

哈密瓜切片热风干燥特性及数学模型

Hot-air drying characteristics and mathematical model of cantaloupe slices

张雪波

刘显茜

邹三全

赵振超

ZHANG Xue-bo LIU Xian-xi ZOU San-quan ZHAO Zhen-chao

(昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650504)

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650504, China)

摘要:目的:提高规模化生产的哈密瓜品质,缩短干燥周期。方法:以不同漂烫时间(0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 min)、浸渍液(0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%柠檬酸溶液)预处理哈密瓜切片,并分别研究不同热风温度(35,45,55,65,75 ℃)、热风速度(0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 m/s)和切片厚度(2,4,6,8,10 mm)条件下的哈密瓜切片热风干燥特性和水分扩散系数,拟合不同薄层干燥数学模型。结果:0.4%柠檬酸预处理后得到品质最优的干制产品,热风温度和切片厚度对切片干燥影响较为显著,哈密瓜切片无恒速干燥阶段,有效水分扩散系数为 $1.1348 \times 10^{-7} \sim 4.9080 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,活化能为 28.15 kJ/mol。结论:哈密瓜切片的最佳热风干燥工艺为热风温度 55 ℃、热风速度 2.0 m/s、切片厚度 6 mm,Page 模型具有最高的 R^2 值和最小的均方根误差,更适于评估和预测哈密瓜热风干燥的水分去除规律。

关键词:哈密瓜;热风干燥;干燥特性;数学模型;传热质

Abstract: Objective: In order to improve the quality of cantaloupe production and shorten the drying period. Methods: Use different blanching time (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 min), impregnation liquid (0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5% citric acid solution) to pretreat cantaloupe slices, and study different hot air temperature (35, 45, 55, 65, 75 ℃), air velocities (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m/s), and slice thicknesses (2, 4, 6, 8, 10 mm) on the hot air drying characteristics and moisture diffusivity coefficient of cantaloupe slices, different thin-layer drying mathematical models were fitted. Results: 0.4% citric acid pretreatment yields the best quality dried product, and the temperature and thickness

influenced slice drying significantly. There was no constant drying stage in cantaloupe slices drying with the effective moisture diffusivity coefficients of $1.1348 \times 10^{-7} \sim 4.9080 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ and activation energy of 28.15 kJ/mol. Conclusion: The optimal hot air drying process of cantaloupe slices drying is as followed: hot air temperature of 55 ℃, air velocities of 2.0 m/s, slice thickness of 6 mm, under the conditions, Page model has the highest R^2 value and the lowest root mean square error, which is more suitable for evaluating the moisture removal law of hot-air drying of cantaloupe slices.

Keywords: cantaloupe; hot-air drying; drying characteristics; mathematical model; heat and mass transfer

哈密瓜为葫芦科甜瓜属蔓性草本植物,因味美香甜、多汁爽口,营养丰富,药用价值高^[1-2],素有“瓜中之王”的美称^[3]。哈密瓜采收期集中、货架期短且含水量高,受微生物影响易腐烂变质,不及时运销导致的腐烂损失量达 20%~30%^[3-5]。因此哈密瓜干燥技术逐渐成为人们关注的焦点^[6]。

干燥是果蔬加工应用最广泛的技术之一,通过降低水分含量、灭活微生物,减少空间和重量,从而节约运输和贮藏成本,延长产品货架期^[7]。目前,哈密瓜常见的干燥方式有热风干燥^[8]、真空干燥^[9]、真空冷冻干燥^[10-11]、变温压差膨化干燥^[12-13]等。其中,真空干燥不适用于糊状及高含水量物料的干燥^[14];真空冷冻干燥能够得到品质较高的产品,但干燥过程冰晶的形成会对产品内部造成破坏且一次性投入大、能耗高、干制品价格昂贵,不适用于工厂的批量生产^[15-17];变温压差膨化干燥能够保持产品质地酥脆,但设备成本较高^[18];热风干燥具有干燥迅速、操作简单、成本低、一次性产出量大等特点,且在连续化批量生产的情况下还能保持产品的营养品质,是果蔬加工最为常用的干燥技术^[19-20]。

哈密瓜含水量高、细胞组织结构疏松且有热敏性^[21],

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51566006)

