

基于 Weibull 分布函数的马铃薯丁薄层热风干燥特性

尹慧敏^{1,2}, 聂宇燕³, 沈 瑾³, 吴文福^{1*}, 窦建鹏¹, 成荣敏⁴, 陈俊轶²

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林农业大学工程技术学院, 长春 130118;
3. 农业部规划设计研究院农产品加工研究所, 北京 100125; 4. 吉林大学化学学院, 长春 130012)

摘 要: 为了实现马铃薯的规模化热风干燥, 提高脱水制品的品质、降低生产能耗和成本, 该文以薄层干燥试验为基础, 研究了鲜切马铃薯丁在不同热风温度 (40、50、60、70、80、90 °C)、风速 (0.5、1.0、1.5、2.5、3.5 m/s) 和切丁长度 (2.5、5、10、15 mm) 条件下的干燥曲线、水分有效扩散系数和干燥活化能。利用 Weibull 分布函数拟合了干燥曲线, 并建立了风温、风速和切丁长度与模型参数的定量关系。研究表明: 鲜切马铃薯丁的热风干燥过程服从 Weibull 分布函数 ($R^2=0.991\sim0.999$), 是典型的降速干燥过程, 模型的尺度参数与热风温度、风速和切丁长度有关; 模型的形状参数与风速和切丁长度有关, 而温度对其影响不显著 ($P>0.05$); 水分有效平均扩散系数在 $1.859\sim12.509\times10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 之间, 与热风温度和风速显著相关 ($P<0.05$), 而物料切丁长度对其影响不显著 ($P>0.05$); 几何尺寸值与干燥物料的切丁长度和风速有关; 马铃薯丁热风干燥的活化能为 19.107 kJ/mol。该研究可为马铃薯热风干燥提供理论和技术基础。

关键词: 干燥; 模型; 温度; 薄层热风干燥; 马铃薯; Weibull 函数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.033

中图分类号: TS255.1; TQ028.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0252-07

尹慧敏, 聂宇燕, 沈 瑾, 吴文福, 窦建鹏, 成荣敏, 陈俊轶. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.033 http://www.tcsae.org
Yin Huimin, Nie Yuyan, Shen Jin, Wu Wenfu, Dou Jianpeng, Cheng Rongmin, Chen Junyi. Drying characteristics of diced potato with thin-layer by hot-wind based on Weibull distribution function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 252—258. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.033 http://www.tcsae.org

0 引 言

马铃薯是全世界公认的全营养食品^[1], 其同时具备粮食作物和经济作物的特点, 广泛应用于食品、饲料和医药工业^[2], 是目前中国最有发展前景的高产经济作物之一。中国是世界第一马铃薯生产国, 但贮藏技术落后, 损失超过 15%, 远高于欧美发达国家^[3]。干燥可以很好的减少农产品的水分, 延长贮藏期, 增加附加值, 是其深加工的重要手段。

热风干燥操作简单, 成本较低, 对环境、场地设备等要求不高, 是应用最广泛的干燥方法之一。发展烘干模型和确定水分传输参数对干燥过程进行有效预测、调控和优化具有重要意义。对于农产品薄层热风干燥特性的描述, 已经有多种模型被广泛地用于描述干燥过程^[4-7]。但是模型中各个参数的意义不明确, 而且不能同干燥工艺、干燥效率和传热传质有效结合, 降低了模型的使用

价值和意义^[8]。Weibull 分布函数简单、灵活, 有较好的适用性和兼容性, 近年被用来描述多种物料的干燥过程^[9-17]。

本研究考察热风干燥温度、风速和切丁长度对鲜切马铃薯干燥过程的影响, 利用 Weibull 分布函数对干燥过程进行模拟并探讨其中各参数的影响因素, 计算了马铃薯丁干燥过程的有效水分扩散系数和活化能, 为鲜马铃薯干燥加工的预测、调控和工艺优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

新鲜大西洋马铃薯, 产自河北省张家口市张北县, 体积均匀、无损伤和青绿, 平均含水率为 3.21 g/g(干基), 在 $(4\pm1)^\circ\text{C}$ 保鲜柜中冷藏, 试验前将其恢复至室温 20°C 。

1.2 试验设备

JDKY-I 型薄层干燥试验台 (长春吉大科学仪器设备有限公司); DHG-9125A 型电热恒温鼓风干燥箱 (上海一恒科技有限公司); AR3202CN 通用型电子天平 (奥豪斯仪器 (上海) 有限公司, 精度 0.01g); CHD-100 型切丁机 (山东银鹰炊具机械有限公司); testo410-2 型多功能风速仪 (德国仪器国际贸易有限公司); JM20 温度传感器 (今明仪器有限公司); 微型热电阻 PT100 (德国贺力士有限公司)。

1.3 试验方法

测得室温下空气相对湿度 $35\%\pm5\%$ 。每次试验时, 人工去除马铃薯的表皮, 用切丁机按要求切丁后, 置于

收稿日期: 2016-04-11 修订日期: 2016-06-18

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 “适于不同区域农户小型储粮设施研究与示范推广” (20100377); 粮食流通数字化集成技术与示范课题 (2013BAD17B07); 粮食干燥控速模型及智能系统的研究 (201313001-07)
作者简介: 尹慧敏, 女, 讲师, 博士生, 研究方向: 农业机械测试与控制技术、农产品加工技术。长春 吉林大学生物与农业工程学院, 130022。

