

# 金银花红外鼓风干燥特性、失水动力学及干制品品质研究

杜利平<sup>1,2</sup>, 赵恒强<sup>2</sup>, 周冰谦<sup>2</sup>, 杜金华<sup>1</sup>, 王晓<sup>2,\*</sup>, 崔莉<sup>2,\*</sup>

(1. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东泰安 271018;

2. 山东省中药质量控制技术重点实验室山东省分析测试中心, 山东济南 250014)

**摘要:**目的:研究金银花的红外鼓风干燥特性及其动力学模型。方法:金银花在不同温度(35、45、55 ℃)条件下进行红外鼓风干燥,计算水分比、干燥速率等参数,拟合建立干燥动力学数学模型,并测定干制品的色泽、主要成分等干燥特性。结果:金银花在红外鼓风干燥过程中,干燥温度越高,用时越短,降速阶段为其干燥的主要阶段。干燥的动力学模型拟合结果表明 Page 模型的预测值与实验值吻合性好,可以用来预测和描述金银花红外鼓风干燥的失水过程。费克第二定律求得干燥过程中的水分有效扩散系数( $D_{\text{eff}}$ ) 在  $5.06606 \times 10^{-9} \sim 7.59909 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  内,且随温度的升高而增大;阿伦尼乌斯方程计算得出金银花红外鼓风干燥平均活化能为 113.569 kJ/mol。35 ℃时金银花的色差值  $\Delta E$  最小,有效成分含量最高,与阴干相比可提高效率并保证产品质量。结论:金银花红外鼓风干燥的主要阶段为降速阶段,Page 模型适于预测和描述其失水过程,35 ℃红外干燥与阴干相比可提高效率,且产品品质更优。

**关键词:**金银花,红外鼓风干燥特性,动力学模型

## Drying characteristics, drying kinetics and product quality of Flos Ionicerae during infrared-forced air drying

DU Li-ping<sup>1,2</sup>, ZHAO Heng-qiang<sup>2</sup>, ZHOU Bing-qian<sup>2</sup>, DU Jin-hua<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>2,\*</sup>, CUI Li<sup>2,\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2. Key Laboratory of TCM Quality Control Technology, Shandong Analysis and Test Center, Jinan 250014, China)

**Abstract:** Objective: To study the infrared-forced air drying characteristics and drying kinetics mathematical model of Flos Ionicerae. Methods: The experiment was carried out at different infrared radiation drying temperatures (35, 45, 55 ℃). The drying characteristics were detected and the drying kinetics mathematical model was established. Meanwhile, the value of colour and effective constituents were detected. Results: The drying time decreased with the increase of the drying temperature. According to statistical parameters, the Page model predicts and describes the drying process more accurately than others. There was a good agreement between the experimental and predicted values. Since the drying process occurred in falling rate periods, the Fick's second law of diffusion was employed to calculate the value of moisture effective diffusivity ( $D_{\text{eff}}$ ), which ranged from  $5.06606 \times 10^{-9} \sim 7.59909 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , and increased with the increasing of drying temperature. The value of  $\Delta E$  was least and the effective constituent was maximum at 35 ℃ of Flos Ionicerae. The activation energy determined from Arrhenius equation was 113.569 kJ/mol. Conclusion: The drying process of Flos Ionicerae only contained deceleration stage. The Page model was the best suitable for predicting moisture ratio. The infrared drying at 35 ℃ compared with drying in the shade was more efficient.

**Key words:** Flos Ionicerae; infrared-forced air drying character; kinetic modeling

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2016)16-0093-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2016.16.010

金银花 (Flos Ionicerae) 为忍冬科植物忍冬 (*Lonicera japonica*) 的干燥花蕾或带初开的花<sup>[1]</sup>。化

学成分研究表明,其富含挥发油、黄酮类、三萜类及有机酸等活性成分<sup>[2-3]</sup>,具有抑菌,抗病毒,解热,抗

收稿日期: 2016-01-22

作者简介: 杜利平 (1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 15165046799@163.com。

\* 通讯作者: 王晓 (1971-), 男, 博士, 研究方向: 中药资源与天然产物研究, E-mail: wxjn1998@126.com。

崔莉 (1983-), 女, 博士, 研究方向: 药食两用资源开发, E-mail: cuili0617@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (81473298); 山东省科技发展计划项目 (2014GSF119031); 山东省自主创新专项子课题 (2013CXK20401)。

