

胡萝卜热泵干燥特性及动力学模型分析

李改莲, 韩录丛, 王广红, 彭钰航, 金听祥*
(郑州轻工业大学 能源与动力工程学院, 郑州 450002)

摘要: **目的** 优化胡萝卜的热泵干燥工艺, 并提升胡萝卜干燥后的品质。**方法** 研究干燥初始温度、干燥温升值和切片厚度对胡萝卜热泵干燥特性的影响, 并探讨上述条件与有效水分扩散系数和干燥活化能的关系。确定可以精确预测胡萝卜热泵干燥时含水率变化的干燥动力学模型, 进而预测胡萝卜在不同热泵干燥条件下的体积变化规律。**结果** 干燥速率的变化与初始干燥温度、温升值的变化呈正相关, 与切片厚度呈负相关; 胡萝卜在热泵干燥过程中表现为降速过程, 其中, 切片厚度对干燥速率的影响最大, 温升值对干燥速率的影响最小; 对比分析了 4 种薄层干燥模型, Page 模型能更好地描述胡萝卜的热泵干燥过程和水分迁移规律, 模型所得拟合值相对于试验值的平均误差为 5.76%; 在此次试验范围内, 胡萝卜的有效水分扩散系数介于 $3.040 \times 10^{-10} \sim 7.155 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。该系数随着干燥温度的提高、温升值的增大及切片厚度的减小而呈增加的趋势。通过 Arrhenius 方程计算得到该试验条件下胡萝卜的干燥活化能为 13.374 kJ/mol。**结论** Page 模型能够更好地预测胡萝卜在热泵干燥过程中水分的迁移规律, 从而优化热泵干燥工艺参数, 为胡萝卜热泵干燥的工业化运用提供理论基础。

关键词: 干燥特性; 干燥动力学; 热泵干燥; 干燥活化能; 有效水分扩散系数

中图分类号: TS255.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)01-0010-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.002

Drying Characteristics and Dynamic Model Analysis of Carrot Heat Pump Drying

LI Gailian, HAN Lucong, WANG Guanghong, PENG Yuhang, JIN Tingxiang*

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the heat pump drying process and improve the quality of dried carrots. The effects of the initial drying temperature, drying temperature rise value and slice thickness on the heat pump drying characteristics of carrots were investigated, and the relations of these conditions on the effective moisture diffusion coefficient and drying activation energy were explored. A drying kinetic model that could accurately predict the changes in moisture content of carrots during heat pump drying was identified, thus the moisture migration pattern of carrots under different heat pump drying conditions could be predicted. The variation of drying rate was positively correlated with the variation of initial drying temperature and temperature rise value, and negatively correlated with slice thickness. The carrot heat pump drying process showed a decreasing rate, where the slice thickness had the greatest influence on the drying rate and the temperature rise value $\Delta\theta$ had the least influence. Comparing analysis of four thin-layer drying models showed that the Page model could better describe the drying process and moisture migration of carrot heat pump, with an average error of 5.76% in the fitted values relative to the test values. Within the scope of this test, the effective water diffusion coefficient of carrots ranged from $3.040 \times 10^{-10} \sim 7.155 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. This coefficient showed an increasing trend as the drying temperature, the temperature rise value increased, and the slice thickness decreased. The Arrhenius

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102320075); 河南省研究生教育创新培养基地项目 (YJS2021JD05)

*通信作者

equation showed that the activation energy of carrot drying under this test condition was 13.374 kJ/mol. In conclusion, the Page model can better predict the moisture migration pattern during carrot heat pump drying and thus optimize the heat pump drying process parameters. The research conducted in this paper provides a theoretical basis for the industrial production of carrot heat pump drying.

KEY WORDS: drying characteristics; drying kinetics; heat pump drying; activation energy; effective moisture diffusion coefficient

胡萝卜 (*Daucus carota* var. *sativa* Hoffm) 是一种营养丰富的蔬菜, 富含糖类、维生素等人体所需的营养成分, 在增强免疫力、预防心脏疾病、刺激皮肤代谢等^[1-3]方面有着不可忽视的作用。胡萝卜在我国的栽培由来已久, 随着人们对健康饮食理念的重视及对胡萝卜营养价值认识的不断加深, 近年来, 市场对胡萝卜产品的需求日益增加, 主要以新鲜胡萝卜为主。新鲜胡萝卜的含水量约为 86%~95%, 容易受到微生物活动和含水率下降的影响, 使它在采收后无法长期保持最优品质, 在贮藏及运输时会降解或腐败。干燥可以显著延长胡萝卜的贮藏时间, 减少因腐烂变质造成的资源浪费^[4]。热泵干燥的温度较低, 果蔬在干燥过程中水分的蒸发速度较慢, 能够更好地保持干制品的原有颜色、风味和营养成分, 故认为胡萝卜最适宜采用热泵干燥^[5-6]。