Email: yhm_jlau@126.com

*通信作者: 吴文福, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 农业机械测试与控制技术、农产品加工技术、智能机械。长春 吉林大学生物与农业工程学院, 130022。Email: wwfzlb@126.com

清水中防止褐变, 洗掉表面淀粉, 过筛滤掉较小的颗粒, 沥水后用电子天平称取质量为 (270 ± 1) g 的马铃薯丁, 均匀地平铺在物料盘上。微型热电偶的探头穿过马铃薯丁置于物料盘中间, 用于检测物料的温度。根据预试验的结果, 选用不同的干燥温度 $(40、50、60、70、80、90\text{ }^{\circ}\text{C})$ 、风速 $(0.5、1.0、1.5、2.5、3.5\text{ m/s})$ 、切丁大小(横截面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 、长度分别为 $2.5、5、10、15\text{ mm}$)条件下进行干燥。干燥过程中, 每隔规定的时间称质量, 直至含水率降到 0.1 g/g (湿基)以下结束试验。

1.4 指标测定与方法

1) 含水率的测定

水分比和干燥速率测定: 原料初始含水率测定采用 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温干燥法, 参照 GB 5009.3—2010^[18]。

2) 干基含水率 M_t

不同干燥时间的马铃薯干基含水率按公式(1)计算^[5,19-21]

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g} = \frac{m_t - m_0(1 - W_0)}{m_g} \quad (1)$$

式中 m_t 为 t 时刻马铃薯质量, g; m_g 为马铃薯干物质质量, g; m_0 为马铃薯初始质量, g; W_0 为马铃薯的初始湿基含水率, g/g。

3) 水分比 MR

由于马铃薯平衡干基含水率远小于 M_0 和 M_t , 水分比按式(2)计算^[15]

$$\text{MR} = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

式中 MR 为 t 时刻物料水分比; M_0 为物料初始干基含水率, g/g。

4) 干燥速率 DR^[19-21]

$$\text{DR} = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中 M_{t1} 和 M_{t2} 为 t_1 和 t_2 时刻的干基含水率, g/g。

5) Weibull 分布函数表示为如下形式^[10-17]

$$\text{MR} = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (4)$$

式中 α 为尺度参数, min, 表示干燥过程中的速率常数, 约等于干燥过程中物料脱去 63% 水分所需要的时间; β 为形状参数, 其值与干燥过程中干燥曲线的形态有关, t 为干燥时间, min。

6) 水分有效扩散系数 D_{eff}

物料水分的迁移特点可通过水分有效扩散系数衡量。在降速干燥阶段, 生物质的干燥特性可以用简化的 Fick 第二定律来描述, 其表达式为^[5,7-8,14]

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

式中 D_{eff} 为有效水分扩散系数, m^2/min ; L_0 为马铃薯的物料厚度, 其值为 $1 \times 10^{-2}\text{ m}$;

通过修正 Weibull 分布函数可以估算水分有效扩散系数 D_{cal} , 且没有水分迁移方式的约束, 计算公式如下^[4,9,12,14]

$$D_{\text{cal}} = \frac{r^2}{\alpha} \quad (6)$$

式中 D_{cal} 为有效水分扩散系数, m^2/min ; r 为马铃薯丁的体积等效半径, 即将马铃薯丁视为体积球体时的半径, m。

D_{eff} 和 D_{cal} 的关系如下式所示^[4,9,12,14]

$$D_{\text{eff}} = \frac{D_{\text{cal}}}{R_g} \quad (7)$$

式中 R_g 为几何参数。

7) 活化能的计算 E_a

物料的水分有效扩散系数和干燥温度的关系符合阿伦尼乌斯 (Arrhenius) 公式^[5-7,22], 计算公式为

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (8)$$

式中 D_0 为物料中的扩散基数, 为定值, m^2/s ; E_a 为物料的干燥活化能, J/mol; R 为气体摩尔常数, 其值为 $8.314\text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$; T_a 为物料的绝对温度, K。

1.5 数据处理

采用 SPSS 17 软件进行模型回归分析, 数学模型的拟合优劣由决定系数 R^2 来进行评价, 其值越大说明拟合程度越好, 计算公式如下所示^[11-14,22-23]

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

式中 $MR_{\text{pre},i}$ 为利用模型预测水分比; $MR_{\text{exp},i}$ 干燥试验实测水分比; $MR_{\text{pre,mean}}$ 试验实测水分比的平均值; N 为试验数据点的个数。