炎,保肝,止血,抗氧化,免疫调节等作用<sup>[4-5]</sup>。新鲜金银花含水量高达80%左右,其采后干燥过程是影响其品质的关键环节,为了提高干燥效率、降低能耗以及提高干燥产品质量,对物料的干燥特性研究是有必要的<sup>[6]</sup>。

金银花的传统干燥方法主要有晾晒干燥、阴干干燥、杀青烘干等,存在干燥周期长、品质不稳定、易受气候影响等缺点<sup>[7-8]</sup>,现代干燥技术主要有:红外干燥、微波干燥、冷冻干燥等,微波干燥和冷冻干燥产品品质较好,但成本较高,不适宜普通小型加工单位或单个农户<sup>[9-10]</sup>,而红外干燥成本较低,也是应用较广的现代干燥技术,与传统的干燥方式如阴干干燥相比,具有加热效率高、干燥产品品质好等特点,且操作简便,易于推广。目前金银花的干燥研究主要集中在工艺优化方面<sup>[11-12]</sup>,对其干燥的深入研究相对较少,特别缺乏可指导生产的基础理论研究。因而本研究采用红外鼓风技术对金银花进行干燥,研究不同干燥温度下金银花的干燥特性,建立金银花红外鼓风干燥数学模型,以期能较准确地预测金银花干燥过程中水分变化规律和干燥速率,为金银花干燥加工提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜三青期的金银花 于2015年5月采自山东省分析测试中心院内;绿原酸对照品、新绿原酸对照品、木樨草苷对照品、芦丁对照品、3,4-二咖啡酰奎宁酸对照品、4,5-二咖啡酰奎宁酸对照品 成都曼斯特生物有限公司。

BAS124S 万分之一天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;HF881-2型远箱 吴江华飞电热设备有限公司;Agilent 1120型高效液相色谱仪 美国Agilent公司;NH310色差仪 深圳市三恩时科技有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 湿基含水量测定 将鲜金银花放置于105℃的烘箱中12h,得到金银花初始含水量为80%±2%(湿基含水量)。

1.2.2 红外鼓风干燥过程 用电子天平称取质量为5g新鲜金银花,单层(5mm)平铺放入已工作稳定的红外鼓风干燥箱的托盘。固定风速为1.2m/s。按不同的干燥温度(35、45、55℃)对金银花进行干燥实验,在第1h内每隔15min取一次样进行称量,在第2~3h内每隔20min取一次样进行称量,在后面的干燥时间内每隔30min取一次样。当前、后两次取样测得的质量差小于0.1g时,停止干燥。每次实验作3次平行,取均值。

1.2.3 有效成分测定 分别称取不同温度干燥和阴干的金银花各1g,分别加40mL60%甲醇研磨提取后,置于50mL离心管中超声提取30min,过滤,作为待测液。参考药典2010年版一部金银花中绿原酸含量测定法。色谱条件:色谱柱为Inertsil-ODS-RP(250mm×4.6mm,5μm);流动相:A:0.2%甲酸溶液,B:乙腈;梯度洗脱:0~10min,8%~10%B;

10~20min,10%~15%B;20~30min,15%~15%B;30~40min,15%~25%B;40~50min,25%~30%B;50~51min,30%~100%B;51~60min,100%B;流速1mL·min<sup>-1</sup>;检测波长280nm,柱温25℃,进样量10μL。

对照品制备:分别准确称取0.0020g绿原酸对照品,0.0012g新绿原酸对照品,0.0004g木樨草苷对照品,0.0019g芦丁对照品,0.0011g3,4-二咖啡酰奎宁酸对照品和0.0011g4,5-二咖啡酰奎宁酸对照品。用70%乙醇溶解定容于10mL的容量瓶中,过0.45μm微孔滤膜滤后备用。分别精密吸取对照品2、4、6、8、10、12μL按上述色谱条件进样,测定峰面积。

### 1.3 实验指标计算方法

1.3.1 干基含水率 金银花干燥过程的干燥曲线采用干基含水率随干燥时间变化的曲线表示,不同干燥时刻金银花的干基含水率按式(1)计算:

$$W_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad \text{式(1)}$$

式中: $W_t$ -t时刻试样的干基含水率, $g \cdot g^{-1}$ 干物料; $m_t$ -试样干燥至t时刻的总质量,g; $m_d$ -试样用105℃恒重法干燥测定的干物料质量,g。

1.3.2 水分比 干燥过程中物料的水分比(moisture ratio, $M_R$ )可用来表示物料还有多少水分未被干燥去除,还可以反映物料干燥速率的快慢,计算公式见式(2)<sup>[13]</sup>,其中平衡干基水分含量 $M_e$ 按文献<sup>[14]</sup>的方法确定:

