  是水分有效扩散系数， $m^2/h$ ； $L_0$  是云南

柃依厚度，m； $t$  为干燥时间，h； $MR$  为水分比。

物料的有效扩散系数（ $D_{eff}$ ）通常由干燥曲线决定，用 Arrhenius 方程可以计算出有效扩散系数（ $D_{eff}$ ）与干燥温度的关系<sup>[20]</sup>：

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

式中， $D_0$  是云南柃依的扩散常数， $m^2/s$ ； $E_a$  是云南柃依的扩散活化能，kJ/mol； $R$  是气体的摩尔常数  $8.314 \times 10^{-3}$  kJ/(mol·K)； $T$  是热力学温度，K。

取公式（7）两侧的对数得到公式（8），由公式（8）可知， $\ln D_{eff}$  与  $1/T$  之间呈线性关系，通过对图像进行线性拟合，得到斜率  $-E_a/R$ ，并可计算出活化能。

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

1.2.5 云南柃依干燥动力学模型及统计分析

（1）干燥模型。通过 Origin 2018 非线性回归函数拟合 6 种数学模型，得出不同温度下热风干燥水分比曲线，并依据表 1 中的指标参数对数学模型的拟合值与实际测定值进行综合评价，6 种数学模型由表 1 所示。

表 1 干燥动力学模型  
Tab. 1 Drying kinetics model

编号 No.	模型 Model	模型方程 Model equation	参数 Parameter
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	$k$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k, n$
3	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a, k, c$
4	Wang and singh	$MR = 1 + at + bt^2$	$a, k, n, b$
5	Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	$a, b, c$
6	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a, k$

注： $MR$  为水分比； $t$  为干燥时间； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $k$  均是待定系数。  
Note:  $MR$  is the moisture ratio;  $t$  is the drying time;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  and  $k$  are all coefficients to be determined.

（2）统计分析。采用 Newton、Page、Logarithmic、Wang and singh、Parabolic、Henderson and Pabis 6 种干燥模型对热风干燥过程进行模型拟合，并计算不同温度下的决定系数（ $R^2$ ）、卡方（ $X^2$ ）、误差平方和（ $SSE$ ），值越小，表明拟合效果越好<sup>[17]</sup>，从而确定云南柃依热风干燥的最佳模型。

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_e - MR_p)^2}{N - n} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_e - MR_p)^2}{\sum_{i=1}^N (MR_e - \overline{MR_p})^2} \quad (10)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_e - MR_p)^2 \quad (11)$$

式中,  $MR_e$  为水分比实际测定值,  $MR_p$  为水分比预测值,  $N$  为数据的数目,  $n$  为参数个数。

1.2.6 云南移依干燥品质特性 (1) 色泽测定。用色差仪测定云南移依的  $L$ 、 $a$ 、 $b$  值, 反映干燥过程中的颜色变化情况。 $L$  表示亮度到暗度 (0~100, 黑到白),  $a$  表示红绿度 (红色为 ‘+’ 值, 绿色为 ‘-’ 值),  $b$  表示黄蓝度 (黄色为 ‘+’ 值, 蓝色为 ‘-’ 值) [21]。在测量前, 用白色和黑色陶瓷板校准色度计, 并以新鲜云南移依为对比, 测得  $L_0$ 、 $a_0$ 、 $b_0$ ;  $\Delta E$  代表总色差值, 测得样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值, 以此反映样品色泽的变化。 $\Delta E$  按公式 (12) 计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L^*)^2 + (a_0 - a^*)^2 + (b_0 - b^*)^2} \quad (12)$$

(2) 复水比。参照 ABBASPOUR 等 [12] 的方法分别测定热风 40、60、80、100 °C 下云南移依的复水比。将移依置于水浴锅 50 °C 下水浴 30 min, 擦去表面多余水分然后称重。复水比按照公式 (13) 计算:

$$RR = \frac{M_2}{M_1} \quad (13)$$

式中,  $RR$  为复水比, g/g;  $M_1$  为干燥云南移依的质量, g;  $M_2$  为复水后云南移依的质量, g。

(3) 活性成分的测定。称取不同温度干燥后的云南移依 1.00 g 于 50 mL 离心管中, 在超声功率 300 W、提取时间 50 min、液料比 30:1 (mL/g)、乙醇浓度 60% 条件下提取, 提取后真空抽滤, 定容至 100 mL, 得到云南移依提取液。

云南移依总酚含量采用 Folin-Ciocalteu 法 [22] 测定, 以没食子酸为标品, 于波长为 765 nm 处测定吸光值, 得到方程:  $y_0 = 0.220x_0 + 0.073$  ( $R_0^2 = 0.9991$ ), 用其计算样品总酚浓度; 总黄酮含量测定按照亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠比色法 [23] 测定, 以芦丁为标品, 于波长为 510 nm 处测定吸光值, 得到方程:  $y_1 = 0.208x_1 - 0.01$  ( $R_1^2 = 0.9992$ ), 用其计算样品总黄酮浓度; 总多糖含量采用苯酚-硫酸法 [24] 测定, 以葡萄糖为标品, 于波长为 490 nm 处测定吸光值, 得到方程:  $y_2 = 9.5961x_2 + 0.00002$  ( $R_2^2 = 0.9996$ ), 用其计算样品总多糖浓度。总酚、

总黄酮、总多糖含量均按公式 (14) 进行计算:

$$\text{含量 (mg/g)} = \frac{C \times V \times V_1}{m \times V_2} \quad (14)$$

式中,  $C$  为样品浓度, mg/mL;  $V$  为云南移依提取液体积, mL;  $V_1$  为稀释体积, mL;  $m$  为云南移依质量, g;  $V_2$  为取样体积, mL。

(4) 抗氧化活性测定。按 1.2.6-(3) 获得云南移依提取液, 采用比色法测定 DPPH 自由基 (DPPH·) 清除能力、ABTS 自由基 (ABTS<sup>+</sup>) 清除能力、羟基自由基 (·OH) 清除能力以及铁离子还原力 [25-27]。铁离子还原能力以  $OD_{700}$  表示,  $OD_{700}$  越大, 还原力越好。

