

基于 Weibull 分布函数的百合真空远红外干燥过程模拟及应用

Siroulation and application on Vacuum Far-Infrared Radiation Drying of Lily Based on Weibull Distribution Function

黄敬 朱文学 刘云宏 罗磊

HUANG Jing ZHU Wen-xue LIU Yun-hong LUO Lei

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471003)

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Louyang, Henan 471003, China)

摘要:为了探究百合的真空远红外辐射干燥的干燥特性,研究红外辐射板温度、干燥室压力和物料厚度三因素对百合真空远红外辐射干燥品质的影响。结果表明:提高辐射板温度、减小干燥室压力和物料厚度,均能明显缩短干燥时间,提高干燥速率;Weibull 分布函数能够很好地模拟百合的真空远红外干燥过程($R^2=0.995\ 3\sim 0.999\ 7$);尺度参数 α 与辐射板温度极显著相关($P<0.01$),并随辐射板温度的升高而降低;形状参数 β 与干燥室压力及物料厚度有关;百合在干燥过程中的水分扩散系数 D_{cal} 在 $0.401\ 3\times 10^{-9}\sim 1.307\ 5\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$,干燥的活化能 E_a 为 $55.130\ 3\text{ kJ/mol}$,小于热风干燥的活化能 $86.911\ 2\text{ kJ/mol}$;降低干燥室压力有利于总酚含量的保持。辐射板温度 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 、干燥室压力 12 kPa 时百合干制品色泽良好。研究结果可为百合真空远红外辐射干燥加工提供理论依据。

关键词:百合;真空远红外干燥;Weibull 分布函数

Abstract: To research the influence factors of each parameter in the Weibull distribution function, with lily at different infrared radiation heater's temperature, different pressure of drying chamber and different thickness of materials being taken as subjects, Weibull distribution function was used to simulate and analyze the dynamic curve of lily. The results showed that Weibull distribution function could simulate the vacuum far-infrared drying process well ($R^2=0.995\ 3\sim 0.999\ 7$); the size parameter α of the model was significantly correlated with the infrared radiation heater's temperature ($P<0.01$). The scale parameter β of the model was related to the pressure of the drying chamber and the materials' thickness, while temperature did not have significant influence on it; the diffusion coefficient of mois-

ture during drying process ranges was between $0.401\ 3\times 10^{-9}\sim 1.307\ 5\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ and the activation energy of lily during vacuum far-infrared drying process was calculated, equal to $55.130\ 3\text{ kJ/mol}$, less than the hot air drying $86.911\ 2\text{ kJ/mol}$. Reducing the pressure of the drying chamber does good to keeping the content of the total phenol; both the infrared lily can keep good color in radiation heater's temperature of $140\text{ }^\circ\text{C}$ and the pressure of the drying chamber of 12 kPa .

Keywords: Lily; Vacuum far-infrared radiation drying; Weibull distribution model

百合(*Lilium brownii*F. E. *Brownii* var. *Viridulum* Baker.)为百合科百合属植物的干燥肉质鳞叶^[1],是药食两用植物,具有较高的药食用价值^[2-3]。新鲜百合极易褐变腐败,不易长期贮藏,而干燥可以减缓腐败微生物的生长和化学反应的发生,从而延长百合的保质期,利于运输和贮藏。百合的传统干燥方法为热风干燥,干燥耗时长且干燥过程中极易发生褐变。干燥时间长短主要取决于物料内部传质传热的难易程度,加快干燥过程中的质热传递速率、降低水分扩散的阻力,将有利于缩短干燥时间、提高干燥速率^[4]。

远红外干燥是一种辐射干燥,其发射的红外线可穿入物料表面 $1\sim 3\text{ mm}$,使高分子和水等物质共振吸收,其内能显著增加,从而达到快速干燥的目的。且红外干燥具有高效、节能、环保等优点^[5-6]。真空干燥技术是利用低压迫使物料中的水分在较低的温度下沸腾而蒸发,可使加工后的物料保持良好的色、香、味,但真空干燥速率慢,排湿困难^[7]。真空远红外辐射干燥结合了真空的无氧和远红外的非接触加热、物料受热均匀的优点,使物料中具有氧敏性和热敏性的有效成分得以保持,并能显著提高干燥速率、缩短干燥时间^[8-9]。目前,已有洋葱^[10]、荔枝^[11]、玉米^[12]的真空远红外辐射干燥的研究,研究结果表明真空远红外干燥技术能较好地保持产

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31171723)

作者简介:朱文学(1967—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: zwx@haust.edu.cn

收稿日期:2017-03-04

品的色泽和品质。目前,未见关于百合真空远红外辐射干燥的相关报道。

Weibull 分布函数具有适用性广、覆盖性强的特点,近年来多被用来描述物料的干燥过程^[13-15]。为提高百合的干燥速率和干制品品质,本研究拟采用真空远红外辐射干燥技术对新鲜百合进行干燥处理,探讨辐射板温度与真空度对百合干燥特性及其总酚含量与色泽的影响,利用 Weibull 分布函数建立百合真空远红外辐射干燥的动力学模型,计算百合干燥过程的有效水分扩散系数和活化能,以期为新鲜百合干燥加工的预测、调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验所用百合为兰州百合,购买于河南省洛阳市栾川县,剥片后根据百合片状大小分为边片、中片、心片,其平均厚度分别为 (3.13 ± 0.12) 、 (2.74 ± 0.08) 、 (2.05 ± 0.11) mm,百合干基含水率采用 105 ℃烘箱法测量,初始干基含水率平均值为 (4.19 ± 0.05) g/g。试验前将百合置于 (4.0 ± 0.5) ℃的冰箱中保存;