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{式(2)}$$

式中: $M_t$ -t时刻时物料的干基含水量, $g \cdot g^{-1}$ ; $M_e$ -物料干燥平衡时干基水分含量, $g \cdot g^{-1}$ ; $M_0$ -物料的初始干基含水量, $g \cdot g^{-1}$ 。

因金银花的平衡干基含水量 $M_e$ 远小于 $M_t$ 和 $M_0$ ,可将式(2)简化成式(3)进行计算<sup>[15-16]</sup>:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad \text{式(3)}$$

1.3.3 干燥速率U 按照Falade的方法<sup>[17]</sup>计算,即:

$$U_i = \frac{M_i - M_t}{t - i} \quad \text{式(4)}$$

式中: $U_i$ -i时刻样品的干燥速率, $g \cdot (g \cdot \text{min})^{-1}$ ; $M_t$ -i时刻样品干基含水量, $g \cdot g^{-1}$ 。

1.3.4 有效水分扩散系数 $D_{\text{eff}}$  生物制品的干燥过程一般是降速干燥过程,可以用Fick扩散方程进行描述其降速干燥特性。当具有相同初始干基含水率的样品进行干燥实验时,Fick扩散方程的解可以用如下形式来表示<sup>[18]</sup>:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L_0^2} \quad \text{式(5)}$$

式中: $D_{\text{eff}}$ -有效水分扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $L_0$ -物料厚度的一半,m。

在不同的干燥条件下,有效水分扩散系数用实验数据拟合 $\ln MR-t$ 直线方程,根据直线方程的斜率计算 $D_{\text{eff}}$ 。

1.3.5 活化能  $E_a$  有效水分扩散系数  $D_{eff}$  与温度  $T_a$  的相关性遵循 Arrhenius 关系<sup>[19]</sup>, 即

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad \text{式(6)}$$

式中:  $D_0$  - Arrhenius 方程的指数前因子,  $m^2/s$ ;  $E_a$  - 活化能,  $kJ \cdot mol^{-1}$ ;  $R$  - 气体常数,  $kJ \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ ;  $T_a$  - 绝对温度,  $K$ 。

1.3.6 色泽的测定 采用色彩色差仪测定金银花的色泽, 本实验用  $\Delta L$ 、 $\Delta a$ 、 $\Delta b$ 、 $\Delta E$  值代表被测样品的色泽 ( $L$ 、 $a$ 、 $b$ ) 与鲜样的 ( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ) 的色差值<sup>[20]</sup>。色差值 ( $\Delta E$ ) 计算方法如下:

$$\Delta E = [(L-L^*)^2 + (a-a^*)^2 + (b-b^*)^2]^{1/2} \quad \text{式(7)}$$

#### 1.4 干燥动力学数学模型的选择与建立

物料的干燥是一个复杂的过程, 液相扩散理论是固体干燥过程质量传递的基本机理, 过程可用 Fick 方程描述<sup>[18]</sup>。常用的数学模型见表 1<sup>[21]</sup>。

表 1 用于干燥曲线分析的数学模型

Table 1 Mathematical models for drying kinetics

模型序号	模型名称	模型
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
5	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
6	Simplified Fick's diffusion	$MR = a \exp(-ct/L^2)$
7	Modified Page equation-II	$MR = \exp(-c/(t/L^2)^n)$

## 2 结果与分析

### 2.1 干燥温度对金银花红外鼓风干燥特性的影响

金银花薄层干燥的厚度为 4 mm 时, 分别在 35、45、55 °C 的红外鼓风干燥温度下进行实验。由图 1 可知: 不同红外鼓风干燥温度下, 金银花干基含水率均随干燥时间延长呈逐渐下降的趋势。其中温度越高, 含水率降低越快, 干燥耗时越短。干燥温度分别为 35、45、55 °C 条件下, 35 °C 处理时金银花干燥时间最长, 耗时 3150 min, 明显多于其他温度处理, 55 °C 时干燥时间最短, 耗时 450 min。同一红外鼓风干燥温度下, 随着干燥时间的延长, 干基含水率的下降趋势为先快后慢。