### 1.3 数据处理

利用 Origin 2018 软件对动力学模型进行拟合及绘图; 采用 IBM SPASS Statistics 26.0 软件对实验数据进行显著性分析及相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 热风干燥水分比曲线

由图 1 可知, 水分比 ( $MR$ ) 随干燥时间的延长逐渐减少, 各温度的水分比曲线变化趋势大致相同, 均呈指数下降趋势。热风温度分别为 40、60、80、100 °C 时, 云南移依达到干燥终点 ( $MR < 0.03$ ) 的时间分别为 14、10、7、4 h, 说明提高干燥温度可以显著缩短云南移依的干燥时间, 温度越高, 水分比曲线越陡, 水分去除速度越快, 所需时间越短 [28]。在干燥过程的早期阶段, 样品的水分去除迅速, 因为干燥早期云南移依细胞间充满水分, 受表面温度的影响, 水分可自由通过松散的通道扩散, 随着干燥时间的延长, 水分去除速度趋于放缓, 可能是由于水分扩散从云

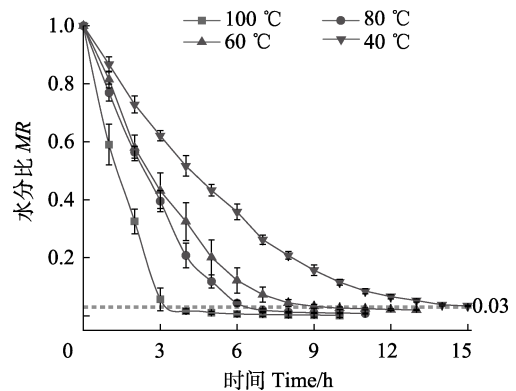


图 1 不同热风温度下水分比与时间的关系曲线  
Fig. 1 Relationship curves between  $MR$  and time of hot air drying at different temperatures

南柃依表面向内部转移，受内部阻力的影响导致速度降低<sup>[14]</sup>；后期，水分去除速度处于稳定阶段，可能是云南柃依含水量接近平衡水分含量（已到达干燥终点），因此水分比不再变化。

### 2.2 热风干燥速率

由图 2 可知，云南柃依的整个干燥过程分为升速、恒速、降速 3 个阶段，干燥速率（ $DR$ ）随温度升高而加快，水分去除越快，干燥速率越大，与图 1 相符。在干燥初期，云南柃依内外部自由水含量高，流动速度快，升温能加快自由水蒸发，促使自由水不断蒸发，干燥速率不断增大至峰值<sup>[29]</sup>；在干燥中期，云南柃依随着时间的延长，表面温度上升至环境温度，其水分不断从表面扩散，干燥速率呈恒速阶段<sup>[30]</sup>；在后期，云南柃依表面水分不断转移到内部结合水，因为云南柃依与结合水结合紧密，存在一定阻力，导致干燥速率逐渐减少，呈降速阶段；而后随着热动力不断增大，云南柃依整体水分逐渐减少，到达干燥终点，干燥速率逐渐趋于 0，水分扩散也随之终止。

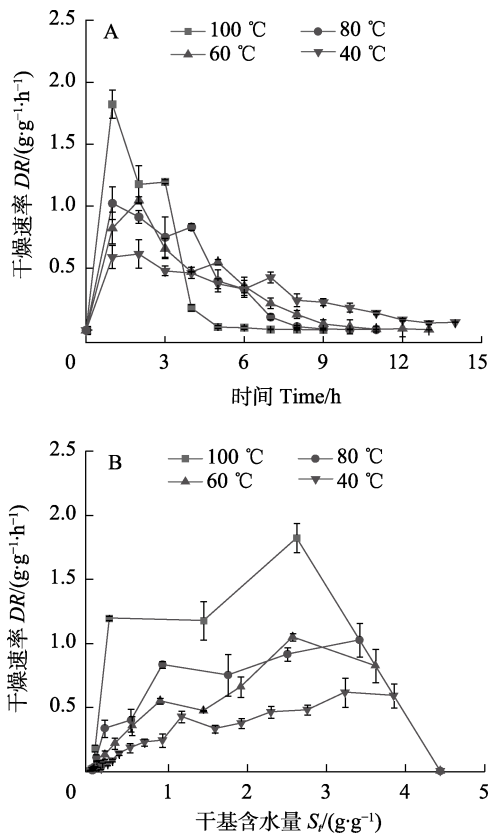


图 2 不同热风温度下干燥速率与时间 (A)、干基含水量 (B) 的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between  $DR$  and time (A),  $S_1$  (B) of hot air drying at different temperatures

### 2.3 不同温度对水分有效扩散系数的影响

由图 3 可知，对  $\ln MR$  与时间 ( $t$ ) 的关系进行拟合 ( $R^2 > 0.94$ )，根据公式 (6) 可得到云南柃依的有效水分扩散系数 (表 2)。由表 2 可知，热风温度为 40~100 °C 时，有效水分扩散系数在  $0.61 \times 10^{-6} \sim 1.78 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  范围内，与效碧亮等<sup>[31]</sup>研究百合干燥中的  $D_{\text{eff}}$  范围相近。随着干燥温度的升高云南柃依的有效水分扩散系数逐渐增大，说明干燥速度明显受温度的影响，主要是云南柃依内部的水分子随温度升高移动速度加剧，水分去除加快，使其干燥速率加快<sup>[20]</sup>，与图 1、图 2 结果相符。