在进行热泵干燥时, 水分的迁移规律可以使用薄层干燥动力学模型进行分析, 目的是寻找胡萝卜在热泵干燥过程中含水率随干燥工艺参数和时间的变化规律, 从而提高干燥效率和产品品质, 进而优化热泵干燥工艺参数。中外学者已针对杏鲍菇^[7]、豌豆^[8]、香蕉^[9]、香菇^[10]等进行了深入研究。现有文献中, 针对胡萝卜干燥动力学的研究多集中于热风干燥^[11]、微波真空干燥^[12]。种翠娟等^[13]对胡萝卜进行了热风干燥, 研究发现, 有效水分扩散系数的变化趋势与物料厚度、风速和干燥温度呈正相关, 其范围为 $0.84 \times 10^{-9} \sim 6.69 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。聂波等^[14]研究发现, Page 模型的试验值与计算值拟合较好, 在热风干燥温度为 50 °C 时, 干燥时间较短, 胡萝卜的色泽和胡萝卜素保持较好。Saleh 等^[15]研究发现, 在含水率为 30%、干燥温度为 60 °C、回火时间为 3 h 条件下干燥所得的干制品的品质最佳, 总胡萝卜素保留率为 (76.9±2.42)%, 色差为 (8.1±1.67), 复水率为 (0.4±0.01)。范浩等^[16]研究发现, 在胡萝卜真空干燥过程中, 厚度为 4、6 mm 时对应的干燥活化能分别为 31.46、33.06 kJ/mol, Midilli and Kucuk 模型可以更好地描述水分的迁移过程。

目前, 运用热泵干燥方法对胡萝卜干燥特性和薄层干燥模型进行研究的文献较少。文中从干燥初始温度、干燥温升值和切片厚度 3 个方面对胡萝卜热泵干燥特性进行研究, 并探讨了这 3 个方面对有效水分扩散系数的影响, 最终得出胡萝卜热泵干燥数学模型, 并验证模型的准确性。通过 Arrhenius 方程计算胡萝卜的干燥活化能及有效水分扩散系数, 以期对胡萝卜热泵干燥工艺优化提供理论依据和技术支持。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料: 胡萝卜, 采购于郑州丹尼斯超市, 选择长径相近、熟度适中、未木制化、皮薄肉厚、色泽红亮的鲜胡萝卜。

主要仪器: CG-05HA 空气能热泵箱式一体节能烘干机, 广东创陆制冷科技有限公司; FBS-750A 快速水分仪, 厦门弗布斯检测设备有限公司; TA.TOUCH 质构仪, 上海保圣实业发展有限公司; 200T 高速多功能粉碎机, 永康铂欧五金制品有限公司; DC-3010 低温恒温槽, 温度波动范围为 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 江苏天翎仪器有限公司; QP-1102 多功能切菜机, 中山市百客思电器有限公司; ES500 精密电子天平, 天津市德安特传感技术有限公司; YS3060 分光测色仪, 深圳三恩时科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 处理流程

实验处理流程如图 1 所示。干燥过程主要包括 2 个部分, 第 1 阶段的温度为初始温度 θ , 将物料从初始温度干燥到含水率为 25%~30% 后进入第 2 阶段。第 2 阶段的温度为 $\theta + \Delta\theta$ 。

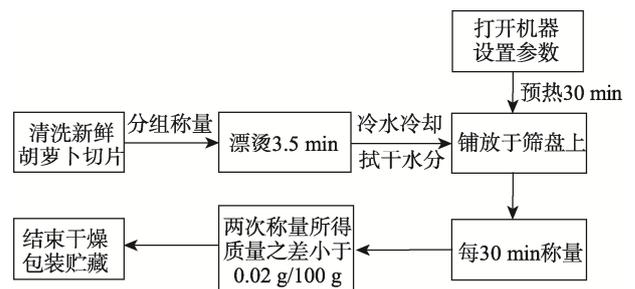


图 1 干燥处理流程

Fig.1 Flow chart of drying treatment

1.2.2 不同因素对胡萝卜热泵干燥特性的影响

主要研究第 1 阶段的初始温度 θ 、第 2 阶段温升值 $\Delta\theta$ 、切片厚度等因素对胡萝卜热泵干燥特性的影响。在温升值 $\Delta\theta$ 为 10 °C、切片厚度为 4 mm 的条件下, 分别考察了初始温度 θ 为 50、55、60 °C 对胡萝卜热泵干燥特性的影响。在初始温度 θ 为 55 °C、切片厚度为 4 mm 的条件下, 分别考察了温升值 $\Delta\theta$ 为 5、10、15 °C

对胡萝卜热泵干燥特性的影响。在初始温度 θ 为 55 °C、温升值 $\Delta\theta$ 为 10 °C 的条件下, 分别考察了切片厚度 3、4、5 mm 对胡萝卜热泵干燥特性的影响。

1.2.3 干基含水率

干基含水率的计算见式 (1) [17]。

$$W_d = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中: W_d 为 t 时刻的干基含水率; m_w 为湿胡萝卜质量; m_d 为胡萝卜的绝干质量。

1.2.4 干燥速率

干燥速率的计算见式 (2) [18]。

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

式中: D_R 为干燥速率, g/h; M_{t+dt} 和 M_t 分别为样品在 $t+dt$ 和 t 时刻的含水率。

1.2.5 水分比

水分比的计算见式 (3) [19]。

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

式中: M_R 为水分比; M_0 、 M_t 和 M_e 分别为样品的初始干基含水率、 t 时刻干基含水率和平衡干基含水率。 M_e 可忽略不计, 因此水分比可以根据式 (4) 计算。