作者简介:张雪波,男,昆明理工大学在读硕士研究生。

通信作者:刘显茜(1972—),男,昆明理工大学副教授,博士。

E-mail: xxiliu@tom.com

收稿日期:2021-06-30

干燥前进行适当的预处理(例如:热烫、冷冻、浸渍等)可以有效避免加工过程中发生氧化褐变。温馨等^[22-23]研究了哈密瓜的预处理工艺;毕金峰等^[24]研究了漂烫、冷冻和浸渍3种预处理方式对哈密瓜变温压差膨化干燥品质的影响,发现适当的漂烫预处理有利于产品膨化度和色泽的提高;金敬红等^[25]研究发现微波干燥哈密瓜时柠檬酸的护色效果优于坏血酸的;纪翠娟^[26]研究发现漂烫2~3 min的哈密瓜果片颜色较好,膨化度较好;贾文婷等^[27]表明60 s热烫预处理能够较好保持产品色泽,2.5%柠檬酸预处理能够有效提升产品的膨化度和脆度。

文章拟以哈密瓜切片为研究对象,利用热风干燥技术,对比分析不同预处理下哈密瓜干燥产品的色差,探究温度、风速和切片厚度对哈密瓜热风干燥的影响,并建立哈密瓜热风干燥动力学模型,以为哈密瓜热风干燥的中试加工工艺优化及下游产品的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

哈密瓜:西州密25号,去皮去籽后的哈密瓜初始湿基含水率约(91.00±0.15)%,市售;

无水柠檬酸:食品级,陕西省西安森博生物试剂公司。

1.1.2 主要仪器设备

流化床干燥机:Sherwood Tornado M501型,英国舍伍德科技有限公司;

色差仪:SC-80C型,北京京仪康光光学仪器有限公司;

电子天平:JY20001max2000型,上海上天精密仪器有限公司;

风速仪:PM6252B型,华谊仪表有限公司;

恒温水浴锅:HH-4型,上海析达仪器有限公司;

电冰箱:BCD-272WDG型,青岛海尔股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 切片制备 哈密瓜洗净后去皮、去籽,切取中间果肉制成直径30 mm,厚度分别为2,4,6,8,10 mm的圆形切片若干份。保鲜膜密封后于4℃贮藏备用。

1.2.2 预处理工艺试验设计

(1) 空白试验:将哈密瓜切成4 mm厚的圆形切片,直接进行热风(温度60℃、风速1.5 m/s)制干。

(2) 漂烫:将哈密瓜切成4 mm厚的圆形切片,于95℃热水中分别漂烫0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 min后迅速取出于室温中静置5 min,滤纸拭干表面水分后进行热风制干。

(3) 浸渍:将4 mm厚的新鲜哈密瓜切片分别置于0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%的柠檬酸溶液中浸泡0.5 h,离子水洗2~3次后静置5 min,滤纸拭干表面水分

后进行制干。

1.2.3 热风干燥单因素试验 取经最佳预处理后的哈密瓜切片于流化床中进行热风干燥至湿基含水率低于15%(通过企业调研,此时产品贮藏期、适口性、品质最佳),3次平行试验。

(1) 热风温度:固定热风速度1.5 m/s,哈密瓜切片厚度4 mm,考察热风温度分别为35,45,55,65,75℃下哈密瓜切片热风干燥的水分比及干燥速率的变化。

(2) 热风速度:固定热风温度55℃,哈密瓜切片厚度4 mm,考察热风速度分别为0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 m/s下哈密瓜切片热风干燥的水分比及干燥速率的变化。

(3) 切片厚度:固定热风温度55℃,热风速度2.0 m/s,考察哈密瓜切片厚度分别为2,4,6,8,10 mm下哈密瓜切片热风干燥的水分比及干燥速率的变化。

1.3 指标测定

1.3.1 水分质量比 热风干燥过程中,按式(1)计算哈密瓜切片水分比。

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (1)$$

式中:

M_R ——水分质量比;

M_t 、 M_e 、 M_0 —— t 时刻、平衡时刻和初始时刻的干基含水率,kg/kg。

1.3.2 干燥速率 干燥速率表示样品在干燥过程中的失水快慢,定义为:

$$D_R = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt}, \quad (2)$$

式中:

D_R ——干燥速率,kg/(kg·h);

M_{t+dt} 、 M_t —— $t+dt$ 和 t 时刻的干基含水率,kg/kg。

1.3.3 有效扩散系数 有效扩散系数反映物料在一定干燥条件下的脱水能力,以Fick第二定律为理论基础对其扩散偏微分方程进行数值求解并加以分析。对于板型物料的数值解按(3)式计算。

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right]. \quad (3)$$

式中:

L ——样品的半厚度,m;

D_{eff} ——有效扩散系数,m²/s。

对式(3)取对数得:

$$\ln M_R = \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \right] - \left[\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \right] t. \quad (4)$$

1.3.4 活化能 按式(5)计算活化能。

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left[-\frac{E_a}{R(T+273.15)} \right], \quad (5)$$

式中:

E_a ——活化能, kJ/mol;

R ——气体状态常数, 为 8.314 J/(mol · K);

T ——热风干燥温度, °C;