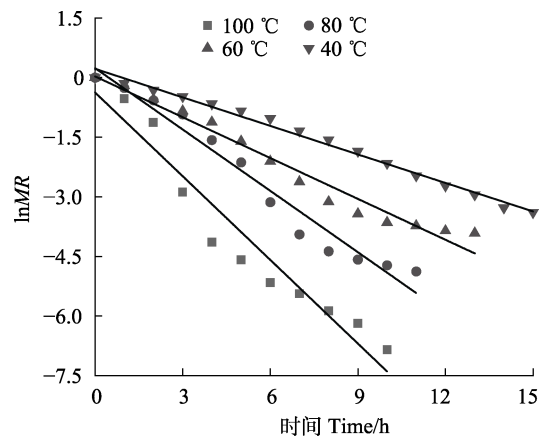


图 3 不同热风温度下  $\ln MR$  与时间的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between  $\ln MR$  and time of hot air drying at different temperatures

表 2 不同热风温度干燥下云南柃依的水分有效扩散系数 ( $D_{\text{eff}}$ )

Tab. 2  $D_{\text{eff}}$  in *D. delavayi* under hot air drying at different temperatures

温度 Temperature/°C	线性拟合方程 Linear fitting equation	$R^2$	$D_{\text{eff}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
40	$y = -0.2395x - 0.0065$	0.9899	$0.61 \times 10^{-6}$
60	$y = -0.3429x + 0.0177$	0.9789	$0.87 \times 10^{-6}$
80	$y = -0.5151x + 0.2397$	0.9648	$1.30 \times 10^{-6}$
100	$y = -0.7025x - 0.3750$	0.9417	$1.78 \times 10^{-6}$

### 2.4 干燥活化能

从图 4 可知，干燥过程中云南柃依的  $\ln D_{\text{eff}}$  与  $1/T$  呈较好的线性关系 ( $R^2 = 0.9978$ )，并根据公式 (8) 算出云南柃依的干燥活化能 ( $E_a$ ) 为 17.64 kJ/mol，说明在热风干燥时每干燥其内部 1 mol 水分最低消耗 17.64 kJ 能量，与红龙果<sup>[19]</sup>热风干燥所需的最低能量相近。

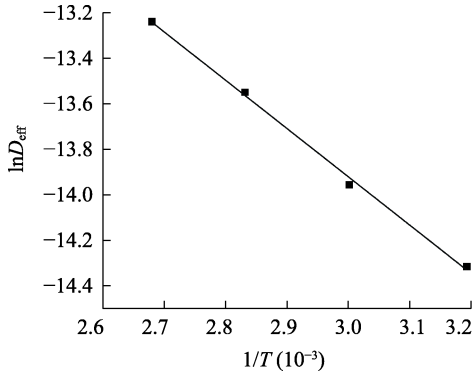


图 4 不同温度热风干燥下  $\ln D_{\text{eff}}$  与  $1/T$  的关系曲线  
Fig. 4 Relationship between  $\ln D_{\text{eff}}$  and  $1/T$  of hot air drying at different temperatures

2.5 干燥模型分析

云南柘依在不同温度下的热风干燥实验数据用水分比表示, 并与表 1 中 6 个模型拟合, 以平均决定系数 ( $R^2$ )、卡方 ( $X^2$ ) 和误差平方和 ( $SSE$ ) 平均值作为判定拟合标准, 其拟合结果见表 3。由表 3 可知, 所有模型的相关系数均大于 0.97,  $R^2 > 0.95$ , 表明拟合良好, 得出  $X^2$  在  $0.281 \times 10^{-3} \sim 3.294 \times 10^{-3}$  范围内,  $SSE$  在  $0.276 \times 10^{-2} \sim 3.021 \times 10^{-2}$  范围内,  $X^2$ 、 $SSE$  值越小, 相关性越高;  $R^2$  则值越大, 模型拟合越好<sup>[17]</sup>。综合所有模型拟合结果, 得出 Page 模型拟合度高, 其  $R^2$ 、 $X^2$ 、 $SSE$  平均值分别为 0.9946、 $0.281 \times 10^{-3}$ 、 $0.276 \times 10^{-2}$ , 表明 Page 模型能准确描述云南柘依的干燥动力学。

表 3 数学模型拟合结果

Tab. 3 Fitting results for mathematical model

编号 No.	模型 Model	相关系数 Correlation coefficient	$R^2$	$X^2$ ( $\times 10^{-3}$ )	$SSE$ ( $\times 10^{-2}$ )
1	Newton	0.9836	0.9555	2.024	1.931
2	Page	0.9973	0.9946	0.281	0.276
3	Logarithmic	0.9910	0.9817	0.871	0.824
4	Wang and singh	0.9700	0.9602	3.294	3.021
5	Parabolic	0.9767	0.9601	2.285	2.097
6	Henderson and Pabis	0.9861	0.9712	1.293	1.266

由图 5 可知, 图 5A 与图 5B 相比, 后者存在较明显的线性关系, 说明可以用 Page 方程 [ $MR = \exp(-kt^n)$ ] 来预测热风干燥中云南柘依的水分变化规律。Page 模型拟合云南柘依热风干燥拟合结果见表 4, 相关系数及  $R^2$  分别在 0.99、0.98 以上,  $X^2$ 、 $SSE$  分别在  $0.149 \times 10^{-3} \sim 0.548 \times 10^{-3}$ 、 $0.184 \times 10^{-2} \sim 0.493 \times 10^{-2}$  范围内。由图 6 可知, 热风干燥不同温度下云南柘依的水分比预测曲线和

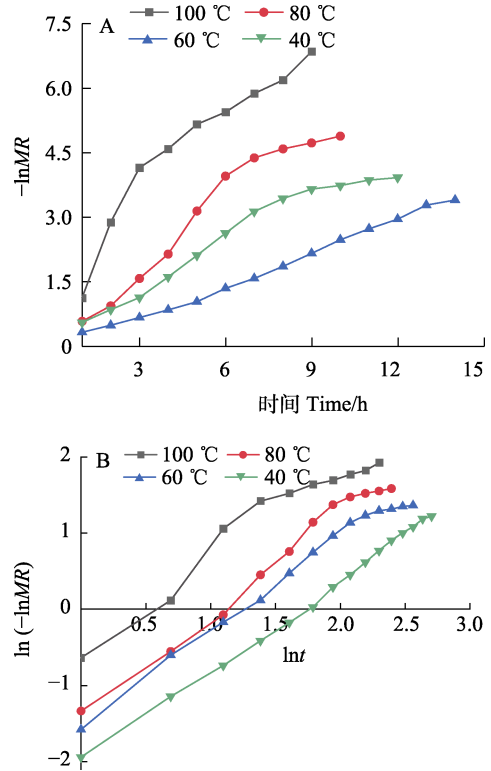


图 5 不同温度下  $-\ln MR$  与时间 (A) 和  $\ln[-\ln MR]$  与  $\ln t$  (B) 的关系图

Fig. 5 Relationship plot between  $-\ln(MR)$  and time (A), between  $\ln[-\ln(MR)]$  and  $\ln t$  (B) at different temperatures