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (4)$$

1.2.6 有效水分扩散系数

根据菲克定律, 通过实验所得水分比 M_R 计算有效水分扩散系数 D_{eff} , 见式 (5) [20]。

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

将式 (5) 等号两边同时转换为对数形式, 得到式 (6)。

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2} \quad (6)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数, m^2/s ; L 为干燥物料的厚度, m ; t 为物料干燥时间, s 。

根据上述方程, 绘制 $\ln M_R$ 与 t 的函数图, 计算直线斜率 k_1 , 从而得出 D_{eff} 。

$$k_1 = -\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} \quad (7)$$

1.2.7 干燥活化能

结合有效水分扩散系数 D_{eff} , 根据 Arrhenius 方程, 由式 (8) 计算干燥活化能 E_a [21]。

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

式中: D_0 为水分扩散常数, m^2/s ; θ 为初始温

度, °C; R 为气体常数, $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

将式 (8) 转变为对数形式, 可得式 (9)。

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{\theta + 273.15} \quad (9)$$

由式 (9) 可知, $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/(\theta+273.15)$ 有关, 拟合后计算直线斜率 k_2 , 从而得出 E_a , 如式 (10) 所示。

$$k_2 = -\frac{E_a}{R} \quad (10)$$

1.2.8 薄层干燥数学模型

胡萝卜片的干燥属于薄层干燥, 通过阅读和总结文献, 这里选取 4 种具有代表性的薄层干燥模型对其进行拟合分析 [9,22], 得到精度最高的干燥模型, 从而精确预测胡萝卜热泵干燥过程中的水分迁移规律。模型如表 1 所示。

表 1 薄层干燥模型
Tab.1 Thin layer drying model

模型序号	模型名称	模型方程
1	Lewis	$M_R = \exp(-kt)$
2	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$
4	Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$

采用相关系数 R^2 、卡方检验值 χ^2 和残差平方和 R_{SS} 这 3 个指标进行评价, 并确定最优模型。评价参数的计算见式 (11) ~ (13)。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{\text{RRp},i} - M_{\text{RRe},i})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{M_{\text{RRp},i}} - M_{\text{RRe},i})^2} \quad (11)$$

$$R_{\text{SS}} = \sum_{i=1}^n (M_{\text{RRp},i} - M_{\text{RRe},i})^2 \quad (12)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{\text{RRp},i} - M_{\text{RRe},i})^2}{n - m} \quad (13)$$

式中: $M_{\text{RRp},i}$ 、 $M_{\text{RRe},i}$ 分别为水分比的计算值和实验值; n 、 m 分别为实验值和计算值的数量。

2 结果与分析

2.1 初始温度对胡萝卜热泵干燥特性的影响

在不同初始温度下, 胡萝卜热泵干燥特性和干燥速率曲线如图 2 所示。由图 2a 可知, 在干燥温升值和切片厚度恒定时, 初始干燥温度为 60 °C 时最快达到干燥标准, 比初始温度为 50 °C 时的干燥时间缩短了 13.63%。分析原因是高温加速了胡萝卜组织结构的塌陷, 使得细胞内的结合水快速逸出, 干燥速率增大, 此

结论与马有川等^[23]对苹果的研究结果一致。由图 2b 可以看出, 干燥速率随着初始温度的升高而增大, 在干燥后期因切片含水率下降, 导致切片中心水分扩散速率降低, 干燥速率总体呈现下降趋势。

2.2 温升值对胡萝卜热泵干燥特性的影响

整体来看, 胡萝卜热泵干燥过程为降速过程。为了提升干燥后期的干燥速率, 在胡萝卜的含水率为 25%~30% 时提高干燥温度。在不同温升值下, 胡萝卜热泵干燥特性和干燥速率曲线见图 3。由图 3 可知, 在初始温度及切片厚度恒定的条件下, 随着温升值的增大, 胡萝卜的干燥速率得到明显提升, 在温升值为 15 °C 时最快达到干燥标准, 干燥时间比温升值为 5 °C 时缩短了 20%, 干燥速率仍然维持下降趋势。

2.3 切片厚度对胡萝卜热泵干燥特性的影响

在不同切片厚度下, 胡萝卜的热泵干燥特性及干燥速率曲线如图 4 所示。由图 4a 可知, 胡萝卜的干燥速率与切片厚度呈负相关。当切片厚度由 3 mm 升

至 5 mm 时, 其干燥时间增加了约 27.27%。由图 4b 可知, 随着干燥的进行, 干燥速率呈下降趋势。切片厚度越大, 水分由内部向表面迁移的距离越远, 内部的传热传质阻力越大, 干燥速率越慢。此结论与唐小闲等^[24]对小黄姜的研究结果一致。