从图 2 中由干燥速率随干基含水率的变化可知, 整个干燥除了开始的短暂升速, 主要为降速阶段, 没有明显的恒速阶段。干燥开始后, 不同红外鼓风干燥温度下, 随着热量的传递, 金银花表层水分被快速脱去, 干燥速率很快增加到最大, 干燥后期金银花内部水分的迁移逐渐困难, 干燥进入降速阶段。随着金银花干基含水率的减少, 干燥速率呈逐渐下降趋势。说明在金银花的红外鼓风干燥过程中, 内部水分扩散是主要原因, 直接决定了金银花的干燥速率。实验过程中发现, 当干燥温度高于 45 °C 时, 金银花产品色泽严重变暗, 品质不佳, 所以金银花生产中干燥温度应小于 45 °C。

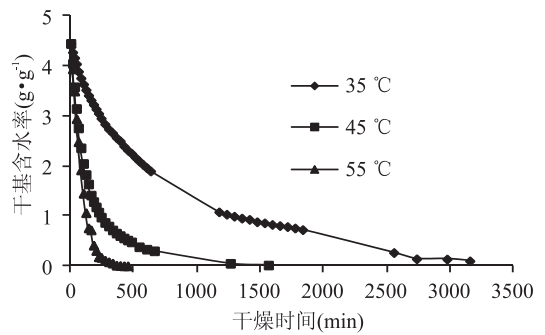


图 1 金银花红外干燥特性曲线

Fig.1 Drying curves of Flos Ionicerae at different infrared temperatures

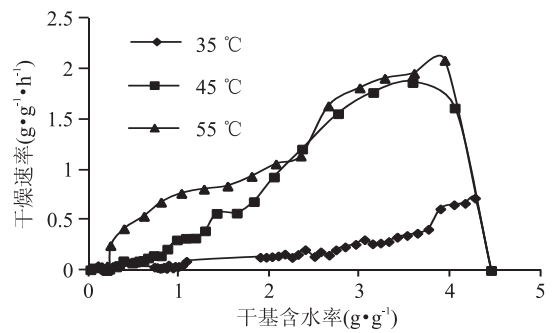


图 2 不同红外温度金银花的干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curves of Flos Ionicerae at different infrared temperatures

### 2.2 金银花干燥动力学数学模型

2.2.1 干燥模型的确定 计算干燥过程的水分比 MR, 用 Origin 9.0 软件对表 1 中的 7 个模型进行非线性回归, 模型中干燥时间  $t$  的单位取为 min。在不同的红外干燥温度  $T$  (°C) 下, 7 个模型的常数及其拟合检验指标  $R^2$ 、 $\chi^2$  和 RMSE 分列于表 2。从表 2 中可以看出, Page 干燥模型的拟合程度最好, 其  $R^2$  值最大, 均值达 0.99655,  $\chi^2$  和 RMSE 值最小, 均值分别为  $2.7607 \times 10^{-4}$ 、0.01561, 所以 Page 模型能够较好地描述金银花红外干燥过程。本结果与金银花真空远红外辐射干燥结果相似<sup>[22]</sup>。

2.2.2 Page 干燥模型的确定 为了解红外鼓风干燥温度对 Page 模型参数  $k$ 、 $n$  的影响, 利用 SPSS 18.0 统计软件分别对模型中待定的  $k$ 、 $n$  与干燥温度 ( $T$ ) 进行一元非线性回归拟合, 得出  $k$ 、 $n$  与  $T$  的关系式为:

$$k = -0.0001T^2 + 0.0123T - 0.257 \quad (R^2 = 1) \quad \text{式(8)}$$

$$n = 0.0021T^2 - 0.1677T + 4.0534 \quad (R^2 = 1) \quad \text{式(9)}$$

$k$ 、 $n$  与  $T$  回归分析的相关系数  $R^2$  都为 1, 说明  $k$ 、 $n$  可以用  $T$  来表示。因此, 金银花远红外干燥动力学数学模型可以表示为:

$$MR = \exp\left[-\left(-0.0001T^2 + 0.0123T - 0.257\right) t^{(0.0021T^2 - 0.1677T + 4.0534)}\right] \quad \text{式(10)}$$

