

黄芪切片热风干燥特性及动力学模型研究

Study on hot-air drying characteristics and kinetics model of Astragalus slice

张 记 彭桂兰 张雪峰

ZHANG Ji PENG Gui-lan ZHANG Xue-feng

张宏图 张 欣 杨 玲

ZHANG Hong-tu ZHANG Xin YANG Ling

(西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

(College of Engineering and Technology, Southwestern University, Chongqing 400715, China)

摘要:分别研究热风温度(40, 50, 60 °C)、风速(0.4, 0.8, 1.2 m/s)和切片厚度(3, 6, 9 mm)对黄芪切片热风干燥曲线、有效水分扩散系数、复水比和色差的影响, 利用Weibull分布函数对试验数据进行拟合, 并计算黄芪切片热风干燥活化能。结果表明:黄芪切片热风干燥属于降速干燥过程, 热风温度和切片厚度对干燥时间影响较大, 干燥过程服从Weibull分布函数($R^2 = 0.995 \sim 0.999$);有效水分扩散系数为 $0.321 \times 10^{-7} \sim 1.178 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 热风温度和切片厚度对其影响较大, 呈正相关性;干燥活化能为 56.49 kJ/mol, 说明干燥操作较易实现;黄芪切片干制品复水比为 2.02~2.43, 随热风温度的升高而减小, 随切片厚度的增加而增大;色差为 1.96~7.01, 随热风温度和风速的增加而增大, 随切片厚度的增加而减小。

关键词:黄芪;热风干燥;模型;Weibull分布函数;复水比

Abstract: This study aims to investigate the hot air drying characteristics of Astragalus slices, and the kinetics of the drying process. The hot air drying experiment was conducted with hot air temperature, air velocity and slice thickness as experimental factors. The hot air temperatures are 40, 50 and 60 °C with the air velocities of 0.4, 0.8 and 1.2 m/s, and slice thicknesses are 3, 6 and 9 mm, respectively. The effects of them on the hot air drying curves, effective moisture diffusivity coefficient, rehydration performance and color difference of Astragalus slices were investigated respectively. The Weibull distribution was used to fit ex-

perimental data and the activation energy of hot air drying of Astragalus slice was calculated. The result shows that the drying process of the slices follows Weibull distribution ($R^2 = 0.995 \sim 0.999$), and thus has a falling drying rate which indicates that the hot air temperature and the slice thickness have a great influence on the drying time. The effective moisture diffusivity coefficients found in this study ranged from 0.321×10^{-7} to $1.178 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, greatly affected by the hot air temperature and slice thickness. The drying activation energy is 56.49 kJ/mol, which shows that drying process is relatively easy to operate. The rehydration ratios of Astragalus slice dry products are between 2.02 and 2.43, which have a negative correlation with hot air temperature and a positive correlation with slice thickness. The color difference ΔE is between 1.96 and 7.01, which increases with increasing hot air temperature and air velocities and decreases with increasing slice thickness. This study can provide a theoretical basis for the research and application of Astragalus hot air drying technology.

Keywords: Astragalus; hot air drying; models; Weibull distribution function; rehydration ratio

黄芪通常指豆科植物膜荚黄芪[Astragalus membranaceus (Fisch.) Bge.]或蒙古黄芪[Astragalus membranaceus (Fisch.) Bge. var. mongholicus (Bge.) Hsiao]的干燥根, 又名黄耆、戴椹等, 是常见的药食同源中药材之一^[1-2]。研究表明, 黄芪富含黄芪皂苷、黄酮、多糖、氨基酸等有效成分以及多种微量元素^[3-4], 具有补气升阳、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老等作用, 已被广泛应用于保健、医疗等领域^[5-7]。新鲜收获的黄芪水分含量较高, 难贮藏, 易腐烂变质, 干燥处理可降低其水分含量, 延长其储存期, 减少资源浪费和经济损失。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31301575)

作者简介:张记, 男, 西南大学在读硕士研究生。

通信作者:彭桂兰(1966—), 女, 西南大学教授, 博士。

E-mail: pgl602@163.com

收稿日期:2020-05-14

晋小军等^[3]研究了不同干燥和包装方法对黄芪浸出物、黄芪甲苷含量的影响。杨俊红等^[5]研究了微波、热风、真空和冷冻干燥对黄芪多糖含量的影响。孙庆运等^[6]对黄芪真空干燥特性、动力学模型以及黄芪的吸湿特性进行了研究。蔡向杰等^[7]利用响应面法优化了黄芪多糖真空带式干燥工艺参数。魏庆霞等^[8]发现真空冷冻干燥可较好保留黄芪有效成分,提高干制品品质。热风干燥是一种常见的干燥技术,具有易操作、成本低、适应性强等特点,已被广泛用于山楂^[9]、白萝卜^[10]、番木瓜^[11]、当归^[12]、百合^[13]等果蔬和药材的干燥处理。但有关黄芪热风干燥,尤其是热风干燥特性以及干燥动力学模型的研究报道较少。

试验拟以黄芪切片为研究对象,利用热风干燥技术进行干燥处理,分别研究热风温度、风速和切片厚度对其干燥过程的影响;利用 Weibull 分布函数对黄芪切片热风干燥过程中的水分变化规律进行模拟和预测,计算黄芪切片热风干燥过程的有效水分扩散系数、活化能;测定不同干燥条件下干燥样品的复水比和色差。旨在为黄芪切片热风干燥的模拟、预测和工艺优化等提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料