表 4 Page 模型拟合结果

Tab. 4 Fitting results for Page model

温度 Temperature /°C	参数 Parameter	相关系数 Correlation coefficient	$R^2$	$X^2$ ( $\times 10^{-3}$ )	$SSE$ ( $\times 10^{-2}$ )
40	$k=0.123,$ $n=1.225$	0.9984	0.9981	0.149	0.194
60	$k=0.214,$ $n=1.252$	0.9983	0.9977	0.167	0.184
80	$k=0.221,$ $n=1.400$	0.9974	0.9967	0.260	0.233
100	$k=0.487,$ $n=1.415$	0.9949	0.9862	0.548	0.493

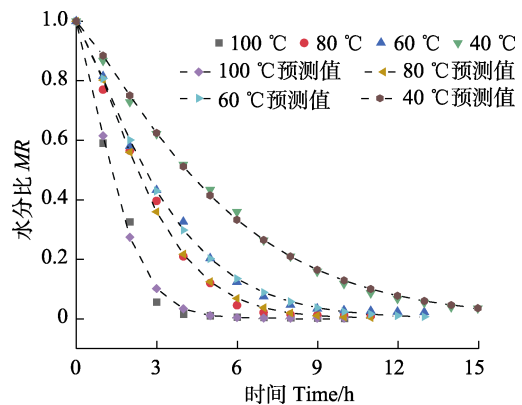


图 6 热风干燥 Page 模型验证  
Fig. 6 Page model validation for hot air drying

实际测定值相近，说明 Page 模型拟合度很高，可较准确地反映云南柃依干燥水分比的变化规律。进一步证实 Page 模型可较准确描述和预测云南柃依的热风干燥过程。

### 2.6 干燥温度对云南柃依品质的影响

**2.6.1 色泽** 果蔬颜色的变化会影响其质量和市场价值<sup>[31]</sup>。综合分析表 5 色泽参数发现，不同温度对云南柃依色泽的影响顺序为 100 °C>80 °C>40 °C>60 °C。由于 40 °C 下干燥温度低，云南柃依水分扩散慢，干燥速率低，干燥时间延长，发生酶促褐变；80~100 °C 快速干燥，色素分解加快，受热而产生的酶促和非酶促褐变影响了云南柃依的颜色变化<sup>[12]</sup>；60 °C 可以最大程度保持云南柃依的色泽。说明干燥温度和时间都是导致颜色劣化的因素，适宜温度有助于减少干燥过程中的褐变反应<sup>[31]</sup>。

表 5 不同干燥温度下云南柃依的色泽参数

Tab. 5 Color parameters of *D. delavayi* at different drying temperatures

温度 Temperature/°C	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
40	44.85±0.66 <sup>c</sup>	4.37±0.60 <sup>c</sup>	15.65±0.17 <sup>b</sup>	12.79±0.03 <sup>b</sup>
60	46.47±0.08 <sup>b</sup>	4.32±0.15 <sup>d</sup>	15.72±0.11 <sup>b</sup>	8.26±0.05 <sup>d</sup>
80	44.70±0.03 <sup>d</sup>	4.56±0.16 <sup>b</sup>	14.17±0.38 <sup>c</sup>	10.03±0.10 <sup>c</sup>
100	36.33±0.17 <sup>e</sup>	5.94±0.07 <sup>a</sup>	9.32±0.15 <sup>d</sup>	19.42±0.22 <sup>a</sup>

注：同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

**2.6.2 复水性** 因为干燥过程中细胞和结构损伤的发生率较高，复水性能反映云南柃依的结构特征，复水比 (RR) 越大，其吸水性能越好，表示干燥过程中对其质构的破坏程度越小<sup>[12]</sup>。从图 7 可以看出，云南柃依的复水顺序为 40 °C>60 °C>80 °C>100 °C。随着干燥温度升高，RR 值越低，可能是高温导致云南柃依的结构变化大，收缩率高，孔隙率低所致<sup>[32]</sup>。

**2.6.3 活性成分** 多酚、黄酮、多糖等活性物质是物料的重要评价指标，是云南柃依具有抗氧化等多种功效的主要原因<sup>[33]</sup>。由表 6 可知，活性成分含量为 60 °C>40 °C>80 °C>100 °C，60 °C 所得到的活性成分含量最高，当温度大于 60 °C 时，云南柃依的活性成分含量逐渐下降。这可能是活性物质在干燥过程中易受环境因素的影响发生氧化降解，干燥时间的延长，加快了活性物质的氧化

分解；同时，适当升高温度会加快组织细胞破裂，促进活性物质释放，但高温会导致化学结构破坏，使其含量也随之降低<sup>[34]</sup>，说明活性物质在干燥过程中受温度的影响较大。

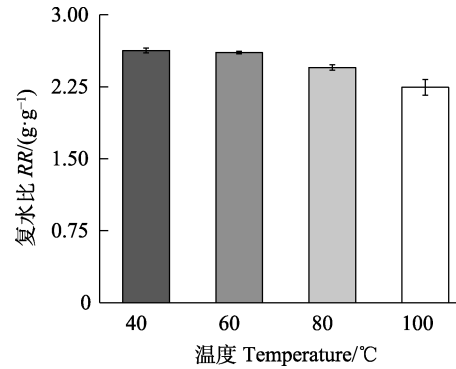


图 7 不同干燥温度对云南柃依复水性的影响

Fig. 7 Effects of different drying temperatures on the rehydration of *D. delavayi*