2 结果与分析

2.1 鲜切马铃薯丁热风干燥动力学曲线

2.1.1 风温对马铃薯干燥的影响

图 1 是热风风速为 1.0 m/s , 切丁长度为 10 mm 情况下, 马铃薯干燥过程中的水分比、干燥速率和物料温度随热风温度的变化曲线。

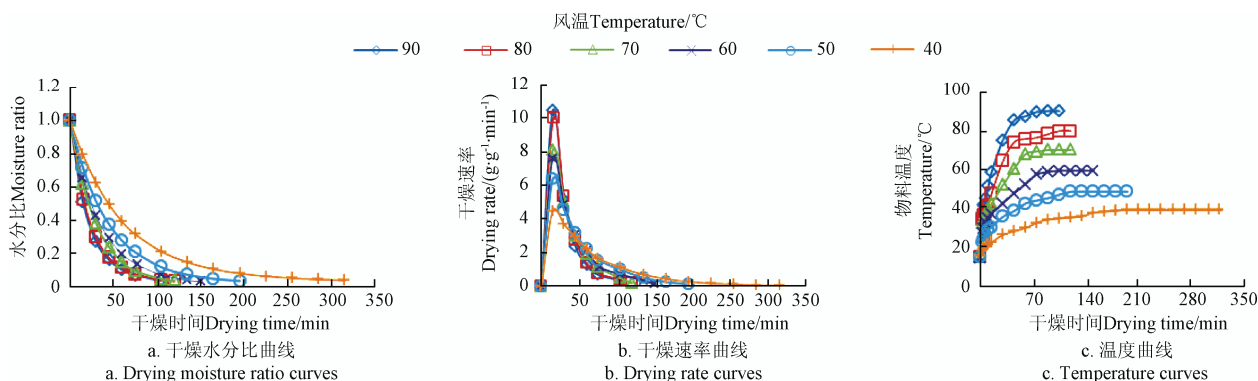
由图 1a 干燥水分比曲线可见, 随着热风温度的降低, 干燥时间分别为 $105、120、120、150、195、315\text{ min}$, 马铃薯丁达到相同干燥程度所需要时间越长, 干燥速率越小。这是因为温度越高, 物料和干燥介质之间的温度差和湿度差越大, 水分子动能越大, 传热和传质速率加快^[5-8]。由图 1b 干燥速率曲线可见, 干燥速率由 0 经很短的时间增加到最大值, 没有经历恒速干燥段, 随后干燥速率呈现下降趋势直接进入降速干燥阶段, 属于典型的降速过程, 说明马铃薯干燥主要受内部水分扩散控制。由于马铃薯含水率很高且含有较多的非结合水, 与周围环境形成较大的湿度差, 内部水分向表面转移能力强, 所以在降速段初期干燥速率下降快; 而在后期时, 马铃薯含水率降低, 与环境湿度差减小, 水分迁移路径增长、阻力增大, 降水速率明显减慢^[5]。

由图 1c 可知, 物料温度可分为快速升温段、缓速升温段和恒温段。快速升温段为物料预热状态, 预热温度

与环境温度的湿球温度值有关, 热风温度越高, 热风焓值越大, 湿球温度越高, 物料预热温度越高^[15]。然后物料温度以比较快的速率(小于初始温度上升速率)上升, 热风一部分热量用于物料温度升高, 一部分用于表面水分气化, 温度越高这一阶段越短, 此时干燥处于降速段初期。随着物料含水率的进一步减少, 脱除水分消耗热量不足以使环境温度降低, 此时物料温度与环境温度平衡, 此时干燥过程处于降速段的后期。

从试验结果看, 脱水后的马铃薯丁颜色为白色, 干燥温度为 60 和 70 °C 时, 脱水制品的颜色最明亮, 干燥温度为 40 和 50 °C 时, 部分马铃薯丁表面变黑, 这是由于表面多酚氧化酶酶促褐变引起的黑色素堆积造成的^[24-26]; 而温度高于 70 °C 时, 随着温度的升高黄色加重, 可能是高温下还原糖发生了美拉德反应造成的^[27]。

综合考虑干燥能耗和干燥品质, 热风温度选择 70 °C 为宜。



注: 热风风速为 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 切丁长度为 10 mm。

Note: Hot air velocity is $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, diced length is 10 mm.

图 1 不同热风温度下马铃薯丁的干燥特性、干燥速率和温度曲线

Fig.1 Drying characteristic, drying rate and temperature curves of diced potato at different hot temperatures

2.1.2 风速对马铃薯干燥的影响

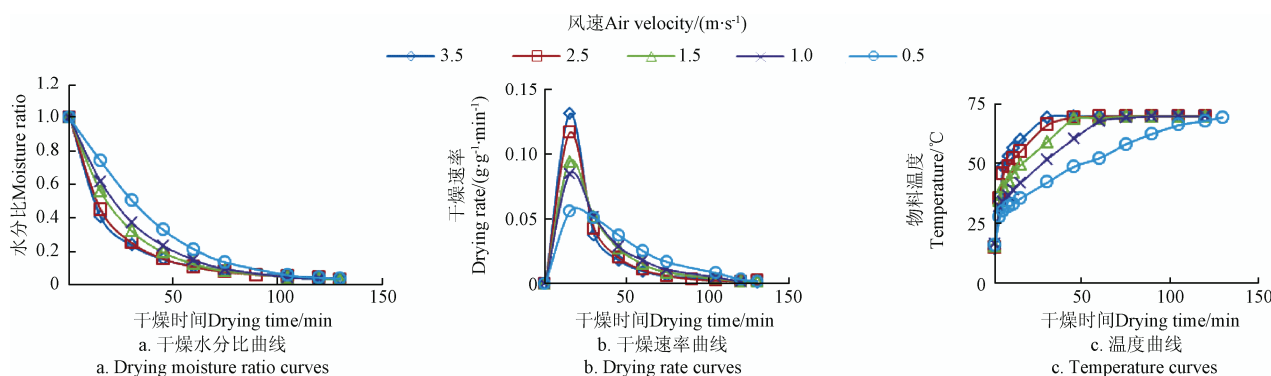
图 2 是热风温度为 70 °C, 切丁长度为 10 mm 情况下, 马铃薯干燥过程中的水分比、干燥速率和物料温度随热风风速变化的曲线。