D_0 ——阿伦尼乌斯(Arrhenius)方程的指数前因子, m^2/s 。

将式(5)线性化取对数形式:

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \left[\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right] \quad (6)$$

1.3.5 色泽测定 参照 Wang 等^[22]的方法, 并按式(7)计算色差 ΔE 。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L^*)^2 + (a_0 - a^*)^2 + (b_0 - b^*)^2} \quad (7)$$

1.4 干燥数学模型

几种常被用来描述食品或农产品的薄层干燥模型如表 1 所示。

表 1 典型数学模型

Table 1 Typical mathematical model

模型名称	数学表达式
Lewis	$M_R = \exp(-kt)$
Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$
Modified Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$
Page	$M_R = \exp(-kt^n)$
Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$
Two term	$M_R = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$
Two term exponential	$M_R = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
Verma	$M_R = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$

对哈密瓜切片干燥特性曲线进行拟合时, 使用决定系数(R^2)和均方根误差(S_{RME})对模型进行评估。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{\text{simul},i} - M_{\text{Exp},i})^2}{\sum_{i=1}^n (M_{\text{simul},i} - M_{\text{Exp},i})^2} \quad (8)$$

$$S_{\text{RME}} = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(M_{\text{simul},i} - M_{\text{Exp},i}) / M_{\text{Exp},i}]^2}{N}} \quad (9)$$

式中:

N ——观察次数;

M_{simul} ——第 i 次水分质量比的预测值;

M_{Exp} ——第 i 次水分质量比的试验测算值。

1.5 数据处理

采用 Excel 软件进行数据处理, 利用 Origin 2018 软

件绘图, 并进行非线性曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 预处理方式的选择

由表 2 可知, 与新鲜切片相比, 哈密瓜制干产品的 L^* 值随漂烫时间的增加而减小, 而 ΔE 先减小后增大。这是由于漂烫时间不足, 灭酶不充分导致产品褐变严重; 漂烫过度, 切片组织软烂, 产品营养成分损失严重。与漂烫工艺不同, 经柠檬酸预处理后的干燥样品的 L^* 值均有所提升, 干燥样品更加透亮; 且具有更小的 ΔE 值, 颜色得到有效保护。同时, 当柠檬酸从 0.4% 增加至 0.5% 时, ΔE 值从 17.717 6 增大至 19.015 6, 表明过度增加柠檬酸浓度, 反而不利于得到更好的干燥产品, 故 0.4% 柠檬酸为最佳的预处理工艺。

表 2 预处理方式对哈密瓜切片热风干燥色泽的影响

Table 2 Effects of different pretreatments on the color of cantaloupe slices during hot air drying

预处理	L	a	b	ΔE
新鲜切片	67.15	7.18	25.44	—
空白	60.52	13.85	44.57	21.316 7
漂烫 0.5 min	65.84	11.80	46.19	21.298 4
漂烫 1.0 min	65.98	12.07	44.53	19.741 1
漂烫 1.5 min	65.09	13.60	47.85	23.402 3
漂烫 2.0 min	62.61	14.69	47.21	23.563 4
漂烫 2.5 min	62.51	14.84	47.18	23.565 1
0.1% 柠檬酸浸渍	72.63	9.62	43.68	19.201 1
0.2% 柠檬酸浸渍	73.61	10.73	42.56	18.639 4
0.3% 柠檬酸浸渍	74.16	9.42	42.74	18.800 2
0.4% 柠檬酸浸渍	74.46	9.37	41.43	17.717 6
0.5% 柠檬酸浸渍	74.53	9.43	42.82	19.015 6

2.2 单因素试验

2.2.1 热风温度对哈密瓜切片热风干燥特性的影响 由图 1 可知, 温度升高后哈密瓜切片内水分子动能增大、活跃度升高, 切片表面水分快速挥发, 并与内部形成较大的水分梯度, 加速水分从内部向外表面的传质扩散过程, 缩短干燥时间。从干燥速率曲线可以看出, 干燥前 100 min 内干燥曲线急速下降, 之后趋于平缓直至达到干燥平衡。这是由于干燥初始, 切片内部水分扩散速率远大于表面水分挥发速率, 干燥曲线急速下降; 干燥持续进行, 切片含水率随之减少, 内部水分扩散速率逐渐减小, 以至于不能满足表面的挥发导致干燥速率降低, 干燥曲线趋于平缓。哈密瓜切片干燥受温度影响较为显著且无恒速干燥阶段, 55~75 °C 时干燥速率曲线相近, 干燥时长相差不大, 提升温度不能明显缩短干燥周期, 为减少能耗, 取 55 °C 进行热风干燥为宜。