表 6 不同干燥温度对云南柃依活性成分的影响

Tab. 6 Effects of different drying temperatures on active ingredients content of *D. delavayi*

温度 Temperature/°C	总酚 Total phenols/ (mg·g <sup>-1</sup> )	总黄酮 Total flavonoids/ (mg·g <sup>-1</sup> )	总多糖 Total polysaccha- rides/(mg·g <sup>-1</sup> )
40	11.15±0.82 <sup>b</sup>	5.36±0.23 <sup>b</sup>	2.15±0.27 <sup>b</sup>
60	13.84±0.34 <sup>a</sup>	6.15±0.34 <sup>a</sup>	2.92±0.05 <sup>a</sup>
80	10.95±0.30 <sup>cd</sup>	4.44±0.18 <sup>c</sup>	2.05±0.03 <sup>bc</sup>
100	10.10±0.20 <sup>d</sup>	4.36±0.32 <sup>d</sup>	1.96±0.14 <sup>c</sup>

注：同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

**2.6.4 抗氧化能力** 不同干燥温度对云南柃依抗氧化能力的影响见表 7，抗氧化能力依次为 60 °C>40 °C>80 °C>100 °C，热风 60 °C 条件下，DPPH<sup>+</sup>、ABTS<sup>+</sup>、•OH 以及铁还原能力均较高，100 °C

表 7 不同干燥温度对云南柃依抗氧化能力的影响

Tab. 7 Effects of different drying temperatures on antioxidant capacities of *D. delavayi*

温度 Temperature/°C	DPPH <sup>•</sup> 清除率 DPPH <sup>•</sup> scavenging rate/%	ABTS <sup>+</sup> 清除率 ABTS <sup>+</sup> scavenging rate/%	•OH 清除率 •OH scav- enging rate/%	Fe <sup>3+</sup> 还原能力 Fe <sup>3+</sup> reduction ability
40	64.37±0.12 <sup>b</sup>	56.64±0.31 <sup>b</sup>	52.63±0.92 <sup>b</sup>	0.99±0.02 <sup>b</sup>
60	73.46±0.02 <sup>a</sup>	67.37±0.57 <sup>a</sup>	60.83±0.28 <sup>a</sup>	1.21±0.11 <sup>a</sup>
80	61.14±0.02 <sup>c</sup>	55.41±0.14 <sup>b</sup>	41.17±0.71 <sup>c</sup>	0.87±0.01 <sup>c</sup>
100	54.10±0.01 <sup>d</sup>	41.13±0.34 <sup>d</sup>	40.27±0.14 <sup>d</sup>	0.78±0.18 <sup>d</sup>

注：同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

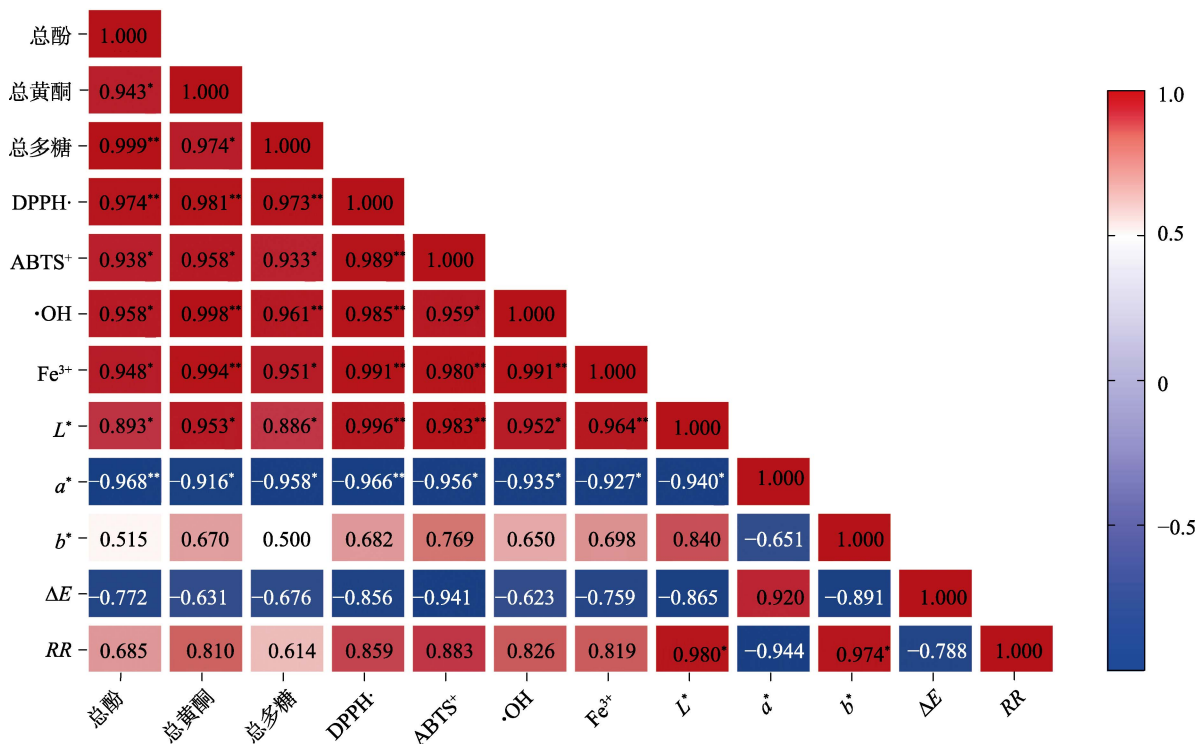
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

的抗氧化能力最低。综合表 6、表 7 可以看出, 60℃下活性成分含量高, 相应的抗氧化能力也高, 可能是因为随着温度的升高, 活性物质被分解破坏, 导致抗氧化活性降低<sup>[35]</sup>, 说明抗氧化能力受干燥温度的影响较大。