没食子酸:HPLC $\geq 98\%$,上海源叶生物科技有限公司;
福林酚试剂:分析纯,上海蓝季科技发展有限公司;
甲醇:分析纯,天津市德恩化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

真空远红外干燥试验装置:自制;
数控超声波清洗仪:KQ-500DE 型,昆山市超声仪器有限公司;
电子分析天平:FA1004 型,美国双杰兄弟集团有限公司;
紫外-可见分光光度计:UV2400 型,上海舜宇恒平科学仪器厂;
色差仪:colori5 型,美国 X-rite 爱色丽公司;
高速离心机:DZ30-32C6 型,上海安亭科学仪器厂。

1.3 方法

新鲜百合鳞茎剥片除去外层、清洗,取大小均匀的鳞片作为试验原料。将试验用的百合于 100 ℃沸水中烫漂 45 s 进行灭酶,随后取出于冷水中冷却并沥干水分。干燥时,每组试验取 200 g 百合,均匀平铺在真空远红外干燥箱中的物料盘上。试验中物料盘距离辐射板 10 cm,百合的干燥方式有 3 种:① 固定干燥室压力为 12 kPa,物料厚度为 2.74 mm,辐射板温度分别为 100、120、140、160、180 ℃;② 固定辐射板温度为 140 ℃,物料厚度为 2.74 mm,干燥室压力分别为 0.8、12.0、40.0 kPa;③ 固定辐射板温度为 140 ℃,干燥室压力为 12 kPa,物料厚度分别为 2.05、2.74、3.13 mm。每次试验前均预热 30 min。每隔 30 min 测一次质量,直至百合干基含水率降到 0.15 g/g 以下时,结束干燥。每组试验重复 3 次。

1.4 试验参数计算

1.4.1 水分比的计算方法 干燥过程中百合含水率按式(1)进行计算:

$$M = \frac{m_t - m_d}{m_d}, \tag{1}$$

式中:

M ——百合含水率,g/g;
 m_t —— t 时刻百合的总质量,g;
 m_d ——绝干物质的质量,g。

1.4.2 Weibull 函数对干燥曲线的模拟 Weibull 分布函数表达方式见式(2)。

$$MR = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right], \tag{2}$$

式中:

MR ——水分比, $\%$;
 α ——尺度参数,min;
 β ——形状参数;
 t ——干燥时间,min。

用决定系数 R^2 、均方根误差 $RMSE$ 、离差平方和 χ^2 来衡量拟合程度,计算公式:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{pre,i}} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}, \tag{3}$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} - MR_{exp,i}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{4}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z}, \tag{5}$$

式中:

$MR_{exp,i}$ ——干燥试验的第 i 个水分比;
 $MR_{pre,i}$ ——模型预测的第 i 个水分比;
 N ——试验数据个数;
 z ——函数中参数的个数。

1.4.3 有效水分扩散系数及活化能的计算 运用 Fick 扩散方程计算干燥过程中有效水分扩散系数时,由于样品的平衡含水率很小,在水分比计算中可忽略不计,所以 $(M_t - M_e)/(M_0 - M_e)$ 可近似为 M_t/M_e 。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \approx \frac{M_t}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2}\right), \tag{6}$$

式中:

MR ——水分比, $\%$;
 M_t —— t 时刻含水率,g/g;
 M_e ——平衡含水率,g/g;
 M_0 ——初始含水率,g/g。

将式(7)左右两端分别求对数,可得:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2}, \tag{7}$$

式中:

MR ——水分比, $\%$;
 D_{eff} ——有效扩散系数, m^2/s ;
 L ——样品厚度,m;
 t ——时间,s。

对 $\ln D_{eff}$ 与 t 进行线性拟合,由拟合斜率 $-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2}$ 计算出有效水分扩散系数 D_{eff} 。

Weibull 分布函数可以估算水分有效扩散系数 D_{cal} ,其对水分迁移特点可不计,计算公式:

$$D_{cal} = \frac{L^2}{\alpha}, \tag{8}$$

式中:

D_{cal} ——有效扩散系数, m^2/min ;

L ——百合的厚度, m ;

α ——尺度参数, min 。

估算水分有效扩散系数 D_{cal} 和水分扩散系数 D_{eff} 的关系式:

$$D_{eff} = \frac{D_{cal}}{R_g}, \tag{9}$$

式中:

R_g ——几何参数。

有效水分扩散系数 D_{eff} 与温度 $(T+273.15)$ 的相关性遵循 Arrhenius 关系, 计算公式为:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right), \tag{10}$$

式中:

D_0 ——Arrhenius 方程的指数前因子, m^2/s ;

E_a ——活化能, kJ/mol ;

R ——气体常数, $kJ/(mol \cdot K)$;