新鲜黄芪:蒙古黄芪品种,选择粗细均匀(直径 9~13 mm)、无腐烂霉变和物理损伤的黄芪根于(4±1)℃冰箱中冷藏储存,按文献^[14]的直接干燥法测得其初始含水率为 55.57%,甘肃陇西人工培育中心。

1.1.2 主要仪器与设备

薄层干燥实验台:BC-2 智能型,长春吉大仪器股份有限公司;

风速测量仪:SUMMIT 565 型,精度 0.1 m/s,韩国森美特仪器仪表有限公司;

电子天平:METILER TOLEDO AL 204 型,精度 0.000 1 g,上海梅特勒一托利仪器有限公司;

电子天平:JA5002 型,精度 0.01 g,上海精天电子仪器有限公司;

控电王:PC-2101A 型,慈溪市源创电器有限公司;

中药材切片机:M-Q1 型,曲阜市宇晨机械设备有限公司;

电热数显恒温水浴锅:HH-2 型,上海力辰邦西仪器科技有限公司。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 热风干燥工艺流程

新鲜黄芪→筛选→去杂→洗净→去表面水分→切片→干燥→封装

1.2.2 热风干燥试验 试验前 30 min 打开薄层干燥试

验台,将试验用筛网置于其中预热。称取(50.0±0.1) g 试样均匀平铺于筛网(10 cm×10 cm)中,按表 1 的参数设置依次进行热风干燥试验。每隔 5 min 记录一次试样质量,直至试样含水率小于安全含水率(11%)时结束试验^[3,6]。每组试验重复 3 次。

表 1 试验设计与参数

Table 1 Design for the experiments with run conditions included

试验号	热风温度/℃	风速/(m·s ⁻¹)	切片厚度/mm
1	40	0.8	6
2	50	0.8	6
3	60	0.8	6
4	50	0.4	6
5	50	0.8	6
6	50	1.2	6
7	50	0.8	3
8	50	0.8	6
9	50	0.8	9

1.2.3 指标测定与方法

(1) 干基含水率:按式(1)计算干基含水率^[12-13,15]。

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g}, \tag{1}$$

式中:

M_t —— t 时刻试样的干基含水率,g/g;

m_t —— t 时刻试样的质量,g;

m_g ——试样干物质质量,g。

(2) 水分比:按式(2)计算水分比。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \tag{2}$$

式中:

MR ——水分比;

M_t —— t 时刻试样的干基含水率,g/g;

M_e ——试样平衡干基含水率,g/g;

M_0 ——试样初始干基含水率,g/g。

由于 M_e 远小于 M_0 和 M_t ,在实际应用中可忽略不计,因此可采用简化公式[式(3)]计算水分比^[16-17]。

$$MR = \frac{M_t}{M_0}. \tag{3}$$

(3) 干燥速率:按式(4)计算干燥速率^[18-19]。

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t}, \tag{4}$$

式中:

DR ——干燥速率,g/(g·min);

$M_{t+\Delta t}$ —— $t+\Delta t$ 时刻试样的干基含水率,g/g;

M_t —— t 时刻试样的干基含水率,g/g;

t ——干燥时间, min。

1.3 薄层干燥数学模型

Weibull 分布函数表达式^[11,14,20]:

$$MR = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right], \quad (5)$$

式中:

MR ——水分比;

α ——尺度参数(表示干燥过程中的速率常数,约为物料脱去 63% 水分所需时间), min;

β ——形状参数(与物料水分迁移机制有关);

t ——干燥时间, min。

1.4 有效水分扩散系数计算

Fick 扩散方程可用来描述大多数生物材料的降速干燥过程^[21]。其方程表达式^[22-23]:

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}, \quad (6)$$

式中:

MR ——水分比;

t ——干燥时间, min;

L ——黄芪切片厚度的 1/2, mm;

D_{eff} ——有效水分扩散系数, m^2/s 。

由式(6)可知, $\ln MR$ 与时间 t 呈线性关系, 对其进行线性回归分析得到直线斜率 k , 按式(7)计算有效水分扩散系数 D_{eff} 。

$$D_{\text{eff}} = \frac{|k| \times 4L^2}{\pi^2}. \quad (7)$$

1.5 活化能计算

有效水分扩散系数 D_{eff} 与干燥温度 T 之间的关系可以用 Arrhenius 等来描述, 其表达式^[24]:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left[- \frac{E_a}{R(T+273.15)} \right], \quad (8)$$

式中:

D_0 ——指数前因子, m^2/s ;

E_a ——活化能, kJ/mol ;

R ——理想气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T ——物料干燥温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.6 复水比测定

根据文献^[25], 取不同干燥条件下的干燥样品(5.0 ± 0.5) g, 于 60 $^{\circ}\text{C}$ 、300 mL 蒸馏水中水浴 5 h, 取出沥干, 用吸水纸擦除其表面残余水分, 称重。按式(9)计算复水比。

$$RR = \frac{m_r}{m_d}, \quad (9)$$

式中:

RR ——复水比;

m_d 、 m_r ——复水前后试样的质量, g。

1.7 色差测定

使用 Huruter Lab UltraScan Pro 全自动多功能色差仪进行测量, 参照 ASTM E 308—99 标准, 按式(10)计算色差值。

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_{\text{exp}}^* - L_{\text{fre}}^*)^2 + (a_{\text{exp}}^* - a_{\text{fre}}^*)^2 + (b_{\text{exp}}^* - b_{\text{fre}}^*)^2}, \quad (10)$$