2.4 模型的拟合与验证

2.4.1 模型的拟合与最佳模型的选择

将实验数据与 4 种薄层干燥模型进行拟合, 得出胡萝卜片在不同干燥条件下的模型参数值和评价指标, 结果如表 2~5 所示。

由表 2~5 的拟合结果可知, Lewis(Newton)模型的决定系数 R^2 的取值范围为 0.985 1~0.991 1, 残差平方和的取值范围为 4.1×10^{-3} ~ 8.9×10^{-3} , 卡方检验值 χ^2 的取值范围为 4.07×10^{-4} ~ 8.87×10^{-4} ; Page 模型的决定系数 R^2 的取值范围为 0.994 8~0.999 8, 残差平方和的取值范围为 8.28×10^{-5} ~ 3.1×10^{-3} , 卡方检验值 χ^2 的取值范围为 9.21×10^{-6} ~ 3.41×10^{-4} ; Henderson 模

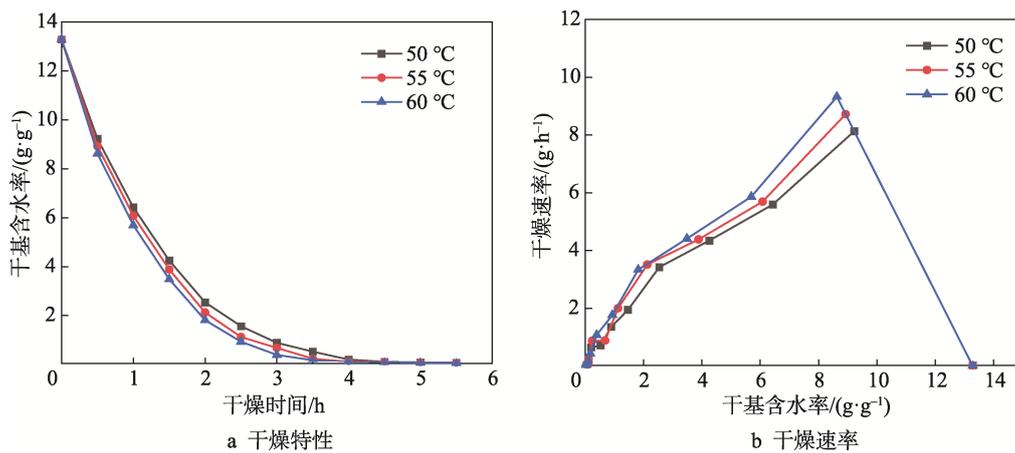


图 2 不同初始温度下胡萝卜热泵干燥特性及干燥速率曲线
Fig.2 Heat pump drying characteristics and drying rate curves of carrots at different initial temperature

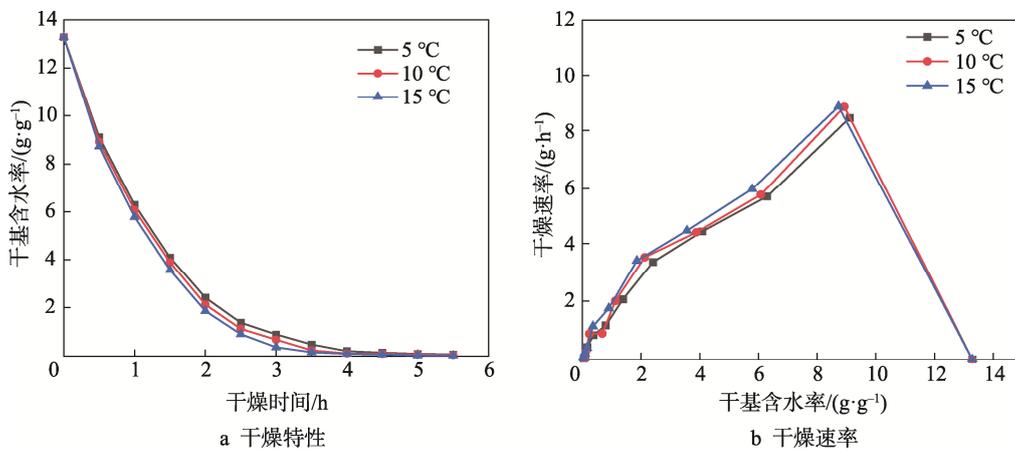


图 3 不同温升值下胡萝卜热泵干燥特性及干燥速率曲线
Fig.3 Heat pump drying characteristics and drying rate curves of carrots at different temperature rise

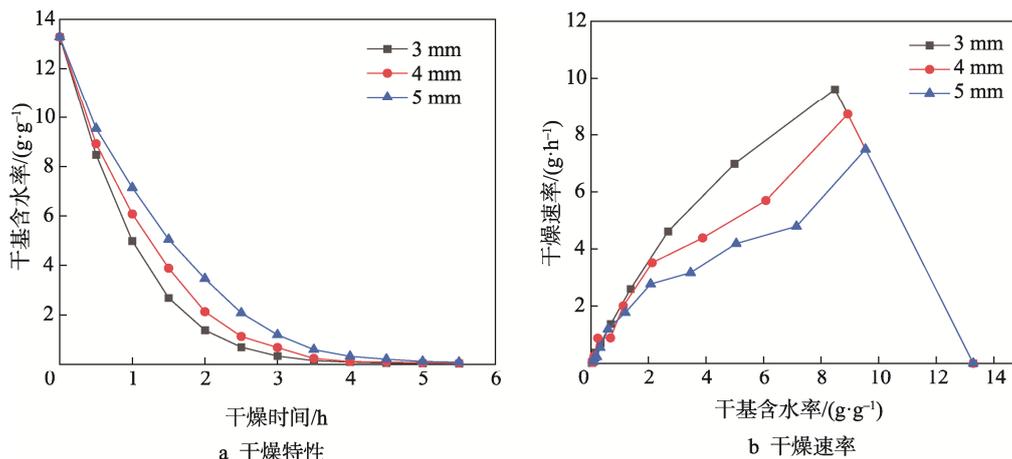


图4 不同切片厚度下胡萝卜热泵干燥特性及干燥速率曲线
Fig.4 Heat pump drying characteristics and drying rate curves of carrots at different slice thickness