T ——物料干燥温度, $^{\circ}C$ 。

将式(9)代入式(10)中, 然后取对数, 可得到:

$$\ln D_{cal} = \ln R_g + \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T+273.15)}. \tag{11}$$

在不同的干燥温度下, 对 $\ln D_{cal}$ 与 $1/(T+273.15)$ 进行拟合, 根据拟合直线的斜率来计算活化能 E_a 。

1.5 总酚含量的测定

参照文献[16], 修改如下: 取 0.1 mL 样品于试管中, 随后加入 4.9 mL 福林酚试剂(用蒸馏水稀释 10 倍), 反应 30 min, 加入 1.5 mL 质量分数为 20% 的碳酸钠, 在 760 nm 处测量吸光度。用 mg 没食子酸/g 干基表示样品中总酚含量。

1.6 色差值的测定

利用色差仪检测^[17]。在每个待测样品表面上选取 3 个不同点进行检测, 根据测量数据的平均值可得到亮度 (L^*) 值、红绿 (a^*) 值及黄蓝 (b^*) 值。色泽变化通常用色差 ΔE 表示, 按式(12)计算:

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

式中:

ΔE ——样品的色差值;

L^* 、 a^* 、 b^* ——干燥样品的色泽值;

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——鲜样的色泽值。

1.7 数据处理与分析

所有试验均平行 3 次, 利用 Origin 8.5 软件进行数据处理与分析。利用 DPSv 7.05 软件, 采用新复极差法分析显著性差异。

2 结果与分析

2.1 辐射板温度对百合干燥的影响

由图 1 可知, 随着辐射板温度的增加, 百合干燥到所需

含水率耗时逐渐减小, 干燥速率逐渐增大。辐射板温度分别为 100, 120, 140, 160, 180 $^{\circ}C$ 时干燥耗时分别为 660, 570, 480, 300, 240 min, 干燥耗时缩短幅度分别为 13.64%, 27.27%, 54.54%, 63.64%。远红外辐射的能量透过干燥介质作用到被加热干燥的物料, 使其内部分子因吸收远红外辐射能而运动加剧, 物料内部温度因此快速上升, 同时物料内部的水分在温度梯度的推动下, 由内向外移动, 即物料内部水分的热扩散与湿扩散处于正向的最佳状态, 从而加速水分的蒸发与扩散^[18]。由斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知, 远红外辐射板发射能力与其热力学温度的四次方成正比^[19]。因此, 辐射板温度越高, 远红外辐射板的发射能力越强, 传递给物料的热流量越大, 干燥时间越短。张静等^[11] 和徐凤英等^[10] 的真空远红外辐射干燥研究也表明增加辐射强度或升高辐射温度有利于提高干燥速率、缩短干燥耗时, 与本文结果一致。

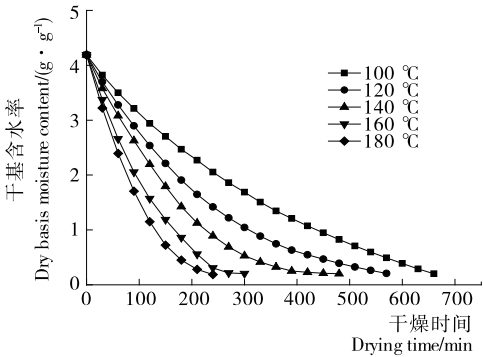


图 1 不同辐射板温度下百合的干燥曲线

Figure 1 Drying curves of lily at different radiation heater's temperature

在物料初始温度相同的情况下, 干燥结束时测量物料的表面温度可知, 远红外辐射板温度分别为 100, 120, 140, 160, 180 $^{\circ}C$ 时对应的物料表面温度分别为 (51.0 ± 0.9) , (55.0 ± 1.2) , (60.0 ± 0.7) , (64.0 ± 0.5) , (70.0 ± 1.0) $^{\circ}C$, 进一步说明升高远红外辐射板温度有利于物料的受热。当辐射板温度升为 180 $^{\circ}C$ 时, 需 240 min 就能达到干燥终点, 但部分干制品边缘开始出现焦化现象, 说明远红外辐射板温度升高能够实现快速干燥, 但会加剧物料的酶促褐变和美拉德反应等生化反应的发生^[20]。当辐射板温度为 100 $^{\circ}C$ 时, 传给物料的热流量减少, 导致干燥速率较低, 干燥耗时需 660 min。即降低板温, 干燥耗时延长。因此辐射板温度最好在 100 ~ 180 $^{\circ}C$ 。

2.2 干燥室压力对百合干燥的影响

由图 2 可知, 随着干燥室压力的降低, 干燥速率增加, 但干燥室压力的影响不如辐射板温度显著。压力从 40 kPa 降到 0.8 kPa 时, 干燥时间从 420 min 缩短到 360 min, 缩短幅度为 14.28%, 即干燥室压力对干燥速率的影响较小, 说明百合真空远红外辐射干燥的过程中内部扩散阻力为水分迁移和汽化的主要影响因素。干燥过程中百合内部的水分先扩散到表面, 在真空条件下, 水的沸点降低, 易变成蒸汽, 再依