式中:

L_{exp}^* 、 L_{fre}^* ——亮度试验值和对照值;

a_{exp}^* 、 a_{fre}^* ——红绿轴试验值和对照值;

b_{exp}^* 、 b_{fre}^* ——黄蓝轴试验值和对照值。

1.8 数据处理

使用 Excel 2016 软件对数据进行统计和初步处理, 使用 OriginPro 2017 软件对模型进行非线性曲线拟合分析, 使用 SPSS 25 软件进行线性回归分析和方差分析。以决定系数 R^2 、卡方 χ^2 和均方根误差 $RMSE$ 为评价指标, 评价模型拟合效果。 R^2 值越大, χ^2 和 $RMSE$ 值越小, 说明模型拟合效果越好。各指标分别按式(11)~(13)计算^[23-24]。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{\text{pre}} - MR_{\text{exp},i})^2}, \quad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - z}, \quad (12)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

式中:

$MR_{\text{exp},i}$ 、 $MR_{\text{pre},i}$ ——水分比试验值和预测值;

N ——试验所测得数据组数;

z ——模型中参数个数。

2 结果与分析

2.1 热风干燥动力学曲线

2.1.1 热风温度对黄芪切片干燥过程的影响 当风速为 0.8 m/s、切片厚度为 6 mm 时, 不同热风温度条件下黄芪切片热风干燥动力学曲线如图 1 所示。由图 1 可知, 不同热风温度条件下的试样水分比曲线差异明显, 热风温度越高, 水分比曲线越陡峭, 试样失水速率越快, 干燥至安全含水率所用时间越短。热风温度为 40, 50, 60 $^{\circ}\text{C}$ 下所需干燥时间分别为 255, 115, 70 min, 与 40, 50 $^{\circ}\text{C}$ 相比, 热风温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 下所需干燥时间分别缩短了 72.5%, 39.1%, 可能是由于温度升高, 增加了空气与物料之间的温湿度差, 使两者间传热传质速率加快, 从而缩短干燥时间^[11,15]。热风温度为 40, 50, 60 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥速率最大值分别为 0.022 98, 0.031 12, 0.057 14 g/(g · min), 各干燥速率曲线变化趋势基本相同; 干燥开始后, 干燥速率急剧增加, 并于 5 min 时达最大值, 然后随着干燥时间的增加而

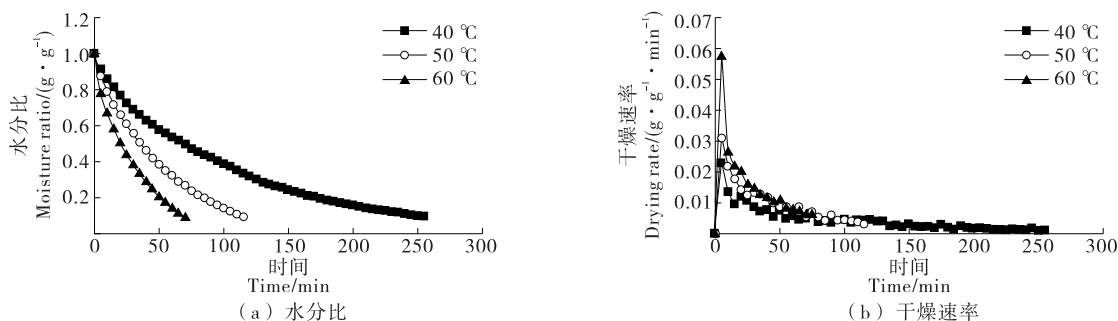


图1 不同热风温度下黄芪切片的干燥特性曲线

Figure 1 Drying curves of Astragalus slices under different hot air temperatures

逐渐减小,整个干燥过程无明显恒速干燥阶段,表明扩散是控制黄芪切片干燥过程中水分迁移的主导机制,与黎斌等^[26]的结果类似。因此,热风温度对黄芪切片热风干燥过程影响显著。

2.1.2 风速对黄芪切片干燥过程的影响 当热风温度为 50 °C、切片厚度为 6 mm 时,不同风速条件下黄芪切片热风干燥动力学曲线如图 2 所示。由图 2 可知,不同风速条件下的试样水分比曲线差异不明显,其中风速为 0.4, 0.8 m/s 的水分比曲线接近重合。风速为 0.4, 0.8, 1.2 m/s 下干燥至安全含水率所用时间分别为 130, 115, 95 min,与 0.4, 0.8 m/s 相比,风速 1.2 m/s 下所需干燥时间分别缩短了 26.9%, 17.4%。风速为 0.4, 0.8, 1.2 m/s 下各干燥速率曲线差异不明显,变化趋势基本相同,均在

5 min 时达到最大值,分别为 0.027 31, 0.030 19, 0.038 49 g/(g·min),整个干燥过程只有短暂的升速阶段和较长的降速阶段,无明显恒速干燥阶段,属于典型的降速干燥过程。因此,风速对黄芪切片热风干燥过程影响不显著。

2.1.3 切片厚度对黄芪切片干燥过程的影响 当热风温度为 50 °C、风速为 0.8 m/s 时,不同切片厚度条件下黄芪切片热风干燥动力学曲线如图 3 所示。由图 3 可知,不同切片厚度条件下的试样水分比曲线差异明显,切片厚度越薄,水分比曲线越陡峭,试样失水速率越快,干燥至安全含水率所需时间越短。切片厚度为 3, 6, 9 mm 下干燥至安全含水率所需时间分别为 45, 115, 160 min;与 6, 9 mm 相比,切片厚度 3 mm 下所需干燥时间分别缩短了

