

青花椒热泵干燥特性及工艺参数优化

王子轩, 蒲应俊, 杨明金, 谭 均, 杨 玲, 宋卫东

Drying Characteristics and Process Optimization by Heat Pump Drying of Green Sichuan Pepper

WANG Zixuan, PU Yingjun, YANG Mingjin, TAN Jun, YANG Ling, and SONG Weidong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050288>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度模式对鲮鱼热泵干燥品质及动力学特性的影响

Effect of Temperature Mode on Quality and Kinetic Characteristics of *Scomberomorus niphonius* of Heat Pump Drying

食品工业科技. 2019, 40(4): 86-92,99 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.04.014>

核桃热泵穿流干燥特性

Characteristics of Walnut by Heat Pump Through Drying

食品工业科技. 2019, 40(21): 216-218,306 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.21.035>

远红外辅助热泵干燥食用玫瑰花瓣及产品品质分析

Far-infrared Assisted Heat Pump Drying of Edible Roses Petals and the Product Quality Analysis

食品工业科技. 2021, 42(22): 246-253 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020038>

山药催化式红外干燥特性及色泽评价

Drying characteristic and product color evaluation of yam by catalytic infrared drying

食品工业科技. 2017(07): 221-225 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.07.035>

充氮气热泵干燥对秋刀鱼干燥特性和品质的影响

Effects of Nitrogen Modified Heat Pump Drying on Drying Characteristics and Quality of Sauri

食品工业科技. 2021, 42(4): 12-17,25 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020040290>

基于Weibull分布函数的双孢菇热泵干燥特性研究

Heat Pump Drying Characteristics of *Agaricus bisporus* Based on Weibull Distribution Function

食品工业科技. 2019, 40(2): 63-69 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.02.012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王子轩, 蒲应俊, 杨明金, 等. 青花椒热泵干燥特性及工艺参数优化 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 261–270. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050288

WANG Zixuan, PU Yingjun, YANG Mingjin, et al. Drying Characteristics and Process Optimization by Heat Pump Drying of Green Sichuan Pepper[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 261–270. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050288

· 工艺技术 ·

青花椒热泵干燥特性及工艺参数优化

王子轩¹, 蒲应俊¹, 杨明金^{1,*}, 谭 均¹, 杨 玲¹, 宋卫东²

(1. 西南大学工程技术学院丘陵山区农业装备重庆市重点实验室, 重庆 400715;

2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 为了探究青花椒热泵干燥特性并优化干燥工艺参数以提高干制花椒品质, 本文以温度、风速和铺放厚度为试验因子, 以有效水分扩散系数、光合色素单位质量含量和色差为评价指标, 对青花椒热泵干燥过程进行单因素试验和正交试验, 并采用 6 种常用干燥数学模型分别对正交试验数据进行非线性拟合。结果表明, Page 模型对试验数据的拟合度最好, 是描述青花椒热泵干燥的最佳模型; 在恒温干燥条件下, 温度对有效水分扩散系数和色差的影响极显著 ($P < 0.01$), 温度越高, 有效水分扩散系数和色差变化越大; 风速对色差的影响显著 ($P < 0.05$), 风速越大, 色差变化越大; 铺放厚度对色差的影响极显著 ($P < 0.01$), 铺放厚度越大, 色差变化越小; 而光合色素单位质量含量在不同温度条件下均具有先略下降再上升后又迅速下降至稳定的趋势, 温度越高, 光合色素单位质量含量变化越快, 不利于干制青花椒品质的提高。综合考虑温度、风速、铺放厚度对青花椒色差、光合色素单位质量含量和有效水分扩散系数的影响, 确定最优干燥工艺参数为温度 40 °C、风速 0.3 m/s、铺放厚度 11.9 mm, 在此条件下, 干制青花椒色泽品质最佳, 色差为 20.01, 光合色素单位质量含量为 2.9601×10^{-4} mg/g。研究结果可为青花椒热泵干燥工艺应用提供参考。

关键词: 青花椒, 干燥特性, 光合色素, 色泽, 热泵干燥, 工艺优化, 正交试验

中图分类号: S226.6

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)04-0261-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050288



本文网刊:

Drying Characteristics and Process Optimization by Heat Pump Drying of Green Sichuan Pepper

WANG Zixuan¹, PU Yingjun¹, YANG Mingjin^{1,*}, TAN Jun¹, YANG Ling¹, SONG Weidong²

(1. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Regions, College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to investigate the drying characteristics of green Sichuan pepper by heat pump and optimize the drying process parameters to improve the quality of dried green Sichuan pepper, the single-factor experiments and orthogonal tests on the drying process of green Sichuan pepper were conducted in this study. Temperature, air speed and laying thickness were defined as test factors, and effective moisture diffusion coefficient, photosynthetic pigment unit mass content and color difference were determined as evaluation indexes. Six commonly used drying mathematical models were used to fit the orthogonal test data nonlinearly, respectively. The results showed that the Page model had the best fit to the test data and it was the best model to describe the drying of green Sichuan pepper by heat pump. Under the constant temperature drying condition, the effect of temperature on the effective moisture diffusion coefficient and color difference was highly significant ($P < 0.01$). The higher the temperature, the greater the change of effective moisture diffusion coefficient and color difference. The effect of air speed on color difference was significant ($P < 0.05$). The higher the air speed, the greater the change of color difference. The effect of laying thickness on color difference was highly significant ($P < 0.01$). The higher