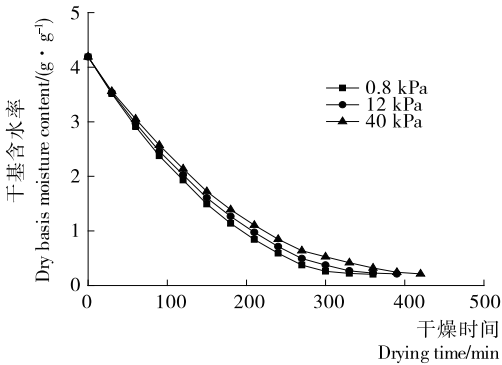


图 2 不同干燥室压力下百合的干燥曲线
Figure 2 Drying curves of lily at different pressure

靠物料内外蒸汽压差进入空间并被抽走^[18]。虽然干燥室压力越低,水的沸点温度越低,越易蒸发,但实际生产中压力越低,干燥时消耗的能量越多,百合干制品的生产成本越高,因此,可确定随后试验的压力范围为 12~40 kPa。

2.3 物料厚度对百合干燥的影响

由图 3 可知,随着物料厚度的增加,干燥速率较小,干燥时间变长。物料厚度越大,温度梯度变化越大,且传热传质路径加大,所以干燥时间也增加,但由于远红外单向辐射加热技术发射的远红外线一般只能穿入物料 1~3 mm^[19],因此真空条件下,透过穿透厚度以下热量传递需通过传导,而物料越厚,热传导的阻力越大,传导速率越低,干燥耗时越长。所以,为有效地利用干燥设备及保持干制品的品质,在百合真空远红外辐射干燥中,要将不同厚度的百合分开干燥。

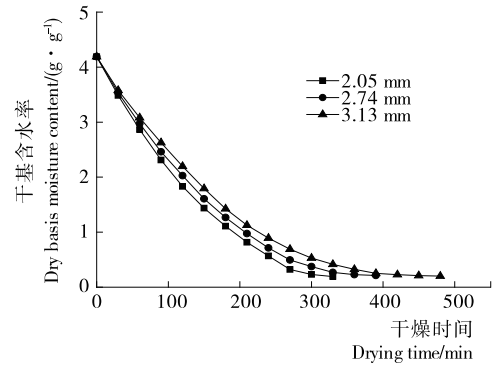


图 3 不同物料厚度下百合的干燥曲线
Figure 3 Drying curves lily bulbs at different material thickness

2.4 基于 Weibull 分布函数的干燥过程模拟

利用 Weibull 函数对百合真空远红外干燥数据进行回归分析,结果见表 1~3。由表 1 可知,函数拟合的决定系数 R^2 的范围为 0.995 3~0.999 7,均方根误差 $RMSE$ 的范围为 $4.71 \times 10^{-4} \sim 8.01 \times 10^{-3}$,离差平方和 χ^2 范围为 $2.62 \times 10^{-5} \sim 3.82 \times 10^{-4}$ 。因此,Weibull 分布函数可准确描述百合的真空远红外干燥过程。

尺度参数 α 的数值约等于干燥过程中水分比降低到 37% 时所用的时间,可以用来表示干燥过程的快慢^[21], α 值

表 1 不同辐射板温度条件下 Weibull 模拟结果[†]

Table 1 Weibull model simulation result at different infrared radiation heater's temperature

辐射板温度/℃	α /min	β	R^2	$RMSE$	χ^2
100	311.794 3	1.159 9	0.995 3	8.01×10^{-3}	3.82×10^{-4}
120	221.734 4	1.108 5	0.9997	4.71×10^{-4}	2.62×10^{-5}
140	151.276 6	1.205 3	0.999 5	1.87×10^{-3}	1.56×10^{-4}
160	118.642 9	1.189 4	0.997 9	1.95×10^{-3}	2.16×10^{-4}
180	95.696 3	1.219 8	0.999 3	5.42×10^{-4}	7.74×10^{-5}

[†] 干燥室压力为 12 kPa,物料厚度为 2.74 mm。

表 2 不同干燥室压力条件下 Weibull 模拟结果[†]

Table 2 Weibull model simulation result at different pressure of drying chamber

干燥室压力/kPa	α /min	β	R^2	$RMSE$	χ^2
0.8	141.851 7	1.230 8	0.998 0	2.22×10^{-3}	2.02×10^{-4}
12	151.276 6	1.205 3	0.999 5	1.87×10^{-3}	1.56×10^{-4}
40	163.363 5	1.175 6	0.999 1	1.05×10^{-3}	8.06×10^{-5}

[†] 辐射板温度为 140 ℃,物料厚度为 2.74 mm。

表 3 不同物料厚度条件下 Weibull 模拟结果[†]

Table 3 Weibull model simulation result at different thickness of materials

物料厚度/mm	α /min	β	R^2	$RMSE$	χ^2
2.05	137.243 8	1.215 9	0.997 7	2.40×10^{-3}	2.39×10^{-4}
2.74	151.276 6	1.205 3	0.999 5	1.87×10^{-3}	1.56×10^{-4}
3.13	167.752 4	1.183 9	0.998 8	1.75×10^{-3}	1.16×10^{-4}