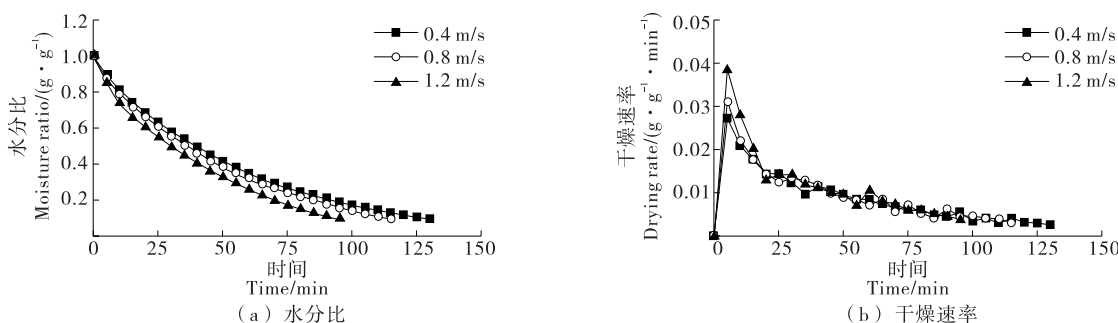


图2 不同风速下黄芪切片的干燥特性曲线

Figure 2 Drying curves of Astragalus slices under different air velocities

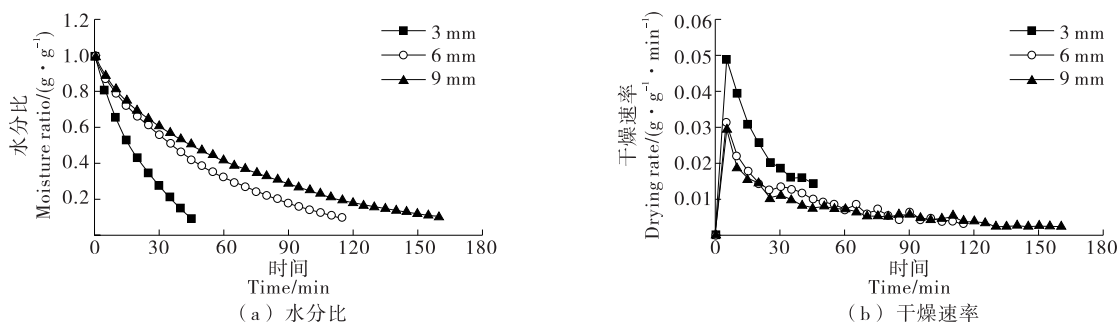


图3 不同切片厚度下黄芪切片的干燥特性曲线

Figure 3 Drying curves of Astragalus slices under different slice thicknesses

60.9%, 71.9%, 可能是由于厚度减小, 水分迁移至表面的距离缩短, 同时厚度减小增加了物料的比表面积, 使物料与空气间的质热交换加快, 从而加快整个干燥过程, 缩短了干燥时间^[19]。切片厚度为 3, 6, 9 mm 下干燥速率均于 5 min 时达最大值, 分别为 0.046 87, 0.031 12, 0.029 38 g/(g·min), 切片厚度 3 mm 下的干燥速率曲线整体处于 6, 9 mm 的上方, 差异明显, 整个干燥过程主要以降速阶段为主, 无明显恒速干燥阶段。因此, 切片厚度对黄芪切片热风干燥过程影响显著。

2.2 基于 Weibull 分布函数模拟黄芪切片热风干燥过程

由表 2 可知, 各干燥条件下的决定系数 R^2 为 0.995 1~0.999 2, 均方根 RMSE 为 0.001 38~0.004 82, 卡方 χ^2 为 $0.555 8 \times 10^{-4} \sim 3.487 0 \times 10^{-4}$, 说明 Weibull 分布函数对试验数据的拟合效果很好, 对不同干燥条件下黄芪切片的水分比变化规律具有较高的模拟精度。

2.2.1 尺度参数 α 由表 2 可知, 当风速和切片厚度一定时, 热风温度从 40 °C 增加至 60 °C, α 值从 101.242 减少至 29.627, 减少了 70.74%; 当热风温度和风速一定时, 切片厚度从 9 mm 减少至 3 mm, α 值从 66.873 减少至 22.717, 减少了 66.03%; 说明热风温度和切片厚度对 α 值影响较大, 提高热风温度或减小切片厚度可显著缩短干燥时间, 加快干燥进程, 与图 1、3 的结果一致。而当热风温度和切片厚度一定时, 风速从 0.4 m/s 增加至 1.2 m/s, α 值从 55.909 减少至 42.162, 减少了 24.59%, 说明风速对 α 值影响较小, 增大风速对干燥时间的改变不明显, 反而风速增大会增加干燥能耗, 因此在不影响干燥品质前提下可选择较低的风速干燥黄芪。

2.2.2 形状参数 β 研究^[27]表明, 形状参数 β 与干燥过程中物料内部水分迁移机制有关。由表 2 可知, 不同干燥条件下的形状参数 β 为 0.3~1.0, 说明黄芪切片热风干燥属于降速干燥过程, 主要受物料内部水分扩散控制,