从图 2a、b 可见, 随着风速增大, 水分比下降越快, 最大干燥速率越大, 干燥速率下降越快, 这是因为风速主要影响马铃薯表面水分气化的速率, 风速越大, 气化速度越快。但在干燥后期干燥速率则随风度的增大而减小, 致使风速对马铃薯干燥时长几乎没有影响, 可能是干燥早期干燥速率越快, 表面结壳现象越严重, 水分迁移的阻力增大, 内部水分来不及扩散到马铃薯表面以供气化。这也导致了风速对干燥时长影响很小, 但风速增

大会使能耗增加, 所以马铃薯干燥中在不影响干燥品质的情况下尽量选择小风速干燥。

由 2c 可见, 随着风速升高物料温度、预热温度升高, 快速升温段变短, 恒温段增加。因为风速越大, 相同时间内流过物料表面的空气量越多, 传热边界层减薄, 有利于热量的传递, 物料温度升高快。

从该组试验结果看, 随着风速增大马铃薯丁的颜色更明亮, 0.5 m/s 风速下的部分马铃薯丁表面有轻微的褐变, 这是因为随着风速的增大, 干燥的马铃薯物料温度逐渐升高, 高温降低了多酚氧化酶的活性, 从而抑制酶促褐变的发生^[26]。综上分析, 干燥风速选择 1.0 m/s 为宜。



注: 热风温度为 70 °C, 切丁长度为 10 mm。

Note: Hot air temperature is 70 °C, diced length is 10 mm.

图 2 不同热风风速下马铃薯丁的干燥特性、干燥速率和温度曲线

Fig.2 Drying characteristic, drying rate and temperature curves of diced potato at different hot air velocities

2.1.3 切丁长度对马铃薯干燥的影响

图 3 是热风温度为 70 °C, 热风风速为 1.0 m/s 情况下,

马铃薯丁不同长度对水分比、干燥速率和物料温度的影响。

从图 3a、b 可见, 随着马铃薯丁长度增大, 干燥时间

明显增加，干燥水分比和干燥速率下降趋势减小。这是由于切丁长度增大，相同质量的物料与干燥介质接触面积减小，水分迁移距离增长，迁移阻力增大，减缓了热、质传递，从而使整个干燥过程减慢。因此，减小物料切丁长度有利于干燥效率。但是，在试验中发现，切丁长

度越小，干燥越不均匀。因为相同质量和体积的马铃薯，切分的越小，颗粒个数越多，干燥过程中堆积的层越多，热空气由下向上穿过物料的过程中温度逐渐下降，湿度逐渐升高，干燥驱动力减小，使上层物料含水率高于底层，干燥均匀性变差。

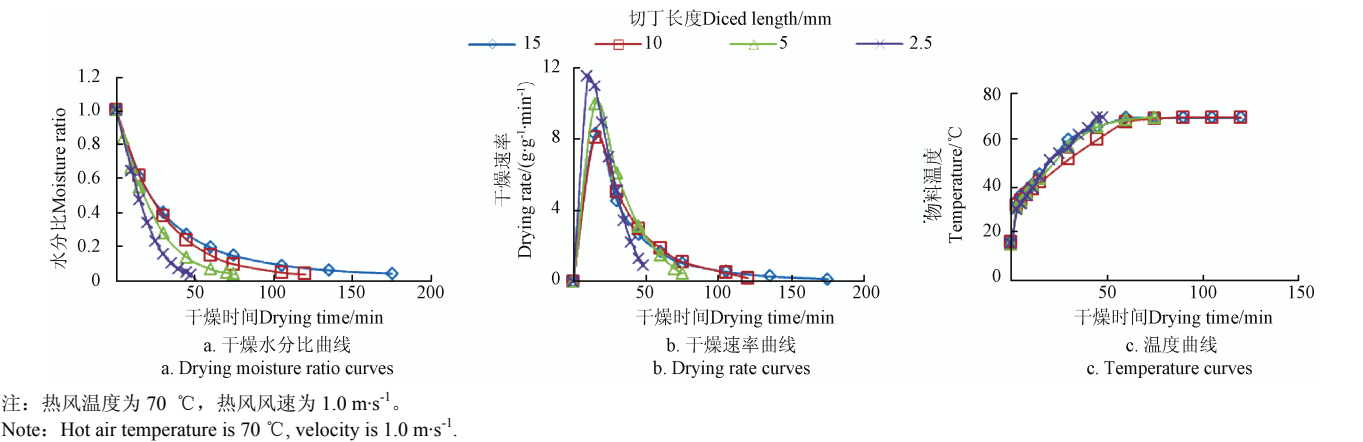


图 3 不同切丁长度下马铃薯丁的干燥特性、干燥速率和温度曲线
Fig.3 Drying characteristic, drying rate and temperature curves of diced potato at different diced length

从图 3c 物料温度图中可见，随着切丁长度的增长，物料与热空气接触面积越小，水分迁移路径长，阻力越大，脱除水分越少，恒温段增长。

从该组试验结果看，随着马铃薯丁长度的增大其黄色加重，这可能是由于干燥时间的加长使美拉德反应加剧造成的。同时，2.5 mm 长度时有轻微的褐变，这是由于上层马铃薯丁脱水速率低于下层马铃薯丁，干燥不均匀造成的。由上分析可知，马铃薯丁切丁长度选择 5 mm 为宜。

2.2 基于 Weibull 分布函数的干燥过程模拟

利用 Weibull 分布函数对不同干燥条件下马铃薯丁干燥数据进行回归分析，结果见表 1。可见，决定系数 R^2 值在 0.991~0.999 之间，Weibull 函数可准确描述不同干燥条件下马铃薯丁的干燥过程。