表2 Lewis(Newton)模型拟合结果
Tab.2 Fitting results of Lewis (Newton) model

实验条件			模型参数		评价指标		
初始温度/°C	温升值/°C	切片厚度/mm	<i>k</i>	<i>R</i> ²	残差平方和/10 ⁻³	$\chi^2/10^{-4}$	
50	10	4	0.797 5	0.991 1	4.7	4.74	
55	10	4	0.864 3	0.988 5	5.7	5.73	
60	10	4	0.929 2	0.989 0	5.1	5.09	
55	5	4	0.823 2	0.990 1	5.2	5.18	
55	15	4	0.913 9	0.988 6	5.4	5.39	
55	10	3	1.031 5	0.990 3	4.1	4.07	
55	10	5	0.701 9	0.985 1	8.9	8.87	

表3 Page 模型拟合结果
Tab.3 Fitting results of Page model

实验条件			模型参数		评价指标		
初始温度/°C	温升值/°C	切片厚度/mm	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²	残差平方和/10 ⁻³	$\chi^2/10^{-4}$
50	10	4	0.747 3	1.140 4	0.998 3	0.913	1.02
55	10	4	0.813 4	1.154 9	0.996 9	1.500	1.68
60	10	4	0.885 5	1.147 4	0.996 7	1.500	1.69
55	5	4	0.771 7	1.148 2	0.997 9	1.100	1.19
55	15	4	0.866 8	1.156 0	0.997 0	1.400	1.54
55	10	3	0.996 0	1.172 0	0.999 8	0.082 8	0.092 1
55	10	5	0.637 2	1.163 7	0.994 8	3.100	3.41

表4 Henderson 模型拟合结果
Tab.4 Fitting results of Henderson mode

实验条件			模型参数		评价指标		
初始温度/°C	温升值/°C	切片厚度/mm	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²	残差平方和/10 ⁻³	$\chi^2/10^{-4}$
50	10	4	1.098 6	0.868 5	0.995 6	2.300	2.600
55	10	4	1.110 1	0.948 4	0.993 6	3.200	3.540
60	10	4	1.108 5	1.017 6	0.992 4	2.900	3.290
55	5	4	1.104 6	0.900 3	0.994 9	2.600	2.940
55	15	4	1.115 9	1.006 9	0.993 8	2.900	3.230
55	10	3	1.163 0	1.176 8	0.998 4	0.643	0.715
55	10	5	1.092 9	0.761 2	0.989 8	6.100	6.750

表 5 Wang-Singh 模型拟合结果
Tab.5 Fitting results of Wang-Singh mode

实验条件			模型参数		评价指标		
初始温度/°C	温升值/°C	切片厚度/mm	k	n	R^2	残差平方和/ 10^{-3}	$\chi^2/10^{-3}$
50	10	4	-0.506 7	0.061 7	0.944 5	29.4	3.3
55	10	4	-0.527 9	0.065 8	0.922 8	38.6	4.3
60	10	4	-0.544 7	0.069 3	0.888 4	51.8	5.8
55	5	4	-0.515 1	0.063 3	0.937 8	32.3	3.6
55	15	4	-0.541 2	0.068 5	0.897 3	48.7	5.4
55	10	3	-0.566 6	0.073 8	0.808 9	80.1	8.9
55	10	5	-0.472 6	0.054 8	0.978 2	13.0	1.5

型的 R^2 的取值范围为 0.989 8~0.998 4, 残差平方和的取值范围为 $6.43 \times 10^{-4} \sim 6.1 \times 10^{-3}$, χ^2 的取值范围为 $7.15 \times 10^{-5} \sim 6.75 \times 10^{-4}$; Wang-Singh 模型的 R^2 的取值范围为 0.808 9~0.978 2, 残差平方和的取值范围为 $1.3 \times 10^{-2} \sim 8.01 \times 10^{-2}$, χ^2 的取值范围为 $1.5 \times 10^{-3} \sim 8.9 \times 10^{-3}$ 。 R^2 越大, 残差平方和、 χ^2 越小, 实验值与拟合值之间的偏离程度和差异度越小, 模型的拟合效果越好。通过对比发现, Page 模型的 R^2 最大, 残差平方和、 χ^2 最小, 因此 Page 模型能较好地表述胡萝卜热泵干燥时水分的变化过程, 可以精确表述胡萝卜热泵干燥过程。