[†] 辐射板温度为 140 ℃,干燥室压力为 12 kPa。

越小,干燥时间越短。由表 1 可知,不同辐射板温度条件下 α 在 95.696 3~311.794 3,且辐射板温度与 α 值极显著相关 ($P < 0.01$),辐射板温度越高 α 值越小,当辐射板温度从 100 ℃ 升到 180 ℃ 时, α 值减少 69.3%,说明增加辐射板压力可以明显提高干燥速率;由表 2 可知,干燥室压力从 40 kPa 降到 0.8 kPa 时, α 值从 163.363 5 min 降到 141.851 7 min,可见尺度参数 α 值随着干燥室压力的降低而减小,但干燥室压力对 α 值影响不显著 ($P > 0.1$);由表 3 可知,物料厚度减小, α 值也相应减小,且物料厚度对 α 值影响不显著 ($P > 0.1$)。

形状参数 β 与物料在传质过程中开始阶段的速率有关。由表 1~3 可知,本研究中 β 值的范围为 1.108 5~1.230 8, β 值稍大于 1,说明百合真空远红外干燥存在前期延滞阶段;不同参数对 β 值影响均不显著 ($P > 0.1$),且无明显规律,说明不同辐射板温度、干燥室压力和物料厚度下百合真空远红外辐射干燥具有相同的水分扩散机制。这与白峻文等^[13]和刘云宏等^[22]的研究结果一致。

2.5 百合真空远红外干燥过程中有效水分扩散系数和干燥活化能的计算

干燥过程中水分的迁移过程较为复杂,通过试验方法测量和计算干燥过程中的有效水分扩散系数 D_{eff} ,对描述物料干燥特征及优化干燥工艺有重要的意义。常用的 Fick 第二定律计算有效水分扩散系数仅限于始终处于降速的物料干燥过程,因此限制了其使用范围。而 Weibull 分布函数应用在干燥中可估算出过程中的有效水分扩散系数,且不用考虑物料水分迁移的特点。Madamba 等^[23]认为大多数食品材料的有效扩散系数在 $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。有效水分扩散系数是表征干燥过程中水分迁移速度快慢的参数,其值越大,表明水分扩散能力越强、干燥速率越快。不同干燥条件下百合真空远红外辐射干燥过程的 D_{eff} 和 D_{cal} 值见表 4~6。由表 4~6 可知, D_{eff} 值在 $0.522\,2 \times 10^{-10} \sim 1.686\,6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, D_{cal} 值在 $0.401\,3 \times 10^{-9} \sim 1.307\,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,且辐射板温度与 D_{eff} 、 D_{cal} 极显著相关($P < 0.01$),辐射板温度越高,有效水分扩散系数越大,与刘云宏^[20]研究结果一致。物料厚度对 D_{eff} 影响不显著,对 D_{cal} 影响显著($P < 0.05$)。而干燥室压力减小 D_{eff} 、 D_{cal} 均增大,但影响不大。

干燥活化能表示物料在干燥过程中脱除单位水分所需的能量。干燥活化能可反应物料干燥难易程度、估算干燥能耗。有研究^[24]表明,干燥活化能与物料的品种、成分和组织状态等有关,而与干燥方式和干燥参数等外界条件无关。百合真空远红外干燥的活化能 E_a 见图 4。由式(11)计算出其

表 4 百合干燥过程中不同辐射板温度下的有效水分扩散系数和干燥活化能[†]

Table 4 Effective moisture diffusion coefficient and activation energy of lily drying at different infrared radiation heater's temperature

辐射板温度/ ℃	$D_{\text{eff}}/$ ($10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$D_{\text{cal}}/$ ($10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$E_a/$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)
100	0.522 2	0.401 3	55.130 3
120	0.657 9	0.564 3	
140	1.053 6	0.827 1	
160	1.372 6	1.054 6	
180	1.686 6	1.307 5	

† 干燥室压力为 12 kPa,物料厚度为 2.74 mm。

表 5 百合干燥过程中不同干燥室压力下的有效水分扩散系数和干燥活化能[†]

Table 5 Effective moisture diffusion coefficient and activation energy of lily drying at different pressure of drying chamber

干燥室压力/kPa	$D_{\text{eff}}/$ ($10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$D_{\text{cal}}/$ ($10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
0.8	1.162 0	0.882 1
12.0	1.053 6	0.827 1
40.0	0.938 0	0.765 9

† 辐射板温度为 140 ℃,物料厚度为 2.74 mm。

表 6 百合干燥过程中不同物料厚度下的有效水分扩散系数和干燥活化能[†]

Table 6 Effective moisture diffusion coefficient and activation energy of lily drying at different thickness of materials

物料厚度/mm	$D_{\text{eff}}/$ ($10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$D_{\text{cal}}/$ ($10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
2.05	0.688 6	0.510 3
2.74	1.053 6	0.827 1
3.13	1.161 9	0.973 3