### 2.7 云南柁依品质变化的相关性分析

不同热风温度干燥对云南柁依品质变化的相关性分析如图 8 所示, 总酚、总黄酮、总多糖与云南柁依干燥的色泽  $L^*$  值呈显著正相关 ( $P<0.05$ ),

与  $a^*$  值、 $\Delta E$  值呈负相关, 并与  $a^*$  值呈显著负相关 ( $P<0.05$ ); 而总酚、总黄酮、总多糖与  $RR$  值呈正相关, 与苹果<sup>[36]</sup>、香蕉<sup>[37]</sup>等干燥实验结果相近。同时, 总酚、总黄酮、总多糖与云南柁依的抗氧化能力有较好的相关性, 其中, 总酚、总黄酮、总多糖对 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>、·OH、铁离子还原力均呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。说明云南柁依的抗氧化能力是多种活性物质共同作用的结果。



\*表示显著相关 ( $P<0.05$ ); \*\*表示极显著相关 ( $P<0.01$ )。

\* means significant correlation ( $P<0.05$ ); \*\* means extremely significant correlation ( $P<0.01$ ).

图 8 云南柁依品质变化的相关性

Fig. 8 Correlation of quality changes in *D. delavayi*

### 3 讨论

云南柁依营养价值丰富, 是一种较好的药食同源植物, 具有较大的开发价值<sup>[2]</sup>, 而目前对于云南柁依干燥的研究较少, 仅停留在传统的自然干燥, 对其干燥特性及品质研究尤为重要。其中热风干燥具有成本低、效率高、使用范围广等优点, 研究热风干燥 40、60、80、100℃下的水分迁移规律, 通过拟合模型, 可以较为准确地描述云南柁依 (厚度 5 mm) 的干燥过程, 较好地保留其品质, 为下一步研究提供一定的理论基础。

本研究发现云南柁依在干燥过程中水分比 ( $MR$ ) 呈指数下降趋势, 与等热风干燥相似, 干

燥速率 ( $DR$ ) 分为升速、恒速、降速 3 个阶段, 且  $MR$  越小,  $DR$  越大, 耗时越短,  $D_{eff}$  越大, 与红龙果<sup>[19]</sup>、哈密瓜<sup>[38]</sup>、柿子片<sup>[31]</sup>、冰菜<sup>[16]</sup>、无籽刺梨<sup>[20]</sup>等果蔬干燥一致; 云南柁依的水分有效扩散系数 ( $D_{eff}$ ) 为  $0.61 \times 10^{-6} \sim 1.78 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , 云南柁依在干燥过程中所需活化能 ( $E_a$ ) 为 17.64 kJ/mol, 符合大多数食品的活化能范围 (12.7~110.0 kJ/mol)<sup>[32]</sup>。本研究中 Page 模型也能较好地预测云南柁依的水分迁移规律,  $R^2$  均大于 0.98, 而 Page 模型常用来描述水果、蔬菜以及其他农作物的干燥过程, 红心红龙果<sup>[19]</sup>、哈密瓜<sup>[38]</sup>、苹果<sup>[39]</sup>等在热风干燥过程中以 Page 模型与实测

过程较为吻合。同时,不同干燥温度下云南柃依的品质表现出一定的差异,其中 60 °C 能够最大程度地保持云南柃依的色泽;温度升高,样品表面硬化严重、收缩率升高,导致复水性越差,40 °C 时有较高的复水比,与 KUMAR 等<sup>[40]</sup>的青椒干燥结果接近;但 40 °C 下温度低,耗时长、效率低,导致色泽下降,而当温度超过 60 °C 时,耗时越短、效率高,云南柃依的色泽和复水性越差;同时,在干燥过程中,云南柃依随着温度的升高,其总酚、总黄酮等活性成分含量呈先升后降的趋势,60 °C 时总酚、总黄酮、总多糖含量最高,与忻晓庭等<sup>[16]</sup>的研究类似;抗氧化能力与活性物质变化趋势类似,先升后降,与梨片<sup>[32]</sup>的热风干燥结果一致。因此,本研究证明了干燥温度和时间对云南柃依的色泽、结构、活性成分及抗氧化能力的影响较为显著,这与效碧亮等<sup>[33]</sup>在对百合热风干燥的品质研究中结果一致;此外,相关性分析结果表明,活性成分含量与抗氧化能力呈显著正相关,与花椒叶<sup>[21]</sup>干燥的研究结果一致。经综合分析,云南柃依的适宜干燥温度为 60 °C。而张雪波等<sup>[38]</sup>和楚文靖等<sup>[19]</sup>在物料热风干燥的研究中,发现热风温度及切片厚度会影响物料的品质;ABBASPOUR 等<sup>[12]</sup>通过超声波-微波-热风干燥法不仅提高了山楂的干燥效率,而且得到的产品品质优于其他干燥法。本研究结果为进一步确定云南柃依的最佳干燥工艺,探究干燥条件对其品质的影响奠定基础。