2.4.2 模型中参数的确定

在 Page 模型中参数 k 、 n 与试验条件有关, 试验条件包括初始温度 (θ)、温升值 ($\Delta\theta$) 和切片厚度 (L)。可将参数 k 、 n 定义为这些变量的一次函数^[25], 见式 (14) ~ (15)。

$$k = \alpha_A + \beta_A \theta + \gamma_A \Delta\theta + \chi_A L \quad (14)$$

$$n = \alpha_B + \beta_B \theta + \gamma_B \Delta\theta + \chi_B L \quad (15)$$

式中, α 、 β 、 γ 、 χ 为待定系数。

利用 Page 模型的拟合结果对参数 k 、 n 进行线性拟合, 得到待定系数 α 、 β 、 γ 、 χ , 其结果如表 6 所示。

表 6 参数 k 、 n 的待定系数

Tab.6 Undetermined coefficients of parameters k and n

参数	α	β	γ	χ
k	0.679 24	0.013 82	0.009 51	-0.179 4
n	1.124 96	7×10^{-4}	7.8×10^{-4}	-0.004 15

将参数 k 、 n 的各个系数代入式 (14) ~ (15), 可得式 (16) ~ (17)。

$$k = 0.679 24 + 0.013 82\theta + 0.009 51\Delta\theta - 0.179 4L \quad (16)$$

$$n = 1.124 96 + 0.000 7\theta - 0.000 78\Delta\theta - 0.004 15L \quad (17)$$

将拟合所得的模型参数 k 、 n 代入 Page 模型, 得

到胡萝卜片的热泵干燥数学模型, 见式 (18)。

$$M_R = \exp[-(0.679 24 + 0.013 82\theta + 0.009 51\Delta\theta - 0.179 4L) \times \tau^{(1.124 96 + 0.000 7\theta - 0.000 78\Delta\theta - 0.004 15L)}] \quad (18)$$

2.4.3 模型的验证

为了验证模型的准确性, 在初始温度为 55 °C、温升值为 10 °C、切片厚度为 4 mm 的热泵工况下进行验证, 将试验值与拟合值进行对比, 结果如图 5 所示。拟合值相对于试验值的最大误差为 8.66%, 平均误差为 5.76%, 说明 Page 模型能够较好地预测胡萝卜热泵干燥过程中水分的迁移规律。

2.5 有效水分扩散系数计算

有效水分扩散系数 D_{eff} 表示水分在物料干燥过程中的扩散情况, 反映物料在一定条件下脱水的难易程度, 通过式 (5) ~ (7) 计算得到胡萝卜片在不同热泵干燥条件下的有效水分扩散系数^[26]。如表 7 所示, 随着初始温度和温升值的升高, 胡萝卜的有效水分扩散系数也相应增大。在初始温度为单因素实验条件下, 初始温度由 50 °C 增至 60 °C 时, 有效水分扩散系数由 $4.854 7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 增至 $5.652 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$; 在单一温升值的试验条件下, 有效水分扩散系数从 $5.079 8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 增至 $5.469 6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。经过高温处理后, 细胞壁的通透性增加, 使得胡萝卜内部的水分更易逸出, 因此加速了水分子的扩散和迁移过程, 也使胡萝卜的有效水分扩散系数相应增大。当初始温度和温升值不变时, 厚度增至 5 mm, 有效水分扩散系数则降至 $3.040 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 随着厚度的增加而减小。这是因为厚度的增加, 导致水分子的迁移距离增大, 从而使有效水分扩散率呈线性下降趋势, 有效水分扩散系数也相应下降。这一结论与张卫鹏等^[27]对茯苓的研究结果一致。根据以上结果, 可以得出影响有效水分扩散系数的因素依次为厚度 > 初始温度 > 温升值。可见, 适度提高初始温度和温升值, 以及降低切片厚度, 都能够提高胡萝卜的有效水分扩散系数。

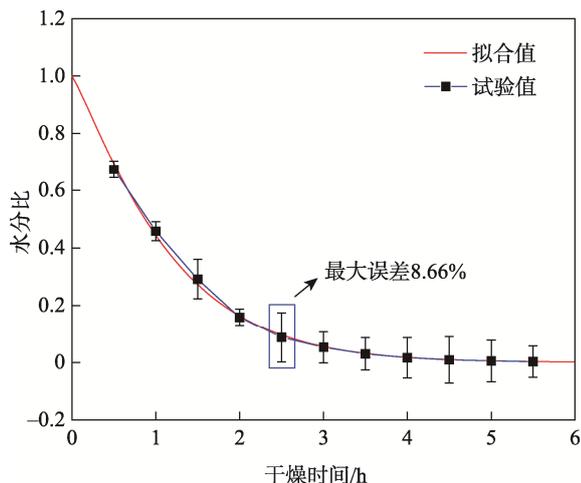


图5 试验值与拟合值的对比
Fig.5 Comparison of test and fitted values

表7 胡萝卜在不同的热泵干燥条件下的水分有效扩散系数
Tab.7 Effective moisture diffusivity of carrots under different heat pump drying conditions

干燥条件			有效水分扩散系数/($10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	温升值/ $^{\circ}\text{C}$	切片厚度/mm	
50			4.854 7
55	10	4	5.177
60			5.652
		5	5.079 8
55	10	4	5.177
		15	5.469 6
		3	7.155 5
55	10	4	5.177
		5	3.040 1