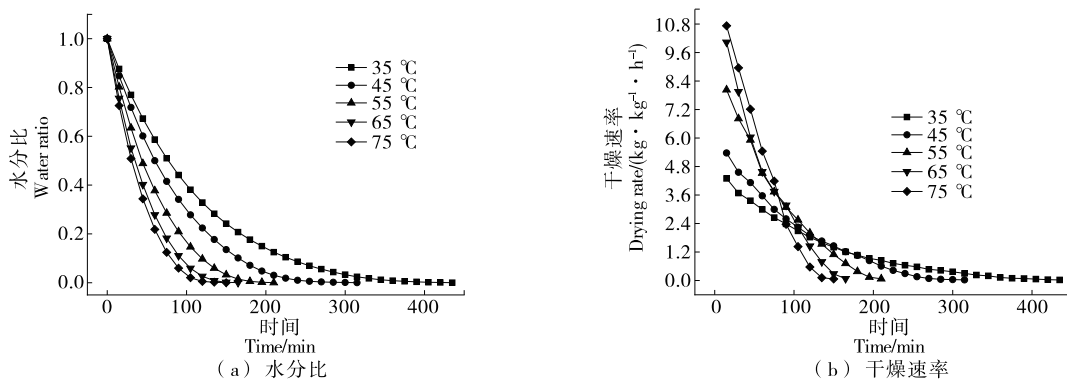


图1 不同热风温度下的水分比和干燥速率曲线

Figure 1 Water ratio curve and drying rate curve at different temperatures

2.2.2 热风速度对哈密瓜切片热风干燥特性的影响 由图2可知,水分比随热风风速的增加呈缓慢减小的趋势,表明哈密瓜切片干燥受风速影响并不显著。当热风速度为2.0 m/s时,干燥速率虽有所提升,但干燥曲线前半段与2.5 m/s却几乎重合,此时继续增大热风速度不能有效提高传质驱动力。当热风速度为0.5~2.5 m/s时,风速为2.5 m/s可以有效缩短干燥时间,至干燥结束所需时间为150 min,与2.0 m/s相比却仅缩短了15 min。综合考虑,2.0 m/s是较为合理的热风速度。

2.2.3 切片厚度对热风干燥特性的影响 由图3可知,哈密瓜切片受切片厚度影响较为显著,当切片厚度为10 mm时,干燥速率较小,干燥达到平衡用时较长;当切片厚度为4 mm时,干燥速率倍增,大大缩短了干燥周期。这是因为厚度越小,物料单位体积的表面积越大,与空气接触面越大,加快了传热效率;物料内部水分迁移通道变短,传质扩散阻力较小,更有利于切片内部自由水的传输和挥发,水分扩散系数增大,进而缩短干燥周期。哈密瓜切片厚度越小,干燥速率越快;但切片过薄,制干产品易