† 辐射板温度为 140 ℃,干燥室压力为 12 kPa。

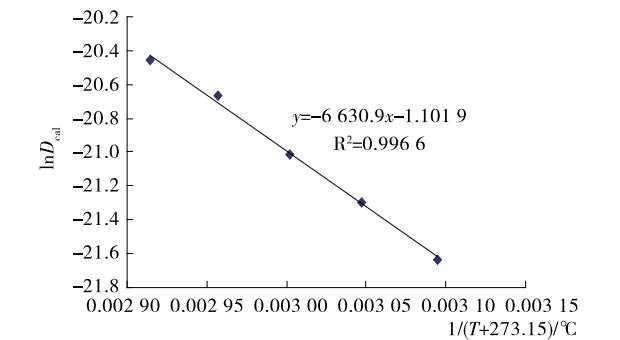


图 4 水分扩散系数与干燥温度的关系曲线

Figure 4 Relation curves of calculated moisture diffusion coefficient and drying temperatures

活化能为 55.130 3 kJ/mol($R^2 = 0.996\,6$),小于百合热风干燥的活化能 86.911 2 kJ/mol。出现这种现象的原因,可能是不同的干燥方法及工艺对百合的组织状态、内部结构等有不同的影响,从而间接影响干燥活化能。

2.6 总酚含量的变化

酚类化合物是百合鳞茎主要的有效成分之一,具有保护组织免受氧化作用的损害、增强免疫功能、抗衰老、抑制胆固醇升高等作用,在干燥过程中应尽可能地提高总酚的保持率。不同辐射板温度及干燥室压力下百合片干燥产品中总酚含量见图 5。由图 5 可知,总酚含量的范围在 1.82~2.72 mg/g。固定物料厚度为 2.74 mm,在相同的干燥室压力下,总酚含量随辐射板温度的升高呈现先增加后减小的趋势。在新鲜百合中,细胞组织中的酚类物质较稳定,在真空远红外干燥过程中,辐射板温度较低(100 ℃)时,较长的干燥时间导致酚类物质发生氧化分解;随着辐射板温度的升高,干燥时间明显缩短,酚类物质发生氧化和降解的时间也相应减少,最终表现为含量升高;但当辐射板温度过高(160, 180 ℃)时,高温易导致酚类物质的变性,也不利于酚类物质的保持。从图 5 还可以看出,辐射板温度一定时,干燥室压力降低一定程度上有利于百合干制品中酚类物质的保留,但干燥室压力对百合干制品中酚类物质的保留影响不显著。

2.7 色泽的变化

干燥后的色度对农产品有很实际意义^[25]。在不同辐射板温度、干燥室压力条件下百合色泽参数见表 7~8,其中

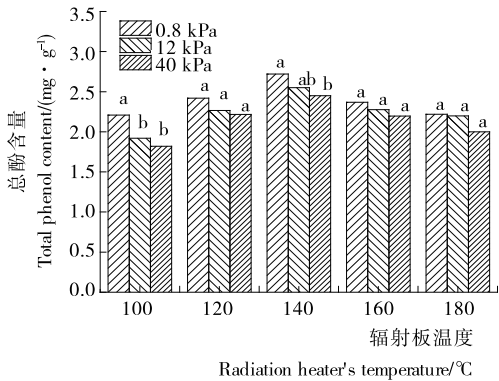


图 5 不同辐射板温度及干燥室压力下百合的总酚含量
Figure 5 Total phenol content of lily at different radiation heater's temperature and pressure

表 7 不同辐射板温度条件下百合色泽参数[†]
Table 7 Color parameter of lily at different radiation heater's temperature

辐射板温度/℃	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	Δ <i>E</i>
100	77.72±0.66 ^c	-0.92±0.14 ^c	1.73±0.09 ^d	19.91±0.66 ^d
120	83.36±0.05 ^a	-0.18±0.16 ^b	4.26±0.29 ^c	25.75±0.08 ^a
140	77.77±0.03 ^c	-0.10±0.02 ^b	4.40±0.20 ^c	20.26±0.06 ^d
160	81.72±0.64 ^b	0.03±0.03 ^b	6.57±0.01 ^b	24.56±0.63 ^b
180	78.00±0.11 ^c	1.43±0.03 ^a	10.44±0.06 ^a	22.40±0.07 ^c

[†] 干燥室压力为 12 kPa,物料厚度为 2.74 mm;不同小写字母表示差异显著(*P*<0.05)。

表 8 不同干燥室压力条件下百合色泽参数[†]
Table 8 Color parameter of lily at different pressure

干燥室压力/kPa	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	Δ <i>E</i>
0.8	77.37±0.17 ^b	-0.98±0.06 ^c	1.77±0.15 ^c	19.57±0.17 ^b
12	77.77±0.03 ^a	-0.10±0.02 ^b	4.40±0.20 ^b	20.26±0.06 ^a
40	76.80±0.08 ^c	1.56±0.03 ^a	8.40±0.40 ^a	20.51±0.22 ^a