## 参考文献

- [1] 彭珍华. 云南柃依有效成分提取纯化工艺的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.  
PENG Z H. Study on extraction and purification process of effective components from *Docynia delavayi*[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] 刘海霞, 刘刚, 张晓喻, 朱明君, 彭彤, 王战国. 柃[木衣]属植物多酚的含量测定与比较[J]. 食品科学, 2014, 35(24): 295-300.  
LIU H X, LIU G, ZHANG X Y, ZHU M J, PENG T, WANG Z G. Determination of polyphenol contents in *Docynia Dcne*[J]. Food Science, 2014, 35(24): 295-300. (in Chinese)
- [3] 刘刚, 吴京, 朱明君, 张晓喻, 张宏. 云南柃[木衣]叶提取物片段抗氧化活性及成分分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(9): 73-81.  
LIU G, WU J, ZHU M J, ZHANG X Y, ZHANG H. Yunnan *Docynia delavayi* (Franch.) Schneid leaves extract antioxidant activity and composition analysis of the fragment[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2014, 39(9): 73-81. (in Chinese)
- [4] 邓旭坤, 赵湘培, 梅之南, 孙佳强, 符若男. 傣药“柃依”中黄酮类活性成分抗炎镇痛作用的研究[C]//2010 年全国中药学术研讨会论文集, 2010: 63-68.  
DENG X K, ZHAO X P, MEI Z N, SUN J Q, FU R N. Study on anti-inflammatory and analgesic effects of flavonoids active components in traditional Dai Medicine “Yiyi”[C]// Proceedings of the 2010 National Symposium on Traditional Chinese Medicine, 2010: 63-68. (in Chinese)
- [5] 黄丽萍, 徐新, 马二秀, 李佳川. 民族药食资源柃[木衣]乙醇提取物的降糖、降脂及抗氧化活性研究[J]. 中药药理与临床, 2019, 35(5): 60-64.  
HUANG L P, XU X, MA E X, LI J C. Study on the hypo-glycemic, lipid reducing and antioxidant activities of ethanol extract from *Docynia delavayi* in ethnic medicine and food resources[J]. Pharmacology and Clinics of Chinese Materia, 2019, 35(5): 60-64. (in Chinese)
- [6] 罗恒国, 杨士花, 李晴, 罗瑜, 黄勇桦, 初雅洁, 李淳, 李永强. 云南省特色水果中多酚化合物含量和抗氧化性的比较[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(9): 104-108.  
LUO H G, YANG S H, LI Q, LUO Y, HUANG Y H, CHU Y J, LI C, LI Y Q. Comparison of the content and antioxidant properties of polyphenolic compounds in characteristic fruits of Yunan province[J]. Food and Fermentation Industry, 2017, 43(9): 104-108. (in Chinese)
- [7] 黄艳丽, 李成华, 杨永林, 周晓龙, 尹锦荣, 虞志君, 赵猛. 多依果醋发酵工艺优化及品质分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(22): 97-103.  
HUANG Y L, LI C H, YANG Y L, ZHOU X L, YI J R, YU Z J, ZHAO M. Fermentation process optimization and quality analysis of *Docynia delavayi* fruit vinegar[J]. Food Research and Development, 2021, 42(22): 97-103. (in Chinese)
- [8] 黄艳丽, 尹锦荣, 王琼, 虞志君, 袁其敏, 杨超凡, 赵秀. 响应面法优化多依果酒的酿造工艺[J]. 中国酿造, 2020, 39(4): 205-209.  
HUANG Y L, YI J R, WANG Q, YU Z J, YUAN Q M, YANG C F, ZHAO X. Optimization of fermentation technology of *Docynia delavayi* fruit wine by response surface methodology[J]. China Brewing, 2020, 39(4): 205-209. (in Chinese)
- [9] 董文明, 唐卿雁, 刘华戎, 李凌飞. 柃衣果汁饮料加工技术的研究[J]. 保鲜与加工, 2013, 13(6): 46-50.  
DONG W M, TANG Q Y, LIU H R, LI L F. Study on the process of *Docynia delavayi* (Franch.) Schneid. juice

- drink[J]. Storage and Process, 2013, 13(6): 46-50. (in Chinese)
- [10] 冀智勇. 云南多衣系列产品开发研究[J]. 食品研究与开发, 2006(6): 113-114.  
JI Z Y. Research on the development of the *Docynia delavayi* range[J]. Food Research and Development, 2006(6): 113-114. (in Chinese)
- [11] ESHETU G, DELELE M A, GABBIYE N, FANTA S W, VANIERSCHOT M. Studying the drying characteristics and quality attributes of chili pepper at different maturity stages: experimental and mechanistic model[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26: 101052.
- [12] ABBASPOUR G Y, KAVEH M H, FATEMI H, AZIZ M. Combined hot air, microwave, and infrared drying of hawthorn fruit: effects of ultrasonic pretreatment on drying time, energy, qualitative, and bioactive compounds' properties[J]. Foods, 2021, 10(5): 1006.
- [13] KARAM M C, PETIT J, ZIMMER D, BAUDELAIRE E N. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 188: 32-49.
- [14] LI K, ZHANG M, MUJUMDAR A S, CHITRAKAR B. Recent developments in physical field-based drying techniques for fruits and vegetables[J]. Drying Technology, 2019, 37(15): 1954-1973.
- [15] 丁俊雄, 吴小华, 王鹏, 杨绪飞. 干燥技术在果蔬中的应用综述[J]. 制冷与空调, 2019, 19(8): 23-27, 58.  
DING J X, WU X H, WANG P, YANG X F. Overview of the application of drying technology in fruits and vegetables[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2019, 19(8): 23-27, 58. (in Chinese)
- [16] 忻晓庭, 刘大群, 郑美瑜, 李小琼, 李乔, 张程程. 热风干燥温度对冰菜干燥动力学、多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 148-156.  
XIN X T, LIU D Q, ZHENG M Y, LI X Q, LI Q, ZHANG C C. Effect of hot air drying temperature on drying kinetics, polyphenol content and antioxidant activity of iceberg lettuce[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 148-156. (in Chinese)
- [17] THAKOR N J, SOKHANSANJ S, SOSULSKI F W, YANNACOPOULOS S. Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying[J]. Journal Food Engineering, 1999, 40(3): 153-160.
- [18] YU H, ZUO C, XIE Q. Drying characteristics and model of Chinese hawthorn using microwave coupled with hot air[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(2): 1-15.
- [19] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 于艳, 张峰, 叶双双. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 150-155.  
CHU W J, SHENG D M, ZHANG N, YU Y, ZHANG F, YE S S. Hot-air drying of red-fleshed pitaya: kinetic modelling and quality changes[J]. Food Science, 2019, 40(17): 150-155. (in Chinese)
- [20] 周崇银, 范方宇, 赵国瑜, 巫丹, 李晗. 无籽刺梨干燥特性及动力学模型[J]. 食品科技, 2020, 45(6): 39-45.  
ZHOU C Y, FAN F Y, ZHAO G Y, WU D, LI H. Drying characteristics and kinetic model of *Rosa sterilis*[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(6): 39-45. (in Chinese)
- [21] 吴雅璐. 不同干燥方法对花椒叶色泽、挥发性物质及抗氧化性的影响[D]. 太原: 山西师范大学, 2019.  
WU Y L. The effects of different drying methods on the color, volatile matter and antioxidant activity of *Zanthoxylum bungeanum* leaves[D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2019. (in Chinese)
- [22] 李颖畅, 吕艳芳, 励建荣. Folin-Ciocalteu 法测定不同品种蓝莓叶中多酚含量[J]. 中国食品学报, 2014, 14(1): 273-278.  
LI Y C, LYU Y F, LI J R. Determination of polyphenols in blueberry leaves of different varieties by the Folin-Ciocalteu method[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(1): 273-278. (in Chinese)
- [23] 李婉仪, 吉文丽, 李蕊, 李秀信, 张延龙. 响应面优化牡丹籽壳总黄酮超声波提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(4): 114-118.  
LI W Y, JI W L, LI R, LI X X, ZHANG Y L. Optimization of ultrasound extraction of total flavonoids from peony seed shell by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(4): 114-118. (in Chinese)
- [24] 张媛媛, 张彬. 苯酚-硫酸法与蒽酮-硫酸法测定绿茶茶多糖的比较研究[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 158-163.  
ZHANG Y Y, ZHANG B. Comparison of phenol-sulfuric acid and anthrone-sulfuric methods for determination of polysaccharide in green tea[J]. Food Science, 2016, 37(4): 158-163. (in Chinese)
- [25] XU Y Q, NIU X J, LIU N Y, GAO Y K, WANG L B, XU G, LI X G, YANG Y. Characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of degraded polysaccharides from blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) fruits[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 26-35.
- [26] MAHENDRAM S, MAHESWARI P, SASIKALA V, RUBIKA J J. *In vitro* antioxidant study of polyphenol from red seaweeds dichotomously branched gracilaria *Gracilaria edulis* and robust sea moss *Hypnea valentiae*[J]. Toxicology Reports, 2021, 8: 1404-1411.
- [27] 李慧翔, 倪辉, 黄高凌, 杨远帆, 肖安风, 杜希萍. 破壁方