与图 1 结论一致, 说明 Weibull 分布函数可以用来描述黄芪切片热风干燥过程。

2.2.3 Weibull 模型的建立 以尺度参数 α 和形状参数 β 为因变量, 热风温度 T 、风速 W 和切片厚度 L 为自变量。按式 (14)、(15) 对 Weibull 模型参数进行 1 次多项式拟合^[20,28-29]。

$$\alpha = a_0 + a_1 \ln T + a_2 \ln W + a_3 \ln L, \quad (14)$$

$$\beta = b_0 + b_1 \ln T + b_2 \ln W + b_3 \ln L, \quad (15)$$

式中:

a_0, a_1, a_2, a_3 和 b_0, b_1, b_2, b_3 ——待求多项式系数。

结合表 2 的相关数据, 利用 OriginPro 2017 软件进行多元线性回归分析得:

$$\alpha = 685.311 - 181.130 \ln T - 10.091 \ln W + 41.125 \ln L, \quad (16)$$

$$\beta = 1.758 - 0.254 \ln T - 0.024 \ln W + 0.095 \ln L. \quad (17)$$

将式 (16)、(17) 代入式 (5) 得到黄芪切片热风干燥的 Weibull 模型方程为:

$$MR = \exp\{-[t / (685.311 - 181.130 \ln T - 10.091 \ln W + 41.125 \ln L)]^{1.758 - 0.254 \ln T - 0.024 \ln W + 0.095 \ln L}\}. \quad (18)$$

2.2.4 Weibull 模型验证 为了检验所得模型的准确性, 追加 3 组验证试验, 分别为组 1: 热风温度 45 °C、风速 0.8 m/s、切片厚度 4 mm; 组 2: 热风温度 50 °C、风速 0.6 m/s、切片厚度 6 mm; 组 3: 热风温度 55 °C、风速 1.0 m/s、切片厚度 8 mm。使用 SPSS 25 软件对各组水分比试验值和模型预测值进行方差分析, 由图 4 可知, 试验值与预测值间无显著差异 ($P_1 = 0.784 8, P_2 = 0.838 2, P_3 = 0.918 1 > 0.05$), R^2 分别为 0.988 7, 0.995 9, 0.996 8。上述结果表明水分比的试验值和模型预测值吻合度较高, 所建立的 Weibull 模型可以较好地描述黄芪切片热风干燥过程中的水分变化规律。

2.3 有效水分扩散系数分析

利用 SPSS 25 软件对 $\ln MR$ 与时间 t 进行线性回归分析, 根据式 (7) 计算有效水分扩散系数 D_{eff} 。不同干燥条件下的有效水分扩散系数 D_{eff} 如表 3 所示。由表 3 可

表 2 Weibull 模型拟合结果

Table 2 Model fitting results under different drying conditions

试验号	模型参数		评价指标		
	α	β	R^2	RMSE	$\chi^2 / (\times 10^{-4})$
1	101.242	0.968 7	0.998 3	0.001 38	0.986 2
2	51.309	0.953 7	0.998 1	0.002 33	1.302 2
3	29.627	0.859 9	0.995 1	0.004 82	3.487 0
4	55.909	0.951 5	0.999 2	0.001 44	0.555 8
5	51.309	0.953 7	0.998 1	0.002 33	1.302 2
6	42.162	0.923 0	0.995 5	0.003 91	3.061 4
7	22.717	0.876 9	0.996 9	0.002 89	2.758 0
8	51.309	0.953 7	0.998 1	0.002 33	1.302 2
9	66.873	0.984 4	0.997 6	0.003 84	1.474 2

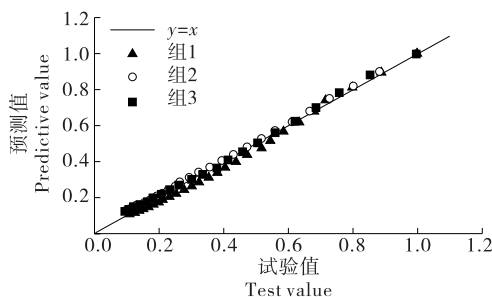


图 4 黄芪热风干燥水分比试验值和模型预测值对比
Figure 4 Experimental value and model prediction value of moisture ratio of Astragalus hot air drying

表 3 不同干燥条件下的有效水分扩散系数

Table 3 Effective diffusivity coefficient under different drying conditions

试验号	线性回归方程	决定系数 R^2	有效水分扩散系数
			$D_{\text{eff}}/(\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	$\ln MR = -0.008\ 79t - 0.083\ 98$	0.999	0.321
2	$\ln MR = -0.019\ 52t + 0.001\ 27$	0.997	0.712
3	$\ln MR = -0.032\ 30t - 0.026\ 32$	0.994	1.178
4	$\ln MR = -0.017\ 54t - 0.013\ 69$	0.999	0.640
5	$\ln MR = -0.019\ 52t + 0.001\ 27$	0.997	0.712
6	$\ln MR = -0.023\ 58t - 0.003\ 81$	0.995	0.860
7	$\ln MR = -0.050\ 10t + 0.091\ 55$	0.980	0.457
8	$\ln MR = -0.019\ 52t + 0.001\ 27$	0.997	0.712
9	$\ln MR = -0.013\ 80t - 0.056\ 74$	0.998	1.133