表 1 不同干燥条件下 Weibull 模拟结果			
Table 1 Weibull model simulation result at different drying conditions			
干燥条件 Drying conditions	尺度参数 Scale parameter α/min	形状参数 Shape Parameter β	决定系数 Coefficient of determination R^2
40 °C	69.65	0.875	0.992
50 °C	47.20	0.914	0.997
60 °C	36.53	0.913	0.998
70 °C	29.73	0.941	0.998
80 °C	24.60	0.829	0.991
90 °C	22.87	0.831	0.994
0.5 m·s ⁻¹	42.15	1.128	0.998
1.0 m·s ⁻¹	29.73	0.941	0.998
1.5 m·s ⁻¹	26.50	0.823	0.991
2.5 m·s ⁻¹	19.20	0.664	0.991
3.5 m·s ⁻¹	16.54	0.592	0.994
2.5 mm	18.65	1.310	0.999
5 mm	23.91	1.067	0.999
10 mm	29.73	0.941	0.998
15 mm	33.90	0.768	0.992

注：第一组试验固定因素水平为风速 1.0 m·s⁻¹，切丁长度为 10 mm；第二组试验固定因素水平为温度 70 °C，切丁长度为 10 mm；第三组试验固定因素水平为温度 70 °C，风速 1.0 m·s⁻¹，下同。
Note: Air velocity of first set test is 1.0 m·s⁻¹, diced length is 10 mm. The hot air temperature of second set test is 70 °C, diced length of 10 mm. The temperature of third set test is 70 °C, air velocity is 1.0 m·s⁻¹. The same below.

2.2.1 尺度参数 α 的影响因素

由表 1 分析可知，不同干燥条件下分布函数中的尺度参数 α 值不同。 α 值随热风温度和风速升高而减小，当热风温度从 40 °C 升高到 90 °C 时， α 值从 69.65 min 降至 22.87 min；风速由 0.5 m/s 增加到 3.5 m/s 时， α 值从 42.15 min 降至 16.54 min。干燥物料颗粒减小，尺度参数 α 值减小。由此可见，尺度参数 α 值大小受热风温度、风速以及干燥物料切丁长度大小影响。

2.2.2 形状参数 β 的影响因素

有研究表明，形状参数与干燥方式、物料种类和状态有关^[9,15]。从表 1 可以看出，随着马铃薯切丁长度的减小，形状参数 β 增大，这说明干燥物料大小与形状参数负相关 ($R^2=0.930$)。风速对形状参数 β 的影响也很明显，其值随着风速增加而减小。而热风温度对形状参数 β 的影响很小，这与 Corzo^[4]、白俊文^[9]、沙秀秀^[16]等研究结果一致。由研究可知， β 值主要受干燥物料切丁长度和风速大小的影响。

2.2.3 Weibull 模型的求解

模型中的干燥常数 α 和 β 是风温 $T(^{\circ}\text{C})$ 、风速 $V(\text{m/s})$ 和马铃薯丁长度 $L(\text{mm})$ 的函数。采用公式 (10)、(11)，即一次多项式拟合干燥常数。

$$\alpha=a_0+a_1\ln T+a_2\ln V+a_3\ln L,$$
 (10)

$$\beta=b_0+b_1\ln T+b_2\ln V+b_3\ln L.$$
 (11)

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 和 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为待定模型系数。

采用多元线性回归方法，求解 Weibull 方程中参数 α 、 β 的回归方程，求得公式 (12)、(13)。

$$\alpha=251.7035-56.9529\ln T-13.1381\ln V+9.6128\ln L$$

($R^2=0.958$, $p=0.0001$) (12)

$$\beta=1.7551-0.0448\ln T-0.2552\ln V-0.2915\ln L$$

($R^2=0.963$, $p=0.0001$) (13)

α 和 β 回归方程的决定系数 R^2 分别为 0.958、0.963，均在水平 $p=0.0001$ 情况下显著，可见，拟合效果好。因此，马铃薯丁热风干燥的 Weibull 模型方程为

$$MR = \exp[-(\frac{t}{251.7035 - 56.9529 \ln T - 13.1381 \ln V + 9.6128 \ln L})^{1.7551 - 0.0448 \ln T - 0.2552 \ln V - 0.2915 \ln L}] \quad (14)$$

2.2.4 Weibull 模型的验证

追加试验的工艺条件为：热风温度为 65 ℃，风速为 1.2 m/s，切丁长度为 8 mm。比较水分比 MR 的试验值和 Weibull 模型预测值，如图 4 所示。

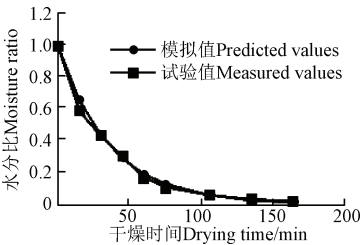


图 4 Weibull 模型的验证
Fig.4 Verification of Weibull model

由图 4 可以看出，试验值与模型预测值的一致性较好，平均相对误差 14.36%，主要是在低含水率时误差较大。因此，Weibull 模型能够较好的反映鲜切马铃薯丁热风干燥中水分比的变化规律。

2.3 水分有效扩散系数的分析

干燥过程中水分扩散系数是用来描述水分迁移的一个动态量，一般认为这可能是由包括毛细管流动、液体扩散、蒸汽扩散等多种因素共同作用的结果。为了简化计算结果，通常采用水分有效扩散系数 D_{eff} 来表征干燥过程中水分迁移的平均速度。