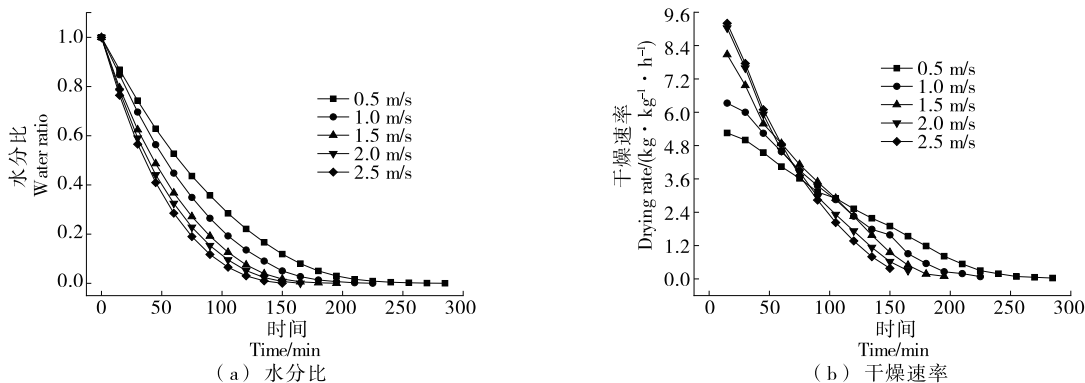


图2 不同热风速度下的水分比和干燥速率曲线

Figure 2 Water ratio curve and drying rate curve at different wind speeds

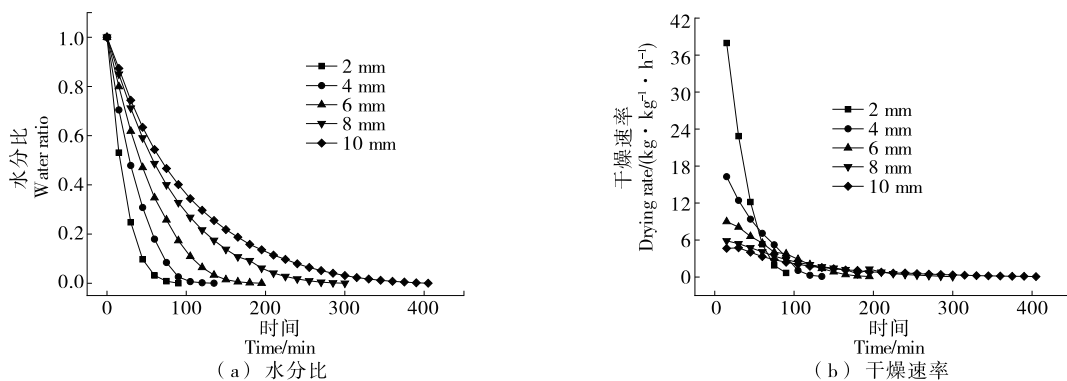


图3 不同切片厚度下的水分比和干燥速率曲线

Figure 3 Moisture ratio curve and drying rate curve at different thicknesses

碎、口感不佳,也不利于贮藏和运输。经对比分析,热风干燥的切片厚度取 6 mm 为宜。

2.3 水分扩散系数的计算与讨论

由表 3 可知,当热风速度为 0.5~2.5 m/s 时,哈密瓜切片的水分扩散系数仅提高了 $0.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,较热风温度和切片厚度对水分扩散系数的提升较小,与热风速度对干燥速率作用不显著相吻合。一般食品原料干燥水分扩散系数为 $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[28],Kumar 等^[29]对鲜切菠萝块质构降解后得到水分扩散系数为 $1.91 \times 10^{-8} \sim 2.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,效碧亮等^[30]基于 Weibull 分布获得百合热风薄层干燥水分扩散系数为 $1.213 \times 10^{-6} \sim 3.992 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,试验哈密瓜切片水分扩散系数为 $1.134 \times 10^{-7} \sim 4.908 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,介于二者之间且稍大于其他果蔬农产品。这是由于水分扩散系数不仅取决于物料的干燥方式和干燥条件,更与物料自身的品种和结构有关。

2.4 活化能的计算

图 4 为 D_{eff} 与热风温度的关系图,线性方程的斜率即 $-E_a/R$,计算得到哈密瓜切片热风干燥的活化能 $E_a = 28.15 \text{ kJ/mol}$ ($R^2 = 0.993\ 96$),与文献[31—32]的非常接近。说明干燥过程中从哈密瓜切片中去除 1 kg 水分所需的最低能量为 1 563 kJ,耗电约 0.43 kW·h。

表 3 水分扩散系数 D_{eff}

Table 3 The parameters of effect moisture diffusivity

热风温度		热风速度		切片厚度	
水平/ ℃	D_{eff} ($\times 10^{-7}$)	水平/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	D_{eff} ($\times 10^{-7}$)	水平/ mm	D_{eff} ($\times 10^{-7}$)
35	1.134 8	0.5	1.989 5	2	1.123 8
45	1.488 2	1.0	2.412 9	4	3.010 1
55	2.231 3	1.5	2.497 2	6	3.717 6
65	2.997 2	2.0	2.624 9	8	4.860 8
75	3.871 9	2.5	2.787 1	10	4.908 0

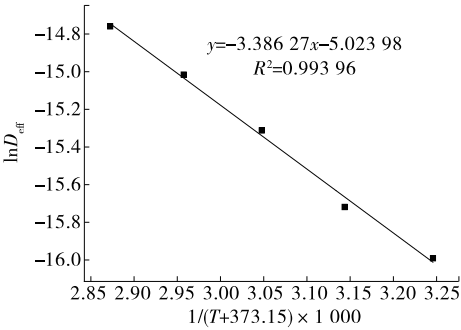


图 4 与热风温度的关系

Figure 4 Relationship between effective moisture diffusivity and hot-air temperature

2.5 干燥曲线数学模型的建立

2.5.1 干燥模型的拟合及选择 将表 1 中 9 种干燥模型分别对热风温度 55 ℃、热风速度 1.5 m/s 下 4 mm 厚的哈密瓜干燥曲线进行拟合和非线性回归分析,拟合结果和参数见表 4。由表 4 可知,所有模型 $R^2 \geq 0.98$, $S_{\text{RME}} \leq 1.1$ 。其中,Page 模型的 $R^2 = 0.998\ 3$ 、 S_{RME} 为 0.108 6,符合最佳模型应具备的最大 R^2 值和最小 S_{RME} 值。因此 Page 模型最适合用来描述哈密瓜切片的热风干燥。