2.6 活化能

活化能指物料干燥时除去单位物质的量的水分所需要的能量,活化能越高,说明物料干燥难度越大。结合有效水分扩散系数 D_{eff} 和初始温度 θ , 根据 Arrhenius 方程, 可知 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/(\theta+273.15)$ 呈线性关系, 且斜率为 $-\frac{E_0}{R}$ 。

由图 6 可知, 在切片厚度为 4 mm、温升值为 10 $^{\circ}\text{C}$ 时, 胡萝卜片有效水分扩散系数的对数与初始温度的倒数对应的斜率为 -1 608.67, 代入式 (10) 计算可得干燥活化能为 13.374 kJ/mol, 说明在切片厚度为 4 mm、温升值为 10 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥条件下, 从胡萝卜中去除 1 mol 的水分需要消耗的能量为 13.374 kJ/mol。

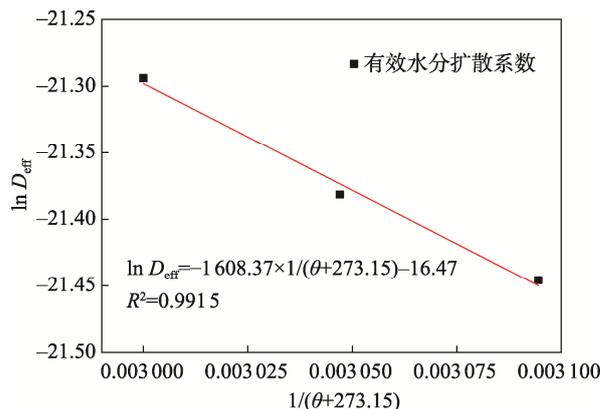


图6 不同干燥温度下胡萝卜的干燥活化能
Fig.6 Drying activation energy of carrots at different drying temperature

3 结论

对胡萝卜热泵干燥的特性和水分迁移规律进行了探究, 自变量包括初始温度、温升值和切片厚度, 结论如下。

1) 干燥速率的变化与初始温度、温升值呈正相关, 与切片厚度呈负相关。随着干燥的进行, 干燥速率呈下降趋势。其中, 干燥速率受到切片厚度的影响最大, 而温升值对其影响最小。

2) 对比分析 4 种常用的薄层干燥模型, Page 模型的拟合效果最好。基于文中实验条件得出在不同干燥条件下水分比随时间的变化规律模型, 模型验证结果表明, 模型所得拟合值相对于试验值的平均误差为 5.76%, 拟合效果较好。

3) 在文中的实验范围内, 有效水分扩散系数的区间为 $3.040 1 \times 10^{-10} \sim 7.155 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 随着初始温度、温升值的增加, 以及切片厚度的减小, 有效水分扩散系数增大, 其中厚度对其影响最显著。胡萝卜干燥活化能为 13.374 kJ/mol。

基于干燥物料的干燥特性科学地控制热泵干燥工艺参数, 可以获得更高质量的干燥产品, 并提高干燥速率。此外, 这些研究结果也可为胡萝卜干燥的能耗分析和品质改进提供理论参考。由于现有文献还未对不同干燥工艺对胡萝卜收缩活化能的影响进行系统研究, 因此应继续深入研究, 以确定胡萝卜的最佳干燥方式。

参考文献:

[1] DE SOUZA A U, CORRÊA J L G, TANIKAWA D H, et al. Hybrid Microwave-Hot Air Drying of the Osmotically Treated Carrots[J]. LWT, 2022, 156: 113046.
[2] DONG R H, LIU S, XIE J H, et al. The Recovery, Catabolism and Potential Bioactivity of Polyphenols from