鲜切马铃薯丁的干燥过程属于典型降速干燥，干燥过程的水分有效扩散系数 D_{eff} 可以利用 Fick 第二定律计算。由公式 (5) 可知，马铃薯丁在干燥过程中 $\ln MR$ 与干燥时间 t 呈线性关系，其结果见表 2。

表 2 不同干燥条件下的水分有效扩散系数
Table 2 Moisture effective diffusion coefficients under different drying conditions

干燥条件 Drying conditions	线性模拟方程 Linear simulation equation	决定系数 Coefficient of determination R^2	水分有效扩散系数 Moisture effective diffusion coefficients $D_{eff}/(10^{-9} \cdot m^2 \cdot s^{-1})$
40 ℃	$\ln MR = -0.000183t - 0.251$	0.974	1.859
50 ℃	$\ln MR = -0.000300t - 0.149$	0.990	3.043
60 ℃	$\ln MR = -0.000383t - 0.133$	0.993	3.888
70 ℃	$\ln MR = -0.000467t - 0.105$	0.994	4.733
80 ℃	$\ln MR = -0.000483t - 0.271$	0.976	4.902
90 ℃	$\ln MR = -0.000533t - 0.229$	0.979	5.409
0.5 m·s ⁻¹	$\ln MR = -0.000383t - 0.104$	0.989	4.564
1.0 m·s ⁻¹	$\ln MR = -0.000467t - 0.10$	0.994	4.733
1.5 m·s ⁻¹	$\ln MR = -0.000433t - 0.288$	0.975	4.395
2.5 m·s ⁻¹	$\ln MR = -0.000417t - 0.493$	0.948	4.226
3.5 m·s ⁻¹	$\ln MR = -0.000383t - 0.566$	0.931	3.888
2.5 mm	$\ln MR = -0.001233t - 0.251$	0.990	12.509
5 mm	$\ln MR = -0.000750t - 0.031$	0.999	7.607
10 mm	$\ln MR = -0.000467t - 0.105$	0.994	4.733
15 mm	$\ln MR = -0.000300t - 0.342$	0.962	3.043

由表 2 可知，热风温度与水分有效扩散系数极显著相关 ($P < 0.01$)，热风温度越高，有效水分扩散系数越大，与前人^[5,7,9,13]研究结果一致。当干燥风速为 0.5~

3.5 m/s，有效水分扩散系数为 $3.888 \times 10^{-9} \sim 4.733 \times 10^{-9} m^2/s$ 之间，风速与水分有效扩散系数显著相关 ($P < 0.05$)，风速越高，水分有效扩散系数越小，但是与荔枝^[5]、豇豆^[6]和熟化红薯^[8]等研究的结果不一致，这是由物料差异造成的。但物料切丁长度的大小对水分有效扩散系数影响不显著相关 ($P > 0.05$)。

根据表 1 和表 2 求得的结果，利用公式 (6) 和 (7)，求得估算水分扩散系数 D_{cal} 和几何参数 R_g ，结果见表 3。

表 3 估算水分扩散系数和几何参数结果
Table 3 Calculated moisture diffusion coefficient and geometric factor result

干燥条件 Drying conditions	估算水分扩散系数 Calculated moisture diffusion coefficient $D_{cal}/(10^{-8} \cdot m^2 \cdot s^{-1})$	几何参数 Geometric factor R_g
40 ℃	0.921	4.954
50 ℃	1.359	4.468
60 ℃	1.756	4.518
70 ℃	2.049	4.328
80 ℃	2.608	5.320
90 ℃	2.805	5.186
0.5 m·s ⁻¹	1.522	3.335
1.0 m·s ⁻¹	2.049	4.328
1.5 m·s ⁻¹	2.421	5.509
2.5 m·s ⁻¹	3.342	7.907
3.5 m·s ⁻¹	3.879	9.977
2.5 mm	1.365	1.091
5 mm	1.690	2.222
10 mm	2.049	4.328
15 mm	2.480	8.151

由表 3 可见，在不同热风温度干燥条件下，几何参数 R_g 值在 4.328~5.320 之间，变化不大；而马铃薯丁长度从 2.5 mm 变为 15 mm， R_g 值从 1.091 增加到 8.151，这说明 R_g 值与物料的几何尺寸相关，与 Bantle 等^[18]研究结果一致。而风速也对 R_g 值影响很大，随着风速增大， R_g 值增大。

2.4 干燥活化能的分析

干燥活化能 E_a 表示物料在蒸发 1 mol 水时需要的启动能量，其值越大表示其越难干燥，并且能通过干燥活化能估算出干燥能耗。通过公式 (8) 可知 $\ln D_{eff}$ 与 $1/T_a$ 呈线性关系，通过回归分析，计算得出马铃薯丁热风干燥工艺的活化能为 19.107 kJ/mol ($R^2 = 0.896$)，小于一般果蔬的活化能范围^[5-7]，这主要与物料的品种、内部成分和组织状态以及干燥时的几何形状等有关。

3 结 论

1) 马铃薯热风干燥属于降速干燥过程，热风温度越高，切丁长度越小，干燥时间越短；风速对干燥时间影响不显著 ($P = 0.538$)。综合考虑干燥能耗和干燥制品品质，选择热风温度为 70 ℃、风速为 1.0 m/s 和切丁长度为 5 mm 干燥条件为宜。