### 2.2.3 不同干燥温度下 Page 干燥动力学模型的验证

不同红外鼓风干燥温度条件下金银花红外鼓风干燥实验 MR 值和 Page 模型预测 MR 值结果比较见图 3。

对 35、45、55 °C 干燥温度下实验 MR 值和经 Page

表2 各种薄层干燥模型的统计结果

Table 2 Statistical results obtained from different thin-layer drying models

模型序号	T(°C)	干燥常数	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
1	35	k = 0.00135	0.97232	0.00234	0.00234
	45	k = 0.00659	0.97517	0.00191	0.03124
	55	k = 0.01119	0.98992	0.00107	0.02131
2	35	k = 0.00559 n = 0.77899	0.99836	$1.38265 \times 10^{-4}$	0.00567
	45	k = 0.01847 n = 0.79659	0.99202	$6.12727 \times 10^{-4}$	0.01532
	55	k = 0.00373 n = 1.23781	0.99927	$7.72196 \times 10^{-5}$	0.00147
3	35	k = 0.00115 a = 0.91688	0.98792	0.00102	0.0418
	45	k = 0.00613 a = 0.94575	0.97821	0.00167	0.04183
	55	k = 0.01185 a = 1.0585	0.99282	$7.58716 \times 10^{-4}$	0.01442
4	35	k = 0.00578 a = 0.17926	0.99562	$3.69813 \times 10^{-4}$	0.01516
	45	k = 0.00467 a = 0.99825	0.87568	0.00954	0.23861
	55	k = 0.01574 a = 1.79739	0.9993	$7.3599 \times 10^{-5}$	0.0014
5	35	a = -0.00089 b = $3.82119 \times 10^{-5}$	0.87622	0.01045	0.42825
	45	a = -0.00284 b = $1.50798 \times 10^{-6}$	0.5015	0.03827	0.95676
	55	a = -0.00688 b = $1.09667 \times 10^{-5}$	0.95499	0.00476	0.00904
6	35	a = 0.9168 c = 0.01933 L = 4.0995	0.98762	0.00104	0.0418
	45	a = 0.94556 c = 0.04955 L = 2.84465	0.9773	0.00174	0.04182
	55	a = 1.05863 c = 0.05944 L = 2.23969	0.99242	$8.00865 \times 10^{-4}$	0.01442
7	35	c = 0.0479 n = 0.77906 L = 3.96986	0.99832	$1.41719 \times 10^{-4}$	0.00567
	45	c = 0.18236 n = 0.79478 L = 4.19765	0.99169	$6.37919 \times 10^{-4}$	0.01531
	55	c = 0.09787 n = 1.23775 L = 3.74251	0.99339	$6.54301 \times 10^{-4}$	0.01178

表3 不同干燥条件下金银花的有效水分扩散系数

Table 3 Values of effective diffusivities obtained for Flos lonicerae at different temperatures

实验号	温度 T(°C)	线性拟合方程	相关系数 $R^2$	水分扩散系数 $D_{eff} (m^2 \cdot s^{-1})$
1	35	$\ln M_R = -2 \times 10^{-5} t - 0.0978$	0.9855	$5.06606 \times 10^{-9}$
2	45	$\ln M_R = -5 \times 10^{-5} t - 0.5106$	0.9606	$1.51982 \times 10^{-8}$
3	55	$\ln M_R = -1 \times 10^{-4} t + 0.0599$	0.963	$7.59909 \times 10^{-8}$

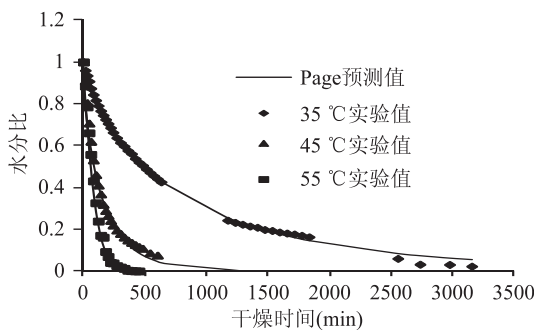


图3 不同干燥条件下 Page 模型预测值与实验值比较

Fig.3 Comparison of the predicted values by the Page model and experimental values of moisture ratio with varying time at different drying conditions

模型预测的 MR 值进行线性回归分析,得到的  $R^2$  值分别为 0.9984、0.9928、0.9993。同时,由图 3 可知,不同红外鼓风干燥温度条件下金银花的模型预测水分比与实验值较吻合,说明 Page 数学模型能够较好地预测金银花干燥过程中水分比随干燥时间的变化,可用来定量描述不同红外鼓风干燥温度下金银花干燥过程的规律。

### 2.3 有效扩散系数和活化能

用 Fick 扩散方程进行计算金银花干燥过程中的有效水分扩散系数。

根据式(5),  $B = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L_0^2}$ , 从而计算得  $D_{eff}$ 。不同

干燥温度下金银花有效水分扩散系数如表 3 所示。由表 3 可知,红外鼓风干燥温度越高,有效水分扩散系数  $D_{eff}$  越大。这是由于随着温度的升高,金银花内部的水分子运动速度加快。在 35~55 °C 内,金银花有效扩散系数为  $5.06606 \times 10^{-9} \sim 7.59909 \times 10^{-8} m^2/s$ 。