2.5.2 最适干燥模型及参数确定 表 5 为不同干燥条件下 Page 模型的拟合参数和检验结果。由表 5 可知,干燥常数 k 值随热风温度和热风速度的增大而增大,随切片厚度的增大而减小; n 值随热风温度的增大而增大,随热风速度和切片厚度的增大而减小。利用 Excel 2016 软件对干燥常数 k 、 n 进行多元线性回归分析,得到干燥常数 k 、 n 的回归方程为:

$$k = 0.000\ 167T + 0.004\ 278U - 0.000\ 4D - 0.006\ 02 \quad (r = 0.954\ 169), \quad (10)$$

$$n = 0.002\ 926T - 0.053\ 63U - 0.038\ 59D + 1.311\ 906 \quad (r = 0.953\ 464), \quad (11)$$

式中:

表 4 不同模型的拟合结果

Table 4 Fit results for different models

模型名称	模型参数	R^2	$S_{\text{RME}}/\%$
Lewis	$k=0.019\ 27$	0.990 61	0.123 1
Henderson and Pabis	$a=1.037\ 76, k=0.019\ 92$	0.991 50	0.121 8
Modified Henderson and Pabis	$a=0.608\ 8, k=0.023\ 02, b=0.231\ 29, g=0.017\ 32, c=0.207\ 62, h=0.017\ 32$	0.988 43	0.596 7
Wang and Singh	$a=0.012\ 75, b=3.940\ 69E-005$	0.986 95	1.008 5
Page	$k=0.008\ 25, n=1.202\ 78$	0.998 30	0.108 6
Logarithmic	$a=1.073\ 22, k=0.017\ 17, c=-0.054\ 33$	0.997 25	0.117 3
Two term	$a=0.858\ 42, k_1=0.019\ 92, b=0.179\ 32, k_2=0.019\ 92$	0.989 95	0.755 9
Two term exponential	$a=1.732\ 16, k=0.025\ 7$	0.998 01	0.110 9
Verma	$a=1.121\ 82, k=0.021\ 4, g=10.259\ 27$	0.994 47	0.121 7

表 5 Page 模型拟合参数和检验结果

Table 5 The fitting parameters and test results of Page model

热风温度 T/℃	参数		R^2	$S_{RME}/\%$
	k	n		
35	0.003 79	1.201 31	0.998 45	0.120 5
45	0.007 05	1.150 58	0.998 50	0.105 5
55	0.008 25	1.202 78	0.998 30	0.108 6
65	0.007 79	1.289 35	0.998 77	0.081 3
75	0.011 75	1.278 22	0.998 36	0.074 9

热风速度 U/ (m·s ⁻¹)	参数		R^2	$S_{RME}/\%$
	k	n		
0.5	0.004 28	1.291 81	0.998 03	0.122 1
1.0	0.005 91	1.283 22	0.997 87	0.139 0
1.5	0.007 39	1.247 16	0.997 78	0.132 9
2.0	0.009 16	1.246 56	0.999 02	0.077 2
2.5	0.012 55	1.162 77	0.998 55	0.090 3

切片厚度 D/mm	参数		R^2	$S_{RME}/\%$
	k	n		
2	0.011 89	1.321 83	0.998 36	0.058 9
4	0.010 95	1.217 25	0.998 29	0.099 2
6	0.009 51	1.095 88	0.998 32	0.057 9
8	0.008 38	1.061 16	0.998 21	0.099 8
10	0.008 12	1.000 70	0.997 19	0.050 7

T——热风温度,℃;

U——热风速度,m/s;

D——切片厚度,mm。

通过回归分析,自变量热风温度 T 、热风速度 U 及切片厚度 D 对应的系数检验值均 <0.05 ,应变量 k 、 n 回归方程的 P 值分别为 $4.68\text{E}-006$ 、 $5.07\text{E}-006$,均 <0.05 ,可以认为干燥常数 k 、 n 与热风温度 T 、热风速度 U 、切片厚度 D 的线性关系成立。从而得到哈密瓜切片热风干燥因素关于 Page 模型的数学表达式为

$$M_R = \exp[-(0.000\ 167T + 0.004\ 278U - 0.00\ 04D - 0.006\ 02)t^{(0.002\ 926T - 0.053\ 63U - 0.038\ 59D + 1.311\ 906)}] \quad (12)$$

2.5.3 Page 模型验证 以 0.4%柠檬酸预处理后热风速度为 1.5 m/s,切片厚度为 4 mm,热风温度分别为 35、55、75℃进行验证实验,Page 干燥模型预测值与实测值见图 5。由图 5 可知,3 种不同的试验条件下预测值和实测值吻合程度较高,表明该数学模型可以准确描述及预测哈密瓜切片热风干燥过程中的水分去除规律。