2) 使用 Weibull 分布函数对不同条件下马铃薯干燥

试验数据的拟合求得决定系数 R^2 值在 0.991~0.999 之间, 其中尺度参数 α 随热风温度升高、风速增大和切丁长度减小而减小; 形状参数 β 随风速的降低和切丁长度的减小而增大, 而温度对其影响不显著 ($P>0.05$)。运用多元线性回归方法建立模型和试验参数的定量关系, 验证试验平均误差为 14.36%, 说明该函数可以很好的描述马铃薯切丁热风干燥过程。

3) 根据 Fick 扩散定律计算的水分有效平均扩散系数随温度升高、风速增大、切丁长度减小而增大, 其中热风温度和风速影响显著 ($P<0.05$), 而切丁长度对其影响不显著 ($P>0.05$), 几何尺寸 R_g 值随干燥物料切丁长度增大而增大。

4) 根据 Arrhenius 公式计算出热风干燥马铃薯丁的活化能为 19.107 kJ/mol, 低于一般片状和丁状干燥形式的果蔬活化能, 易于干燥。

本研究为马铃薯的热风干燥模拟提供理论支撑, 同时也可以为其干燥条件选择和干燥装备设计提供依据。

参 考 文 献

- [1] 刘刚, 赵鑫, 周添红, 等. 我国马铃薯加工产业结构分析与发展思考[J]. 农业工程技术, 2010(11): 4—11.
Liu Gang, Zhao Xin, Zhou Tianhong, et al. Analysis of China's potato processing industry structure and the hinking of the development[J]. Agriculture Engineering Technology, 2010(11): 4—11. (in Chinese with English abstract)
- [2] 韩黎明. 马铃薯加工现状分析与对策建议[J]. 西藏农业技术, 2013, 35(2): 44—48, 27.
Han Liming. Analysis and suggestions on potato processing[J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2013, 35(2): 44—48, 27. (in Chinese with English abstract)
- [3] 林亚玲, 杨炳南, 杨延辰. 马铃薯加工现状与展望[J]. 农业工程技术, 2012(11): 18—21.
Lin Yaling, Yang Bingnan, Yang Caichen. Potato processing's status and prospect[J]. Agriculture Engineering Technology, 2012(11): 18—21. (in Chinese with English abstract)
- [4] Corzo O, Bracho N, Alvarez C. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2010, 34(6): 993—1008.
- [5] 关志强, 王秀芝, 李敏, 等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 151—158.
Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Min, et al. Mathematical modeling of hot air drying of hin layer Litchi flese[J]. Transactions of the hinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 151—158, 191. (in Chinese with English abstract)
- [6] 师建芳, 吴辉煌, 娄正, 等. 豇豆隧道式热风干燥特性和模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 232—240.
Shi Jianfang, Wu Huihuang, Lou Zheng, et al. Drying characteristics and model of cowpea in tunnel hot air dryer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(11): 232—240. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨玲, 陈建, 杨屹立, 等. 甘蓝型油菜籽热风干燥特性及其数学模型[J]. 现代食品科技, 2014, 30(8): 144—150.
Yang Ling, Chen Jian, Yang Yili, et al. Characteristics and Mathematical Models for Hot-air-dried Rapeseed[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(8): 144—150. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孟岳成, 王君, 房升, 等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 387—392.
Meng Yuecheng, Wang Jun, Fang Sheng, et al. Drying characteristics and mathematical modeling of hot air drying of cooked sweet potatoes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 387—392. (in Chinese with English abstract)
- [9] 白竣文, 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.
Bai Junwen, Wang Jiliang, Xiao Hongwei, et al. Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 278—285. (in Chinese with English abstract)
- [10] Uribe E, Vega-Gálvez A, Di Scala K, et al. Characteristics of convective drying of pepino fruit (*Solanum muricatum* Ait.): application of weibull distribution[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(8): 1349—1356.
- [11] Miranda M, Vega-Gálvez A, García P, et al. Effect of temperature on structural properties of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel and Weibull distribution for modelling drying process[J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88(2): 138—144.
- [12] Bantle M, Kolsaker K, Eikevik T M. Modification of the Weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food[J]. Drying Technology, 2011, 29(10): 1161—1169.
- [13] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317—324.
Zhang Weipeng, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Drying characteristics of poria cocos with different drying methods based on Weibull istribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 317—324. (in Chinese with English abstract)
- [14] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 基于 Weibull 分布函数对猕猴桃切片中短波红外干燥过程模拟及应用[J]. 现代食品科技, 2014, 30(6): 146—151.
Zeng Mucheng, Bi Jinfeng, Chen Qinqin, et al. Weibull Distribution for Modeling Med- and Short- Wave Infrared Radiation Drying of Kiwifruit Slices[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(6): 146—151. (in Chinese with English abstract)
- [15] 巨浩羽, 肖红伟, 郑霞, 等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296—304.
Ju Haoyu, xiaohongwi, zhengxia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 296—304. (in Chinese with English abstract)
- [16] 沙秀秀, 朱邵晴, 段金彪, 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): 2117—2122.
Sha Xiuxiu, Zhu Shaoqing, Duan Jiniao, et al. Weibull distribution for modeling drying of Angelicae Sinensis Radix and its application in moisture dynamics[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(11): 2117—2122. (in Chinese with English abstract)
- [17] Marabi A, Livings S, Jacobson M, et al. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates[J]. European Food Research & Technology, 2003, 217(4): 311—318.
- [18] GB 5009.3—2010. 食品安全国家食品中水分的测定[S].