[†] 辐射板温度为 140 ℃,物料厚度为 2.74 mm;不同小写字母表示差异显著(*P*<0.05)。

L^{*} 值反映百合干亮度值,*a*^{*} 值反映百合干的红绿度,*b*^{*} 值反映百合干的黄蓝度,在一定范围内 *L*^{*} 值越大越好,*a*^{*}、*b*^{*} 值越小越好。由表 7 可知,干燥室压力一定时,辐射板温度对百合的亮度 *L*^{*} 值有显著影响,辐射板温度为 120 ℃时,*L*^{*} 值最大;由表 8 可知,辐射板温度一定时,亮度 *L*^{*} 值随干燥室压力的增加呈现先增大后减小的趋势,干燥室压力为 0.8 kPa 和 12 kPa 时亮度 *L*^{*} 值差异显著,40 kPa 时 *L*^{*} 值较小。随着辐射板温度和干燥室压力的上升,*a*^{*} 值和 *b*^{*} 值都逐渐增大,可能是百合中多酚氧化酶引起的酶促褐变反应速率随温度的升高而增加,所以温度越高,褐变越严重,同时辐射板温度及干燥室压力的增加,也促进非酶褐变,加剧百合的褐变。Δ*E* 为总色差,其值越小表示干制品色泽与鲜样色泽差异越小,由表 7 可知,当干燥室压力相同时,辐射板温度

为 100 ℃和 140 ℃时 Δ*E* 值较小且差异不显著;由表 8 可知,当辐射板温度相同时,干燥室压力升高,Δ*E* 值逐渐增大,但 12 kPa 和 40 kPa 时总色差 Δ*E* 差异不显著。所以在百合的真空远红外干燥过程中,辐射板温度在 140 ℃左右,干燥室压力在 12 kPa 左右时,可保证百合干制品色泽良好。

3 结论

(1) 干燥速率与红外辐射板温度及干燥室压力密切相关,升高辐射板温度与降低干燥室压力均可加快物料内部水分扩散,从而提高物料干燥速率,缩短干燥时间。

(2) 通过 Weibull 分布函数对干燥曲线进行模型拟合,拟合的决定系数 *R*² 值均在 0.995 以上,*RMSE*、*χ*² 值均较小,说明 Weibull 分布函数能够较好地预测百合的真空远红外干燥过程中水分比变化规律。尺度参数 *α* 随着辐射板温度的升高和干燥室压力的降低而相应减小,形状参数 *β* 随干燥室压力的降低和物料厚度的减小而增大,但对其的影响均不显著。估算水分扩散系数 *D*_{ca1} 在 0.401 3×10⁻⁹~1.307 5×10⁻⁹ m²/s,有效水分扩散系数 *D*_{eff} 在 0.522 2×10⁻¹⁰~1.686 6×10⁻¹⁰ m²/s,且均随辐射板温度的升高、干燥室压力的降低及物料厚度的减小而增大,根据阿伦尼乌斯公式计算出在干燥室压力为 12 kPa、物料厚度为 2.74 mm 时,百合真空远红外干燥的活化能为 55.130 3 kJ/mol,小于热风干燥的活化能(86.911 2 kJ/mol)。

(3) 在相同干燥室压力和物料厚度下,随着辐射板温度的升高,总酚含量基本呈现先升高后下降的趋势,在相同辐射板温度下,降低干燥室压力会提高总酚含量。辐射板温度为 140 ℃、干燥室压力为 12 kPa 时总色差 Δ*E* 值较小。本试验为百合的真空远红外干燥模型提供理论支撑,同时也可为其干燥条件的选择和干燥设备设计提供依据。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[S]. 2010 版. 北京: 中国药典科技出版社, 2010: 123.

[2] 杜弢, 陈红刚, 连中学, 等. 中药材百合生产现状及发展对策[J]. 中药材, 2011, 34(2): 165-168.

[3] 李卫民, 孟宪纾, 俞腾飞, 等. 百合的药理作用研究[J]. 中药材, 1990(6): 31-35.

[4] BARZEGAR M, ZARE D, STROSHINE R L. An integrated energy and quality approach to optimization of green peas drying in a hot air infrared-assisted vibratory bed dryer[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 166: 302-315.

[5] SENEVIRATHNE M, KIM S H, KIM Y D, et al. Effect of far-infrared radiation drying of citrus press-cakes on free radical scavenging and antioxidant activities[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 168-176.

[6] XU C, LI Y, YU H. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 136(6): 42-47.

[7] 陈君琛, 杨艺龙, 翁敏敏, 等. 即食杏鲍菇热风-真空联合干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2014(14): 331-338.

(下转第 82 页)

tobacco and tobacco smoke[M]. [S. l.]: CRC Press, 2013: 96-98.

[3] 谢剑平. 烟草香料技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 131-134.

[4] 徐晓燕, 孙五三, 王能如. 烟草多酚类化合物的合成与烟叶品质的关系[J]. 中国烟草科学, 2003, 24(1): 3-5.

[5] 鲍辰卿, 邱家丹, 许春平, 等. 美拉德反应产物在烤烟型卷烟中的增香效果[J]. 轻工科技, 2015(8): 131-133.

[6] 张敦铁. Maillard 反应中间体的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 6-7.

[7] 王红瑞, 谢媛媛, 梁琼麟, 等. 高效液相色谱—串联质谱法同时测定烟草中 5 种 Amadori 化合物[J]. 色谱, 2013, 31(12): 1 189-1 193.

[8] ASSAR S H, MOLONEY C, LIMA M, et al. Determination of N ϵ -(carboxymethyl) lysine in food systems by ultra performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Amino Acids, 2009, 36(2): 317-326.

[9] 贾春晓, 修龙飞, 牟定荣, 等. 液相色谱—串联质谱法同时测定烟草中 6 种 Amadori 化合物[J]. 质谱学报, 2015, 36(1): 45-51.