将式(6)两边取对数可得:  $\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT_a}$ , 将

$\ln D_{eff}$  与  $1/T_a$  的曲线进行线性拟合,根据拟合直线的斜率计算得到  $E_a$ , 二者的关系如图 4 所示。

不同干燥温度下的直线回归方程为  $Y = -13660X + 25.133 (R^2 = 0.9841)$ , 经计算得其活化能  $E_a$  为 113.569 kJ/mol。

### 2.4 金银花干制品品质

2.4.1 色差的比较 阴干是金银花加工的传统干燥方式,为更好的评价红外干燥产品的质量,将不同温度红外鼓风干燥和阴干方式进行比较研究,对金银花色泽变化的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出,

表5 不同干燥条件对金银花有效成分的影响

Table 5 Effect of different drying condition on the effective constituent of Flos lonicerae

干燥条件	新绿原酸 (mg/g)	绿原酸 (mg/g)	芦丁 (mg/g)	木樨草苷 (mg/g)	3,4-二咖啡酰 奎宁酸(mg/g)	4,5-二咖啡酰 奎宁酸(mg/g)
35 ℃	0.58710	26.16826	1.32505	1.80322	16.40511	1.76081
45 ℃	0.43142	21.38336	0.82322	1.32285	16.06713	1.53277
55 ℃	0.15953	4.09662	0.21493	0.1872	4.34619	0.13608
阴干	0.34210	24.60401	0.69689	1.34217	17.10563	0.38309

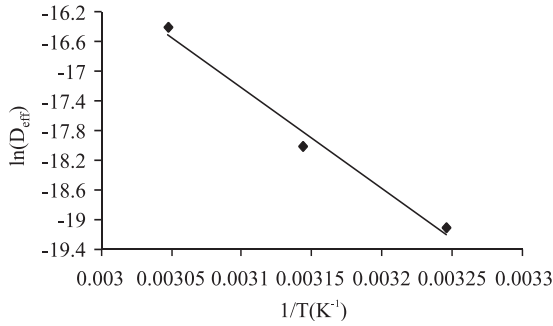


图4 水分有效扩散系数与干燥温度的关系曲线

Fig.4 The relation curves of moisture effective diffusion coefficients and drying temperatures

在干燥温度为35~55 ℃之间,色差值  $\Delta E$  随着温度的升高而增大,说明温度越高对金银花色泽的影响越大。红外干燥温度为35 ℃时,金银花的色差值最小;红外干燥温度为55 ℃时,样品的色差值最大。阴干样品的  $\Delta E$  值介于35~45 ℃之间。所以,35 ℃低温红外鼓风干燥可以更好地保持金银花的色泽,阴干次之。55 ℃温度较高,使金银花变色严重,不宜采用。

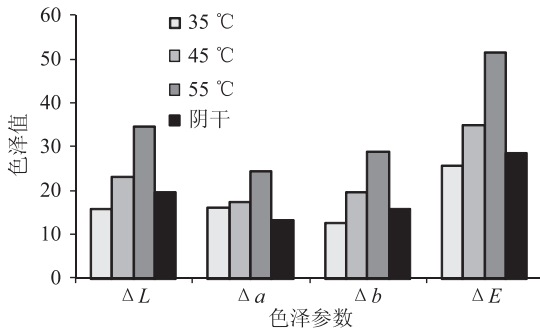


图5 不同干燥条件对金银花色泽的影响

Fig.5 Effect of different drying condition on the color of Flos lonicerae

2.4.2 有效成分的比较 表4为多种标样的标准曲线及  $R^2$ ,通过高效液相色谱法提取的有效成分含量如表5所示。从表5中可以看出,在红外鼓风温度为35 ℃时,除3,4-二咖啡酰奎宁酸以外,其它有效成分均是最高;红外鼓风干燥温度55 ℃时,金银花中的有效成分最低,可能是由于温度过高,破坏了金银花中的有效成分。所以,35 ℃时金银花中的有效成分保留最好,45 ℃和阴干次之,不易采用55 ℃进行干燥。