3 结论

对比不同的预处理工艺,发现柠檬酸处理后的哈密瓜干制产品色泽明显优于漂烫预处理,且 0.4%柠檬酸是最佳的护色工艺。哈密瓜切片无恒速干燥阶段,热风速度对干燥影响作用并不显著。综合考虑,热风温度 55℃、

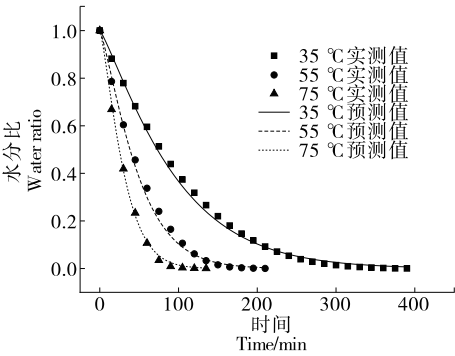


图 5 实测与 Page 模型预测水分比随干燥时间的变化

Figure 5 Comparison of moisture ratio changes over time measured or predicted by Page model

热风速度 2.0 m/s、切片厚度 6 mm 是较为合理的热风干燥工艺。试验条件范围内,哈密瓜切片的水分扩散系数为 $1.134\ 8 \times 10^{-7} \sim 4.908\ 0 \times 10^{-7}\ \text{m}^2/\text{s}$ 且稍大于果蔬等农产品,活化能为 28.15 kJ/mol。对比 9 种干燥模型,发现 Page 模型拟合精度最高,最适合用来描述哈密瓜的热风干燥过程,其干燥动力学模型方程为 $M_R = \exp[-(0.000\ 167T + 0.004\ 278U - 0.000\ 4D - 0.006\ 02)t^{(0.002\ 926T - 0.053\ 63U - 0.038\ 59D + 1.311\ 906)}]$ 。关于复合护色预处理工艺的探讨还有待进一步研究。

参考文献

[1] SOLVAL K M, SUNDARARAJAN S, ALFARO L, et al. Development of cantaloupe (Cucumis melo) juice powders using spray drying technology[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46 (1): 287-293.

[2] 李佳, 白羽嘉, 黄婷婷, 等. 干制温度对哈密瓜片品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(14): 58-63.

LI Jia, BAI Yu-jia, HUANG Ting-ting. Effect of dry temperature on the quality of Hami Melon slice [J]. Food Research and Development, 2018, 39(14): 58-63.

[3] 杜娟. 新疆哈密瓜贮藏质量安全影响因素与对策研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014: 16-19.

DU Juan. The effect factors and study on storage quality and safety of Xinjiang Hami-melon[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014: 16-19.

[4] 李佳, 玛尔哈巴·帕尔哈提, 白羽嘉, 等. 不同包装贮藏方式对哈密瓜片品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 12-17.

LI Jia, MAERHABA Paerhati, BAI Yu-jia, et al. Effect of different packaging and storage methods on the quality of Hami Melon slice[J]. Storage and Process, 2020, 20(1): 12-17.

[5] 张容鸽, 邓浩, 梁振深, 等. HS-SPME-GC-MS 法分析西州蜜 25 号甜瓜贮藏中的香气成分[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(6): 98-105.

ZHANG Rong-hu, DENG Hao, LIANG Zhen-shen, et al. Analysis of aroma compounds of muskmelon Xizhoumi 25 during storage by HS-SPME-GC-MS[J]. Storage and Process, 2017, 17(6): 98-105.