[10] 杨金英, 牟定荣, 梅勇, 等. HPLC-ELSD 法测定烟草中的脯氨酸 Amadori 化合物[J]. 分析试验室, 2010, 29(8): 97-100.

[11] 周跃飞, 谢金栋, 曾强, 等. 混合型卷烟加工工艺流程的理论及探讨[J]. 海峡科学, 2009(12): 10-13.

[12] 李辉, 盛科, 王亮, 等. 滚筒一气流式烘丝机的设计应用[J]. 烟草科技, 2014(5): 14-17.

[13] 寇明钰, 李东亮, 冯广林, 等. 气流烘丝参数对卷烟主流烟气 7 种有害成分释放量的影响[J]. 烟草科技, 2015(1): 49-53.

[14] 田忠, 陈闯, 许宗保, 等. 制丝关键工序对细支卷烟燃烧温度及主流烟气成分的影响[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(6): 19-26.

[15] 周跃飞, 罗靖, 林志平, 等. 烘丝工艺对卷烟烟丝中酚类物质含量的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(3): 36-38.

[16] 欧亚非, 鞠华波, 贾春晓, 等. 1-*L*-苯丙氨酸-1-脱氧-*D*-果糖热解产物分析[J]. 烟草科技, 2011(4): 41-46.

[17] 唐明, 朱会艳, 陈永明, 等. 不同产区烤烟叶中挥发性香气物质的比较分析[J]. 广东农业科学, 2012, 39(21): 44-46.

[18] CHIDA M, SONE Y, TAMURA H. Aroma characteristics of stored tobacco cut leaves analyzed by a high vacuum distillation and canister system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(26): 7 918-7 924.

[19] PURKIS S W, MUELLER C, INTORP M. The fate of ingredients in and impact on cigarette smoke[J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49(12): 3 238-3 248.

[20] 林顺顺. 基于风格特征剖析的上部烟叶降低烟碱提质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 45-47.

[21] 刘彩云, 刘洪祥, 常志隆, 等. 烟草香气品质研究进展[J]. 中国烟草科学, 2010, 31(6): 75-78.

[22] 彭洁, 曾世通, 胡军, 等. 葡萄糖/脯氨 Maillard 反应模型及其产物的烟草加香评价[J]. 香料香精化妆品, 2014(3): 11-16.

[23] 王玉华, 褚建忠, 徐丙升, 等. 烤烟自然醇化过程美拉德反应产物变化及与感官质量的关系[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(4): 85-90.

[24] 韩晓哲, 丁永乐, 何澎, 等. 湖南与河南烤烟烟叶中挥发性致香物质的对比分析[J]. 中国农业学报, 2008, 24(10): 137-140.

[25] 叶协锋, 李佳颖, 张腾, 等. 烤烟苯丙氨酸类致香物质与土壤理化性状的典型相关分析[J]. 土壤, 2013, 45(2): 277-284.

(上接第 76 页)

[8] 刘云宏, 朱文学, 罗磊, 等. 响应面法优化金银花真空远红外辐射干燥工艺[J]. 食品科学, 2012(14): 100-104.

[9] 张秦权, 文怀兴, 袁越锦. 远红外联合低温真空干燥设备研究与设计[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 157-160.

[10] 肖旭霖. 洋葱真空远红外薄层干燥模型[J]. 食品科学, 2002, 23(5): 40-43.

[11] 徐风英, 李长友, 陈震. 荔枝在不同红外辐射源下真空干燥优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 147-150.

[12] 张静, 李占勇, 董鹏飞, 等. 玉米红外低温真空干燥试验[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 187-189.

[13] 白峻文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 278-285.

[14] CORZO O, BRACHO N, PEREIRA A, et al. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices[J]. Food Science & Technology, 2009, 41(10): 2 023-2 028.

[15] 尹慧敏, 聂宇燕, 沈瑾, 等. 基于 Weibull 分布函数的马铃薯丁薄片热风干燥特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 252-258.

[16] AN Ke-jing, ZHAO Dan-dan, WANG Zheng-fu, et al. Comparison of different drying methods on Chinese ginger (Zingiber officinale Roscoe): Changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure.[J]. Food Chemistry, 2015, 197(Pt B): 1 292-1 300.

[17] SAMOTICHA J, WOJDYŁO A, LECH K. The influence of different the drying methods on chemical composition and antioxidant activity in chokeberries[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 484-489.

[18] 胡洁. 果蔬远红外真空干燥技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 4.

[19] 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.

[20] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 277-286.

[21] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 基于 Weibull 分布函数猕猴桃切片微波真空干燥过程模拟及应用[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 129-135.

[22] 刘云宏, 苗帅, 罗磊, 等. 基于威布尔分布函数的金银花气调干燥实验研究[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 31-35.

[23] MADAMBA P S, DRISCOLL R H, BUCKLE K A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(1): 75-97.

[24] 方小明, 张晓琳, 王军, 等. 荷花粉真空脉动干燥特性和干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 287-295.

[25] BAI Jun-wen, SUN Da-wen, XIAO Hong-wei, et al. Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20(4): 230-237.