### 3 结论

3.1 本实验在恒定风速1.2 m/s的条件下,35、45、

表4 多种标样的标准曲线方程及  $R^2$

Table 4 Standard curve equations and  $R^2$  of different standard samples

对照品	标准曲线方程	$R^2$
绿原酸	$y = 1304.7x + 41.736$	0.9998
新绿原酸	$y = 839.17x + 4.33$	0.9999
木樨草苷	$y = 538.48x + 1.2176$	0.9998
芦丁	$y = 557.3x + 0.8548$	0.9998
3,4-二咖啡酰奎宁酸	$y = 1090.8x + 0.0935$	0.9998
4,5-二咖啡酰奎宁酸	$y = 1471.7x + 7.4534$	0.9999

55 ℃金银花红外鼓风干燥的干燥曲线和干燥速率曲线。结果表明,随着温度的升高,干燥速率逐渐增大,干燥时间缩短。金银花的红外鼓风干燥过程主要为降速干燥,内部水分扩散速率决定了干燥速率。

3.2 Page模型对金银花红外鼓风干燥过程的拟合性最好,其  $R^2$  均值为0.99655,  $\chi^2$  和 RMSE 的均值分别为  $2.7607 \times 10^{-4}$  和 0.01561,经验证,模型模拟的干燥过程水分比变化情况与实际测量基本相符。因此可以用Page模型对金银花红外鼓风干燥水分比进行拟合。

3.3 在实验范围内水分有效扩散系数随着干燥温度的提高而增大,其范围为  $5.06606 \times 10^{-9} \sim 7.59909 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ,金银花平均活化能  $E_a$  为 113.569 kJ/mol。

3.4 红外鼓风干燥温度为35 ℃时,金银花的总色差值  $\Delta E$  最小,有效成分含量最高,其次为阴干和45 ℃干燥,55 ℃时温度过高,对金银花的色泽和有效成分影响较大,不易采用。35 ℃红外鼓风干燥比阴干可提高效率节省时间,且产品品质更优,适宜现代化生产加工。

### 参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[S]. 2015年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 221.  
 [2] 夏远, 李弟灶, 裴振昭, 等. 金银花化学成分的研究进展[J]. 中国现代中药, 2013, 14(4): 26-32.  
 [3] 赵琰玲, 尹莲. 金银花化学成分与有效成分提取研究进展[J]. 医药导报, 2007, 26(5): 521-523.  
 [4] 陈继明, 洪超群. 金银花药理作用分析[J]. 亚太传统医药, 2015(5): 43-44.  
 [5] 徐晖. 金银花药理作用研究进展[J]. 湖南中医杂志, 2013, 29(9): 148-150.  
 [6] 徐之平, 赵贤良. 物料的干燥特性研究[J]. 上海机械学院

(下转第102页)

造成的不利影响。

### 3 结论

添加米糠膳食纤维会使面粉粉质发生正比性劣变,而添加食盐能够在提高面粉粉质特性的同时抵消米糠膳食纤维对面粉粉质造成的劣变作用;添加米糠膳食纤维对面粉糊化特性造成不利影响,而添加食盐虽不能提高面粉的糊化特性但能减少米糠膳食纤维对面粉糊化特性造成的不利影响。

### 参考文献

- [1] A Abdul-Hamid, SL Yu. Functional properties of dietary fibre prepared from defatted rice bran [J]. Food Chemistry, 2000, 68 (1): 15-19.
- [2] A Pavlovich-Abril, O Rouzaud-Sández, P Torres, et al. Cereal bran and wholegrain as a source of dietary fibre: technological and health aspects [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2012, 63 (7): 882-892.
- [3] Y Ashida, Y Saito, A Kawato, et al. Physical and chemical properties of dietary fiber prepared from rice bran [J]. Nippon NogeikagakuKaishi - Journal of the Japan Society for Bioscience Biotechnology and Agrochemistry, 1992, 66 (8): 1233-1240.
- [4] H Cheng. Total dietary fiber content of polished, brown and bran types of Japonica and Indica rice in Taiwan: resulting physiological effects of consumption [J]. Nutrition Research, 1993, 13 (1): 93-101.
- [5] C Daou, H Zhang. Functional and physiological properties of total, soluble, and insoluble dietary fibres derived from defatted rice bran [J]. Journal of Food Science and Technology - Mysore, 2014, 51 (12): 3878-3885.
- [6] Y Teng, C Liu, J Bai, et al. Mixing, tensile and pasting

properties of wheat flour mixed with raw and enzyme treated rice bran [J]. Journal of Food Science and Technology - Mysore, 2015, 52 (5): 3014-3021.