- [19] Wang Rui, Zhang Min, Mujumdar Arun S. Microwave freeze-drying characteristics and sensory quality of instant vegetable soup[J]. *Drying Technology*, 2009, 27(9): 1161—1169
- [20] Chandra Mohan V P, Prabal Talukdar. Experimental studies for convective drying of potato[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2014, 35(14): 1288—1297.
- [21] İbrahim Doymaz. Air-drying characteristics of tomatoes[J]. *J Food Eng*, 2007, 78(4): 1291—1297.
- [22] 高鹤, 易建勇, 毕金峰, 等. 番木瓜中短波红外和热风干燥特性和品质研究[J]. *现代食品科技*, 2015(2): 190—195. Gao He, Yi Jianfeng, Bi Jinfeng, et al. Drying characteristics and quality of papaya under med- and short-wave infrared radiation and hot air drying[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015(2): 190—195. (in Chinese with English abstract)
- [23] 诸爱士. 茭白片热风对流干燥模型与传质性能[J]. *高校化学工程学报*, 2012, 26(3): 541—546. Zhu Aishi. The model and mass transfer performance of convective hot air drying of water-oat slices[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2012, 26(3): 541—546. (in Chinese with English abstract)
- [24] 雷东锋, 冯怡, 蒋大宗. 植物中多酚氧化酶的特性[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(6): 606—614. Lei Dongfeng, Feng Yi, Jiang Dazong. Characteristics of polyphenol oxidase in plant[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(6): 606—614. (in Chinese with English abstract)
- [25] 程丽林. 影响鲜切马铃薯褐变相关酶及底物的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015. Cheng Lilin. Study on the Browning Enzymes and Substrates of Fresh-Cut Potato[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王磊, 阮征, 洛成尧, 等. 马铃薯多酚氧化酶酶学特性及热稳定性模型的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(19): 92—96. Wang Lei, Ruan Zheng, Luo Chengyao, et al. Enzymatic characteristics and thermal stability model of polyphenol oxidase from potato[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(19): 92—96. (in Chinese with English abstract)
- [27] 吴惠玲, 王志强, 韩春, 等. 影响美拉德反应的几种因素[J]. *现代食品科技*, 2010, 26(5): 441—444, 440. Wu Huiling, Wang Zhiqiang, Han Chun, et al. Factors affecting the maillard reaction[J]. *Modern food science and technology*, 2010, 26(5): 441—444, 440. (in Chinese with English abstract)

Drying characteristics of diced potato with thin-layer by hot-wind based on Weibull distribution function

Yin Huimin^{1,2}, Nie Yuyan³, Shen Jin³, Wu Wenfu^{1*}, Dou Jianpeng¹, Cheng Rongmin⁴, Chen Junyi²

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 3. Institute of Agricultural Produce and Byproduct Processing, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China; 4. College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Potato, which is widely regarded as a total nutrient food, is the fourth major food crop after wheat, corn and rice in the world. In the same time, potato is one of the most highly productive food crops in China with potentiality of further development in the future and has been widely used in the food, feedstuffs and pharmaceutical industry. So it has also been endowed with the properties of both food crops and commercial crops. The preservation techniques in China, the largest potato producer, are so lagging that the loss amount is estimated to be over 15% each year, which is far above that of developed countries in Europe and America. The potato drying process is an important step as it plays a crucial role in reducing the moisture of agricultural products, extending the storage period and improving the additional values. As the most extensive method among all artificial drying processes, hot air drying has the properties of easy manipulation, low cost, and fewer demands for the environment, space and equipment. Research on the property of hot air drying, development of drying models and determination of water transfer parameters has great importance to the effectiveness in predicting, regulating and optimizing of the drying process. In this paper, the drying curves, the material temperature, the moisture effective diffusivity velocity and the activation energy are discussed at the different hot-air temperature, air velocity and dice length based on the thin layer drying experiments. The hot air temperatures are taken as 40, 50, 60, 70, 80 and 90 °C. The air velocities are 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 and 3.5 m/s. The potato dices have the cross section of 10 mm × 10 mm, and the lengths are classed as 2.5, 5, 10 and 15 mm. The main results are as follows. The hot air drying of fresh diced potatoes has typical characteristics of the Weibull distribution with the falling rate. The process can be divided into 2 phases, i.e. the stage at first increase phase and then the deceleration phase. The drying time is shortened with the rising of the hot air temperature and the decreasing of the dice length, and the air velocity has a little effect on the time except the early stages when the increasing air velocity can give the promotion of drying rate. The hot-air drying process of fresh diced potatoes obeys the Weibull function, and the value of R^2 ranges from 0.991 to 0.999, which means the hot-air drying process is in good agreement with the Weibull distribution function. The scale parameter in the model grows with the increase of hot-air temperature and air velocity, and decreases with the rise of dice length. The shape parameter in the model has positive correlation with the dice length and air velocity, while air temperature causes little impact on the shape parameter. The moisture effective diffusivity velocity, which is between 1.859×10^{-9} and 12.509×10^{-9} m²/s, is significantly ($P < 0.05$) correlated to the hot-air temperature and air velocity, but the dice length is not significantly ($P > 0.05$). The geometric dimension parameter is relevant to the dice length and air velocity, which increases with the rise of air velocity and dice length. The activation energy of hot-air potato drying is found to be 19.107 kJ/mol, which is lower than the average activation energy of diced or chipped fruit and vegetable, and thus hot-air potato drying is easier to accomplish. This research will help to provide theoretical and technical foundation to the hot-air drying of the fresh diced potato.

Keywords: drying; models; temperature; thin layer hot air drying; potato; Weibull function