- 法和溶剂对法夫酵母提取物抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 76-82.
- LI H X, NI H, HUANG G L, YANG Y F, XIAO A F, DU X P. Effect of wall-breaking method and solvent on the antioxidant activity of Fife yeast extract[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(6): 76-82. (in Chinese)
- [28] OJEDIIRAN J O, OKONKWO C E, OLANIRAN A F, LRANLOYE Y M, ADEWUMI A D, ERINLE O, AFOLABI Y T, ADEYI O, ADEYI A. Hot air convective drying of hog plum fruit (*Spondias mombin*): effects of physical and edible-oil-aided chemical pretreatments on drying and quality characteristics[J]. Heliyon, 2021, 7(11): e8312.
- [29] ELMIZADEH A, SHAHEDI M, HAMDAMI N. Comparison of electrohydrodynamic and hot-air drying of the quince slices[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 43: 130-135.
- [30] LIU Y H, ZENG Y, WANG Q, SUN C Y, XI H H. Drying characteristics, microstructure, glass transition temperature, and quality of ultrasound-strengthened hot air drying on pear slices[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(3): e13899.
- [31] 效碧亮, 孙静, 刘晓风. 百合热风薄层干燥特性及干燥品质[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 48-55, 218.
- XIAO B L, SUN J, LIU X F. Drying characteristics and drying quality of lilium by hot-air thin-layer drying[J]. Food and Machinery, 2020, 36(2): 48-55, 218. (in Chinese)
- [32] SENADEERA W, ADILETTA G, ÖNAL B, MATTEO M D. Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices[J]. Foods, 2020, 9(1): 101.
- [33] LIU H, LIU J C, LYU Z Z, YANG W B, ZHANG C L, CHEN D L, JIAO Z G. Effect of dehydration techniques on bioactive compounds in hawthorn slices and their correlations with antioxidant properties[J]. Journal of Food Science and Technology Mysore, 2019, 56(5): 2446-2457.
- [34] NG M X, THAM T C, GAN S H, CHUA L S, AZIZ R, BABA M R, ABDULLAH L C, CHIN N L, ONG S P, LAW C L. *Clinacanthus nutans* Lindau: effects of drying methods on the bioactive compounds, color characteristics, and water activity[J]. Drying Technology, 2018, 36(2): 146-159.
- [35] GUO L, LAN N, LI H, XIANG P, KAN H. Effect of hot air drying temperature on the quality and antioxidant activity of *Boletus edulis* Bull.: Fr[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(6): e15540.
- [36] LI X, WU X Y, BI J F, LIU X. Polyphenols accumulation effects on surface color variation in apple slices hot air drying process[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 108(26): 421-428.
- [37] ZHOU Y H, PEI Y P, SUTAR P P, LIU D H, DENG L Z, DUAN X, LIU Z L, XIAO H W. Pulsed vacuum drying of banana: effects of ripeness on drying kinetics and physico-chemical properties and related mechanism[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 161: 113362.
- [38] 张雪波. 哈密瓜切片热风干燥特性及品质工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- ZHANG X B. Hot-air drying characteristics and mathematical model of cantaloupe slices[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [39] 肖敏, 易建勇, 毕金峰, 彭健, 张彪, 高琨. 不同聚合度糖渗透对苹果片干燥特性及品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 53-58.
- XIAO M, YI J Y, BI J F, PENG J, ZHANG B, GAO K. Effect of sugars with different degrees of polymerization on apple hot-air drying behavior and physical characteristics of instant controlled pressure drop dried apple chips[J]. Food Science, 2017, 38(9): 53-58. (in Chinese)
- [40] KUMAR V, DEVI M K, PANDA B K, SHRIVASTAVA S L. Shrinkage and rehydration characteristics of vacuum assisted microwave dried green bell pepper[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(4): e13030.