知,不同干燥条件下黄芪切片的有效水分扩散系数 D_{eff} 为 $0.321 \times 10^{-7} \sim 1.178 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。热风温度从 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速从 0.4 m/s 增至 1.2 m/s ,切片厚度从 3 mm 增至 9 mm ,相应的 D_{eff} 值分别增加了 $3.67, 1.34, 2.48$ 倍,说明热风温度和切片厚度对 D_{eff} 影响较大,风速对其影响较小。热风温度越高, D_{eff} 值越大,与马铃薯^[15]、当归^[12]、花椒^[26]等物料研究结果类似。切片厚度越薄, D_{eff} 值越小,可能是由于厚度较薄的物料失水速率较快,其表面容易硬化,阻碍了内部水分向表面迁移,从而导致水分有效扩散系数较小,与白冰玉等^[30]的结果类似。

2.4 活化能分析

由式(8)可知, $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/(T+273.15)$ 呈线性关系,通过线性回归分析计算得黄芪切片热风干燥的活化能 E_a 为 56.49 kJ/mol ,处于一般农产品、果蔬等的活化能范围之内^[16],说明黄芪热风干燥的难易程度处于合理范围,干燥操作较易实现。

2.5 黄芪切片热风干燥品质分析

2.5.1 干燥条件对复水比的影响 由图 5 可知,当切片厚度为 $9, 3\text{ mm}$ 时,复水比出现最大值和最小值,分别为 $2.43, 2.02$,可能是由于 3 mm 厚度的试样失水速率较快,容易发生皱缩,使其组织结构被破坏,从而导致其复水性

能受到影响。复水比随风速的增加先增后减,风速为 0.8 m/s 的复水比在所有风速条件下最大,为 2.35 。复水比与热风温度呈负相关性,与切片厚度呈正相关性,与试样干燥速率随干燥条件的变化趋势相反,说明复水比受试样干燥速率快慢的影响,较快干燥速率得到的干制品复水比较低。

2.5.2 干燥条件对色差的影响 由图 6 可知,热风温度、风速和切片厚度对色差值均有影响。当热风温度为 $40, 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,色差出现最小值和最大值,分别为 $1.96, 7.01$ 。随着热风温度和风速的增加,黄芪切片色差值不断增大,可能是由于热风温度和风速的增加会促进黄芪中糖类物质的分解,发生美拉德反应或焦糖化反应生成较多棕色产物,使得干制品色差值较大^[31]。但随着切片厚度的增加,色差值逐渐减小,可能是由于厚度较大的试样升温 and 失水速率均较慢,使得其表面温度在干燥前中期低于热风温度,减缓了非酶促褐变反应的发生速率,从而获得色差值较小的干制品。

3 结论

(1) 黄芪切片热风干燥属于降速干燥过程,主要受物料内部水分扩散控制。热风温度和切片厚度对干燥过程影响显著,风速对干燥过程影响不显著;热风温度越高、

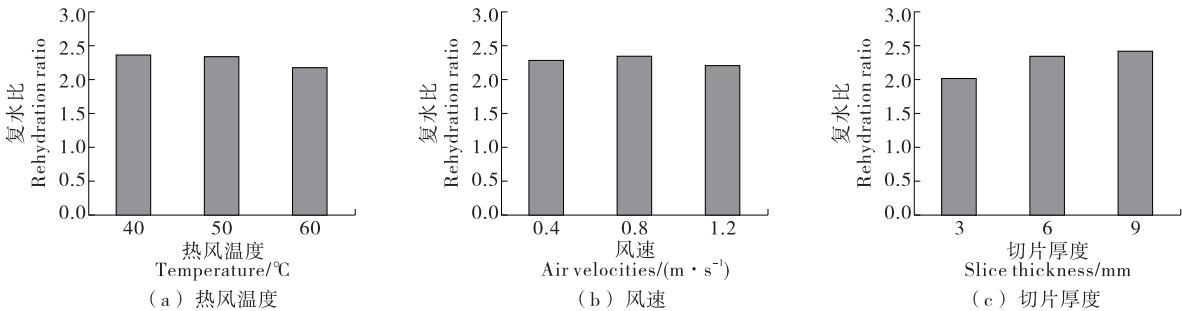


图 5 黄芪切片的复水比

Figure 5 Rehydration ratio of Astragalus slices under different drying conditions

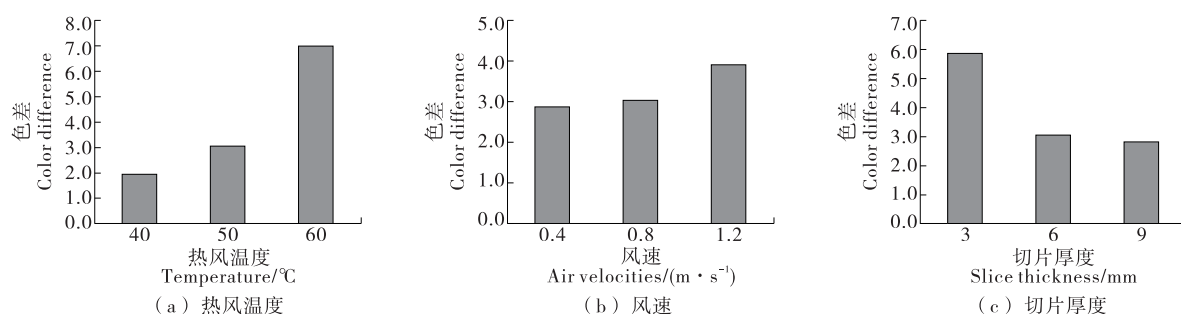


图 6 黄芪切片的色差

Figure 6 Color difference of Astragalus slices under different drying conditions

切片厚度越薄,干燥速率越快,干燥至安全含水率所需时间越短。

(2) 利用 Weibull 分布函数对不同干燥条件下的试验数据进行拟合,其决定系数为 0.995 1~0.999 2,均方根为 0.001 38~0.004 82,卡方为 $0.555\ 8 \times 10^{-4} \sim 3.487\ 0 \times 10^{-4}$,拟合效果较好。不同干燥条件下,其尺度参数为 22.717~101.242,主要受热风温度和切片厚度的影响;形状参数均 <1 。验证试验结果表明,水分比试验值与模型预测值吻合度较高,无显著性差异。因此,Weibull 分布函数可以用来描述黄芪切片热风干燥过程。