- [7] 胡国华, 翟瑞文, 黄绍华. 米糠膳食纤维对面团粉质和烘焙特性影响的研究 [J]. 中国食品添加剂, 2002 (3): 27-30.
- [8] 胡国华. 热稳定化米糠膳食纤维对面团粉质和烘焙特性影响 [J]. 粮食与油脂, 2001 (12): 33-34.
- [9] 刘婷婷, 徐玉娟, 王大为. 米糠高品质膳食纤维在面包生产中的应用 [J]. 食品研究与开发, 2014, 35 (10): 1-5.
- [10] 陈霞, 王文琪, 朱在勤, 等. 食盐对面粉糊化特性及面条品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2015 (2): 98-101.
- [11] 朱在勤, 陈霞. 食盐对面团流变学特性及馒头品质的影响 [J]. 食品研究与开发, 2007 (9): 40-43.
- [12] JW Andersonm, B Pat, JRH Davis, et al. Health benefits of dietary fiber [J]. Nutrition Reviews, 2009, 67 (4): 188-205.
- [13] 马冠生, 周琴, 李艳平, 等. 中国居民食盐消费情况分析 [J]. 中国慢性病预防与控制, 2008 (4): 331-333.
- [14] GB/T 14614-2006, 小麦粉面团的物理特性 吸水量和流变学特性的测定 粉质仪法 [S].
- [15] GB/T 24853-2010, 小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度仪法 [S].
- [16] 刘志伟, 何宁, 赵阳, 等. 粉质仪和拉伸仪在面粉生产中的应用 [J]. 农业科技与装备, 2008 (5): 47-49.
- [17] IL Batey, BM Curtin, SA Moore. Optimization of rapid-viscoanalyser test condition for predicting Asian noodle quality [J]. Cereal Chemistry, 1997, 74 (4): 497-501.
- [18] 郑学玲, 尚加英, 张杰. 面粉糊化特性与面条品质关系的研究 [J]. 河南工业大学学报, 2010, 31 (6): 1-5.
- [19] 张剑, 李梦琴, 任红涛. 小麦粉糊化特性与面条品质相关性研究 [J]. 粮食工程, 2010 (12): 83-85.

(上接第 97 页)

学报, 1994, 16 (3): 45-52.

- [7] 宋健, 张会敏, 石俊英. 金银花最佳产地加工方法——杀青烘干干燥法 [J]. 中药材, 2008, 31 (4): 489-491.
- [8] 熊艳, 高慧敏, 王智民, 等. 金银花不同干燥技术 HPLC 指纹图谱研究 [J]. 中国中药杂志, 2009, 34 (8): 1015-1017.
- [9] 肖宏儒, 王立富, 吴家兵. 微波干燥技术在金银花烘干中的应用研究 [J]. 食品科学, 2001, 22 (5): 41-43.
- [10] 彭菊艳, 龚月桦, 王俊儒, 等. 不同干燥技术对金银花药用品质的影响 [J]. 西北植物学报, 2006, 26 (10): 2044-2050.
- [11] 刘云宏, 朱文学, 刘建学. 金银花真空干燥工艺优化 [J]. 食品科学, 2011 (10): 75-78.
- [12] 吉永奇, 朱文学. 金银花干燥工艺实验研究 [J]. 食品科技, 2008 (6): 79-82.
- [13] Midilli A. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system [J]. International Journal Energy Research, 2001, 25: 715-725.
- [14] 天津大学化工原理教研室. 化工原理 (下册) [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1983: 254-259.
- [15] Akgun N A, Doymaz I. Modeling of olive cake thin-layer drying process [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68: 455-461.

- [16] Thakor N J, Sokhansanj S, Sosulski F W. Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying [J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40: 153-160.
- [17] Falade K O, Abbo E S. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79 (2): 724-730.
- [18] Doungporn S, Poomsa-ad N, Wiset L. Drying equations of Thai Hom Mali paddy by using hot air, carbon dioxide and nitrogen gases as drying media [J]. Food Bioprod Process, 2012, 90, 187-198.
- [19] Wang Zhengfu, Sun Junhong, Liao Xiaojun, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. Food Research International, 2007, 40 (1): 39-46.
- [20] Hawlader M N A, Perera C O, Tian M, et al. Drying of guava and papaya: Impact of different drying methods [J]. Drying Technology, 2006, 24 (1): 77-87.
- [21] Wang Z, Sun J, Chen L F, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. Food Research International, 2007, 40 (1): 39-46.
- [22] 刘云宏, 朱文学, 马海乐. 金银花真空远红外辐射干燥动力学模型 [J]. 农业机械学报, 2010, 41 (5): 105-109.