- Carrot Subjected to *in Vitro* Simulated Digestion and Colonic Fermentation[J]. *Food Research International*, 2021, 143: 110263.
- [3] 董文丽, 巩雪, 侯理达, 等. 壳聚糖/柠檬酸复合涂膜对胡萝卜的保鲜效果[J]. *包装工程*, 2021, 42(9): 72-78.
DONG W L, GONG X, HOU L D, et al. Effects of Chitosan and Citric Acid Composite Film on Preservation of Carrot[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(9): 72-78.
- [4] 马国军, 刘英, 李武强, 等. 基于响应面法优化胡萝卜切片远红外干燥工艺[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(12): 106-112.
MA G J, LIU Y, LI W Q, et al. Optimization of Carrot Slice Deep Infrared Drying Process Based on Response Surface Methodology[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(12): 106-112.
- [5] 金建龙, 苑亚, 章学来, 等. 新型热泵干燥系统的金丝皇菊干燥实验[J]. *包装工程*, 2021, 42(21): 11-18.
JIN J L, YUAN Y, ZHANG X L, et al. Experiment of Drying Imperial Chrysanthemum in Novel Heat Pump Dryer[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(21): 11-18.
- [6] HOU H N, CHEN Q Q, BI J F, et al. Understanding Appearance Quality Improvement of Jujube Slices during Heat Pump Drying via Water State and Glass Transition[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 272: 109874.
- [7] 扈梦尧. 菌类对流干燥过程的实验及模拟研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2021: 3-5.
HU M Y. Experimental and Simulation Study on the Drying Process of Fungus during Convection Drying Process[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2021: 3-5.
- [8] CHAHBANI A, FAKHFAKH N, BALTI M A, et al. Microwave Drying Effects on Drying Kinetics, Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Green Peas (*Pisum Sativum* L)[J]. *Food Bioscience*, 2018, 25: 32-38.
- [9] TUNCKAL C, DOYMAZ İ. Performance Analysis and Mathematical Modelling of Banana Slices in a Heat Pump Drying System[J]. *Renewable Energy*, 2020, 150: 918-923.
- [10] PETER M, LIU Z W, FANG Y L, et al. Computational Intelligence and Mathematical Modelling in Chanterelle Mushrooms' Drying Process under Heat Pump Dryer[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 212: 143-159.
- [11] 巨浩羽, 赵海燕, 张卫鹏, 等. 相对湿度对胡萝卜热风干燥过程中热质传递特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 295-302.
- JU H Y, ZHAO H Y, ZHANG W P, et al. Effects of Relative Humidity on Heat and Mass Transfer Characteristics of Carrot during Hot Air Drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(5): 295-302.
- [12] CUI Z W, XU S Y, SUN D W. Microwave-Vacuum Drying Kinetics of Carrot Slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 65(2): 157-164.
- [13] 种翠娟, 朱文学, 刘云宏, 等. 胡萝卜薄层干燥动力学模型研究[J]. *食品科学*, 2014, 35(9): 24-29.
CHONG C J, ZHU W X, LIU Y H, et al. Dynamic Modeling of Thin Layer Drying of Carrots[J]. *Food Science*, 2014, 35(9): 24-29.
- [14] 聂波, 张国治, 王安建, 等. 胡萝卜热风干燥特性及其品质的研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(4): 80-84.
NIE B, ZHANG G Z, WANG A J, et al. Study on the hot-Air Drying Characteristics and Quality of Carrot[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 36(4): 80-84.
- [15] SALEH R M, KULIG B, EMILIOZZI A, et al. Impact of Critical Control-Point Based Intermittent Drying on Drying Kinetics and Quality of Carrot (*Daucus Carota* Var. *laguna*)[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, 20: 100682.
- [16] 范浩, 马培勇, 邢献军, 等. 胡萝卜真空干燥特性及动力学[J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(1): 20-26.
FAN H, MA P Y, XING X J, et al. Vacuum Drying Characteristics and Kinetics of Carrot Slices[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(1): 20-26.
- [17] 陈衍男, 王晓, 穆岩, 等. 天麻蒸制后红外干燥特性及失水动力学研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(22): 30-34.
CHEN Y N, WANG X, MU Y, et al. Drying Characteristics and Kinetics Research of Gastrodia Elata Blume under Infrared Blast Drying after Steaming[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(22): 30-34.
- [18] ELMIZADEH A, SHAHEDI M, HAMDAMI N. Comparison of Electrohydrodynamic and Hot-Air Drying of the Quince Slices[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 43: 130-135.
- [19] OJEDIRAN J O, OKONKWO C E, ADEYI A J, et al. Drying Characteristics of Yam Slices (*Dioscorea Rotundata*) in a Convective Hot Air Dryer: Application of ANFIS in the Prediction of Drying Kinetics[J]. *Heliyon*,

- 2020, 6(3): e03555.
- [20] 王怡, 董继先, 王栋, 等. 微波烫漂预处理下百合热风干燥特性及动力学模拟[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 186-190.
WANG Y, DONG J X, WANG D, et al. Drying Characteristics and Dynamic Simulation of Lily under Microwave Blanching Pretreatment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 186-190.
- [21] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. The Effectiveness of Combined Infrared and Hot-Air Drying Strategies for Sweet Potato[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 241: 75-87.
- [22] 刘瑜, 李保国. 韭菜花酱热泵干燥特性及干燥数学模型研究[J]. 包装工程, 2022, 43(5): 100-107.
LIU Y, LI B G. Heat Pump Drying Characteristics and Drying Mathematical Model of Chive Flower Sauce[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 100-107.
- [23] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预冻对苹果片真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 241-250.
MA Y C, BI J F, YI J Y, et al. Effects of Pre-Freezing on the Drying Characteristics and Quality Parameters of Freeze Drying Apple Slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 241-250.
- [24] 唐小闲, 刘艳, 咸兆坤, 等. 小黄姜真空微波干燥特性及其动力学研究[J]. 食品科技, 2021, 46(10): 87-94.
TANG X X, LIU Y, XIAN Z K, et al. Study on Vacuum Microwave Drying Characteristics and Kinetic Model of Small Yellow Ginger[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(10): 87-94.
- [25] 王航. 香蕉片高压电场-热泵联合干燥特性研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2021: 46-47.
WANG H. Study on Drying Characteristics of Banana Slices Combined with High Voltage Electric Field and Heat Pump[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2021: 46-47.
- [26] PU Y Y, SUN D W. 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.
- [27] 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 W P, GAO Z J, XIAO H W, et al. Drying Characteristics of Poria Cocos with Different Drying Methods Based on Weibull Distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 317-324.