(3) 不同干燥条件下黄芪切片的有效水分扩散系数为 $0.321 \times 10^{-7} \sim 1.178 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,随热风温度和切片厚度的增加而增大,风速的改变对其影响较小。黄芪切片热风干燥活化能为 56.49 kJ/mol,处于常见物料的活化能范围之内,说明黄芪切片热风干燥难易程度适中,干燥操作较易实现。

(4) 不同干燥条件下黄芪切片的复水比为 2.02~2.43,随风速的增大先增后减,与热风温度呈负相关性,与切片厚度呈正相关性,与干燥速率随干燥条件的变化趋势相反,说明试样干燥速率会对其复水比造成影响,较快干燥速率得到的干制品复水比较低,品质较差。不同干燥条件下黄芪切片的色差为 1.96~7.01,随热风温度和风速的增加而增大,随切片厚度的增加而减小。

试验仅对黄芪切片热风干燥特性、动力学模型及部分干燥品质进行了研究,后续可进一步研究其最优干燥参数或干燥条件对其功能性成分含量的影响。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010: 302-303.
- [2] 李志庸, 张国骏. 本草纲目大辞典[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2007: 129-130.
- [3] 晋小军, 王刚, 李明升, 等. 干燥与包装方法对黄芪品质的影响[J]. 甘肃农业科技, 2013(11): 49-51.
- [4] 吴娇, 王聪. 黄芪的化学成分及药理作用研究进展[J]. 新乡医学院学报, 2018, 35(9): 755-760.
- [5] 杨俊红, 张恒春, 邸倩倩, 等. 不同干燥方法对黄芪提取物品质的影响[J]. 干燥技术与设备, 2007(5): 225-229.
- [6] 孙庆运, 王光辉, 王德成. 黄芪切片真空干燥特性与吸湿特性的研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 76-81, 89.
- [7] 蔡向杰, 屈云萍, 冯玉康, 等. 黄芪多糖的真空带式干燥工艺研究[J]. 食品工业, 2017, 38(5): 109-113.
- [8] 魏庆霞, 崔清亮. 黄芪真空冷冻干燥试验研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2015: 23-24.
- [9] 郭婷, 吴燕, 陈益能, 等. 冻融预处理对山楂热风干燥特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 68-71, 82.
- [10] 黄珊, 王修俊, 沈畅萱. 白萝卜薄层热风干燥特性及其数学模型[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 137-143, 193.
- [11] 陈健凯, 王绍青, 林河通, 等. 番木瓜片的热风干燥特性与动力学模型[J]. 热带作物学报, 2017, 38(12): 2 366-2 375.
- [12] 沙秀秀, 朱邵晴, 段金殿, 等. 基于 Weibull 分布函数的当归干燥过程模拟及其动力学研究[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(11): 2 117-2 122.
- [13] 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.
- [14] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [15] 尹慧敏, 裴宇燕, 沈瑾, 等. 基于 Weibull 分布函数的马铃薯丁薄层热风干燥特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 252-258.
- [16] DOYMAZ I. Hot-air drying and rehydration characteristics of red kidney bean seeds[J]. Chemical Engineering Communications, 2016, 203(5): 599-608.
- [17] 张乐, 赵守涣, 王赵改, 等. 板栗微波真空干燥特性及干燥工艺研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 206-210.
- [18] WANG Dong, DAI Jian-wu, JU Hao-yu, et al. Drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer[J]. International Journal of Food Engineering, 2015, 11(5): 701-711.
- [19] DOYMAZ I. Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2011, 35(2): 280-289.

(下转第 56 页)