- [6] ZIELINSKA Magdalena, MICHALSKA Anna. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 671-680.
- [7] RAQUEL Pinho F Guiné, FRANCISCA Henriques, MARIA João Barroca. Mass transfer coefficients for the drying of pumpkin (*Cucurbita moschata*) and dried product quality [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(1): 176-183.
- [8] 赵泽颖, 袁越锦, 王栋, 等. 多指标试验公式法优化哈密瓜片真空热风干燥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 140-146.
ZHAO Ze-yin, YUAN Yue-jin, WANG Dong, et al. Optimization of vacuum hot air drying system for Hami melon slice by multi-index-experimental formula[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 140-146.
- [9] 许牡丹, 曹晴, 毛跟年, 等. 猕猴桃营养咀嚼片制备工艺优化与质量评价[J]. 食品与机械, 2016, 32(8): 188-191.
XU Mu-dan, CAO Qing, MAO Gen-nian, et al. Optimization of preparation technology and quality evaluation of nutrition of kiwifruit[J]. Food & Machinery, 2016, 32(8): 188-191.
- [10] 方芳, 毕金峰, 李宝玉, 等. 不同干燥方式对哈密瓜干燥产品品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(5): 68-72.
FANG Fang, BI Jin-feng, LI Bao-yu, et al. Effect of different drying methods on quality of Hami-melon products[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(5): 68-72.
- [11] BI Jin-fen, DING Yuan-yuan, BAI Sha-sha, et al. Influence of different drying methods on aroma compounds in hami-melon using headspace solid phase micro extraction[J]. Asian Journal of Chemistry, 2011, 23(11): 5 045-5 050.
- [12] 毕金峰, 魏益民, 王秋, 等. 哈密瓜变温压差膨化干燥工艺优化研究[J]. 农业工程学报, 2008(3): 232-237.
BI Jin-feng, WEI Yi-min, WANG Di, et al. Optimization of explosion puffing drying technology for Hami melon at variable temperature and pressure difference[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008(3): 232-237.
- [13] 王秋, 毕金峰, 孟宪军. 哈密瓜变温压差膨化干燥技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2008(3): 286-288, 227.
WANG Di, BI Jin-feng, MENG Xian-jun, et al. Review on explosion puffing drying by modified temperature and pressure for Hami-melon[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008(3): 286-288, 227.
- [14] WU Long, ORIKASA T, OGAWA Y, et al. Vacuum drying characteristics of eggplants[J]. J Food Eng, 2007, 83(3): 422-429.
- [15] 乔晓玲, 闫祝伟, 张原飞, 等. 食品真空冷冻干燥技术研究进展[J]. 食品科学, 2008(5): 469-474.
QIAO Xiao-lin, YAN Zhu-wei, ZHANG Yuan-fei, et al. Research progress on food freeze-drying [J]. Food Science, 2008(5): 469-474.
- [16] 肖鑫, 陶乐仁, 习德成, 等. 冷冻干燥中升华界面移动的微 CT 实验研究[J]. 工程热物理学报, 2007(2): 319-321.
XIAO Xin, TAO Le-ren, XI De-cheng, et al. Micro-CT experimental study on sublimation characteristics of freeze-drying process[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007(2): 319-321.
- [17] 江水泉, 张海东, 刘木华. 真空冷冻干燥技术在三七加工中的应用[J]. 粮食与食品工业, 2003(1): 36-38.
JIANG Shui-quan, ZHANG Hai-dong, LIU Mu-hua. Freeze drying technology and it's use on the pseudo-ginseng processing [J]. Cereal & Food Industry, 2003(1): 36-38.
- [18] 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 262-269.
ZHENG Xia, XIAO Hong-wei, WANG Li-hong, et al. Shorting drying time of Hami-melon slice using infrared radiation combined with air impingement drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 262-269.
- [19] PU Yuan-yuan, SUN Da-wen. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution[J]. Biosystems Engineering, 2017, 156: 108-119.
- [20] 张记, 彭桂兰, 张雪峰, 等. 黄芪切片热风干燥特性及动力学模型研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 22-28, 56.
ZHANG Ji, PENG Gui-lan, ZHANG Xue-feng, et al. Study on hot-air drying characteristics and kinetics model of astragalus slice[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 22-28, 56.
- [21] 常安太, 郑霞, 肖红伟, 等. 哈密瓜干燥技术现状与装备研究展望[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(6): 61-67.
CHANG An-tai, ZHENG Xia, XIAO Hong-wei, et al. The current situation of Hami-melon drying technology and the prospect of equipment research[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(6): 61-67.
- [22] 温馨, 胡锐, 赵金红, 等. 不同漂烫方式结合 CaCl_2 预处理对哈密瓜品质的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 231-237.
WEN Xin, HU Rui, ZHAO Jin-hong, et al. Effect of different blanching ways combined with CaCl_2 treatment on quality of Hami-melon [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 231-237.
- [23] 许建, 马西欣, 陈俊科, 等. 哈密瓜干制过程中褐变抑制工艺的研究[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(4): 35-37.
XU Jian, MA Xi-xin, CHEN Jun-ke, et al. Study on browning inhibition process in dried Hami melon[J]. Food and Nutrition in China, 2016, 22(4): 35-37.
- [24] 毕金峰, 方芳, 丁媛媛, 等. 预处理对哈密瓜变温压差膨化干燥产品品质的影响[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 15-18.
BI Jin-feng, FANG Fang, DING Yuan-yuan, et al. Effect of different pretreatments on the product quality of explosion puffing drying for hami-menlo[J]. Food & Machinery, 2010, 26(2): 15-18.
- [25] 金敬红, 范小东, 陈文华, 等. 不同预处理方式对微波干燥哈密瓜品质的影响[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(4): 32-35.
JIN Jing-hong, FAN Xiao-dong, CHEN Wen-hong, et al. Effect of different pretreatments on the quality of cantaloupe dried by microwave[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(4): 32-35.

(下转第 142 页)