评价最高、天山湖盐次之、加碘食用盐最差。后续将增加食用盐样品数量及种类,以建立更加完善的感官品质评价模型。

参考文献

- [1] 刘贺,章启鹏,徐婧婷,等.减盐相关产品研究进展及开发现状[J].中国调味品,2017,42(11):175-180.
- [2] 易宇文,刘阳,彭毅秦,等.东坡肘子风味电子鼻分析与感官评价相关性探究[J].食品与发酵工业,2018,44(1):238-244.
- [3] 刘敏,谭书明,张洪礼,等.不同品种大米口感品质分析[J].食品科学,2018,39(15):88-92.
- [4] 贾洪锋,邓红,何江红,等.电子舌在食品检测中的应用研究[J].中国调味品,2013,38(8):12-17.
- [5] WANG Jun, XIAO Hong. Discrimination of different white chrysanthemum by electronic tongue[J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 50(5): 986-992.
- [6] 李玉珍,肖怀秋.模糊数学评价法在食品感官评价中的应用[J].中国酿造,2016,35(5):16-19.
- [7] VIVEK K, SUBBARAO K V, ROUTRAY W, et al. Application of fuzzy logic in sensory evaluation of food products: A comprehensive study[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 13: 1-29.
- [8] 金雪花,郭顺堂,陈辰,等.基于模糊感官评价的大豆品种对豆浆加工品质影响分析[J].食品科学,2019,40(17):59-64.
- [9] 朱文政,李辉,唐建华,等.模糊综合评判法在烹饪菜品感官评价中的应用[J].食品科技,2012(4):106-108.
- [10] 王兴亚,庞广昌,李阳,等.电子舌与真实味觉评价的差异性研究[J].食品与机械,2016,32(1):213-216.
- [11] 王琼,徐宝才,于海,等.电子鼻和电子舌结合模糊数学感官评价优化培根烟熏工艺[J].中国农业科学,2017,50(1):161-170.
- [12] 魏永义,郭明月,尹军杰,等.模糊数学综合感官评价调味料酒的应用研究[J].中国调味品,2015,40(10):52-54.
- [13] 易宇文,陈刚,彭毅秦,等.基于智能仿生仪的发酵小米椒感官品质评价模型[J].食品与机械,2018,34(9):54-57.
- [14] 史庆瑞,国婷婷,殷廷家,等.基于电子舌检测的橙汁贮藏品质研究[J].食品与机械,2017,33(11):137-142.
- [15] ZHI Rui-cong, ZHAO Lei, SHI Bo-lin, et al. New dimensionality reduction model (manifold learning) coupled with electronic tongue for green tea grade identification[J]. European Food Research and Technology, 2014, 239: 157-167.
- [16] BENJAMIN O, GAMRASNI D. Electronic tongue as an objective evaluation method for taste profile of pomegranate juice in comparison with sensory panel and chemical analysis[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9: 1 726-1 735.
- [17] 杨松,伍玉茜,陈敏,等.不同品种莲藕加工脆片适宜性评价[J].食品与机械,2019,35(7):199-203.
- [18] 刘森.智能人工味觉分析方法在几种食品质量检验中的应用研究[D].杭州:浙江大学,2012:24-26.
- [19] 沈燕萍,董浩,罗东辉,等.基于主成份分析法的鱼翅干制品品质评价模型的构建[J].现代食品科技,2016,32(1):210-217.
- [20] 段丽丽,戴得蓉,周凌洁,等.不同酒花葡萄酒香气主成分分析及聚类分析[J].食品与机械,2019,35(9):9-14.
- [21] JIANG Hui-yuan, WANG Wan-xiang. Application of principal component analysis in synthetic appraisal for Multi-objects decision-making[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2004, 28(3): 467-470.
- [22] DOYMAZ I. Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 88(2): 124-132.
- [23] 黎斌,彭桂兰,罗伟传,等.基于 Weibull 分布函数的花椒真空干燥动力学特性[J].食品与发酵工业,2017,43(11):58-64.
- [24] 张明玉,任亚敏,张彩芳.玛咖切片的微波真空干燥特性及品质特征[J].现代食品科技,2019,35(6):230-236.
- [25] 李武强,万芳新,罗燕,等.当归切片远红外干燥特性及动力学研究[J].中草药,2019,50(18):4 320-4 328.
- [26] 薛广,李敏,关志强.基于 Weibull 函数的超声渗透罗非鱼片真空微波干燥模拟[J].食品与发酵工业,2020,46(1):157-165.
- [27] 白冰玉,傅鑫程,丁胜华,等.切片厚度对苦瓜片热风干燥特性及相关品质的影响研究[J].农产品加工,2019(17):1-5.
- [28] 高静静,冯作山,白羽嘉.真空冷冻和热风干燥对哈密瓜片品质的影响[J].保鲜与加工,2020,20(3):78-84.

(上接第 28 页)

- [20] CORZO O, BRACHO N, PEREIRA A, et al. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 2 023-2 028.
- [21] OLURIN T O, ADELEKAN A O, OLOSUNDE W A. Mathematical modelling of drying characteristics of blanched field pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) slices[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2012, 14(4): 246-254.
- [22] DOYMAZ I. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(9): 1 909-1 915.
- [23] SOBUKOLA O P, DAIRI O U, ODUNEWU A V. Convective hot air drying of blanched yam slices [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2008, 43(7): 1 233-1 238.
- [24] DOYMAZ I, KOCAYIGIT F. Drying and rehydration behaviors of convection drying of green peas[J]. Drying Technology, 2011, 29(11): 1 273-1 282.

- [25] DOYMAZ I. Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 88(2): 124-132.
- [26] 黎斌,彭桂兰,罗伟传,等.基于 Weibull 分布函数的花椒真空干燥动力学特性[J].食品与发酵工业,2017,43(11):58-64.
- [27] 张明玉,任亚敏,张彩芳.玛咖切片的微波真空干燥特性及品质特征[J].现代食品科技,2019,35(6):230-236.
- [28] 李武强,万芳新,罗燕,等.当归切片远红外干燥特性及动力学研究[J].中草药,2019,50(18):4 320-4 328.
- [29] 薛广,李敏,关志强.基于 Weibull 函数的超声渗透罗非鱼片真空微波干燥模拟[J].食品与发酵工业,2020,46(1):157-165.
- [30] 白冰玉,傅鑫程,丁胜华,等.切片厚度对苦瓜片热风干燥特性及相关品质的影响研究[J].农产品加工,2019(17):1-5.
- [31] 高静静,冯作山,白羽嘉.真空冷冻和热风干燥对哈密瓜片品质的影响[J].保鲜与加工,2020,20(3):78-84.