收稿日期: 2022-05-25

基金项目: 重庆市教育委员会项目 (kjc2020002); 农业农村部现代农业装备重点实验室开放基金课题 (ht20200705)。

作者简介: 王子轩 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 空气源热泵干燥技术, E-mail: 1786760041@qq.com。

* 通信作者: 杨明金 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农业系统工程, E-mail: ymingjin@swu.edu.cn。

the laying thickness, the greater the color difference. However, under different temperatures the unit mass content of photosynthetic pigment slightly decreased, and then increased, and then rapidly decreased until it reached stability. The higher the temperature, the faster the change of the unit mass content of photosynthetic pigment, which was not beneficial to the quality improvement of dried green Sichuan pepper. By comprehensively the effects of temperature, air speed and laying thickness on the color difference, unit mass content of photosynthetic pigment and effective moisture diffusion coefficient, the optimal parameters of drying process were determined as temperature of 40 °C, air speed of 0.3 m/s and laying thickness of 11.9 mm. Under these conditions, the best color quality of dried green Sichuan pepper was achieved, with a color difference of 20.01 and a photosynthetic pigment unit mass content of 2.9601×10^{-4} mg/g. The results of the study could provide reference for the application of heat pump drying process of green Sichuan pepper.

Key words: green Sichuan pepper; drying characteristics; photosynthetic pigments; color; heat pump drying; process optimization; orthogonal experiment

青花椒(*Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc)是芸香科花椒属的一种,因果实成熟后为青绿色而得名。青花椒是调味品的重要原料,色香味俱佳,经济价值高^[1]。青花椒在四川、重庆、云南、贵州等省市广泛种植,青花椒干燥设备具有很大的市场需求^[2]。干燥是花椒采后加工中的重要环节,良好的干燥技术和最佳的干燥工艺可以有效提升花椒品质^[3]。花椒干燥方法主要包括热风、微波、真空、热泵、远红外等^[4-5],其中基于热风的堆积式干燥应用最广,热源常为热风炉和热泵。热泵干燥具有节能、高效、可控等优点,因此在青花椒干燥中得到应用。

色泽是青花椒品质最主要的评价指标,干燥过程中果皮由于光合色素降解而导致色泽变化。果皮光合色素主要包括叶绿素和类胡萝卜素,其中叶绿素使青花椒果皮呈现青绿色。青花椒常在干燥过程中的褐变主要是由叶绿素降解导致。相应地,干燥工艺及工艺参数对青花椒叶绿素降解方面的研究得到较多关注。叶绿素降解方式主要为叶绿素酶降解和叶绿素光降解。汪洋等^[6]研究了干燥过程中光对青花椒叶绿素降解的影响及光降解原因,结果表明紫外光对叶绿素光降解影响最大。为了降低光对叶绿素酶降解的影响,一般干燥过程均处于避光环境中进行。叶绿素酶降解受温度、酶浓度和时间的的影响较明显。温度越高,酶活性越强;酶浓度越高,酶降解强度越大;干燥时间越长,酶降解越充分。因而,叶绿素酶降解成为青花椒色泽变化的最主要因素^[7]。通过对干燥工艺及参数优化,可以调控温度、浓度和时间三者对叶绿素酶降解的进程和影响,以提高干制青花椒品质^[8-10]。杨英鹏等^[11]通过试验研究表明水分含量变化的快慢也会影响叶绿素的降解速率。类胡萝卜素主要有物理降解、化学降解和生物降解等方式^[12-13],但类胡萝卜素降解对青花椒色泽影响有限。

青花椒色泽品质极大地影响椒农收益,因此本文针对青花椒干燥过程中干燥工艺参数对果皮色泽的影响,即果皮光合色素降解影响色泽的问题,采用热泵干燥机对新鲜青花椒进行干燥处理,以温度、风速和铺放厚度为试验因子,研究青花椒热泵干燥特性并建立数学模型,对青花椒光合色素降解和色泽进行分析;通过单因素实验确定因子水平,并进行正交试

验和数据分析,探究干燥工艺参数对青花椒果皮光合色素和色泽的影响,为青花椒热泵干燥工艺参数优化和品质提升提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜青花椒(九叶青) 2021年7月购于重庆市江津区某椒园,4~8 °C 冷藏备用;丙酮 分析纯,重庆川东化工(集团)有限公司;95%乙醇 重庆市普康消毒用品有限公司;30 目标准筛网(GB/T 6003.1-2012,以下简称“筛网”) 绍兴市上虞区豪泉筛具厂。

1HGKB-4 热泵干燥机(图1) 自制;BSA2245-CW 赛多利斯电子天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;SUMMIT-565 热线式风速仪 韩国SUMMIT 有限公司;NR60C 色差仪 深圳市三恩时科技有限公司;FBS-760A 卤素水分测定仪 厦门市弗布斯检测设备有限公司;721G INESA 可见分光光度计 上海仪电科学仪器股份有限公司;S-J220 D&T 电子分析天平 天津市德安特传感技术有限公司,用于光合色素测定时的果皮样品称量。

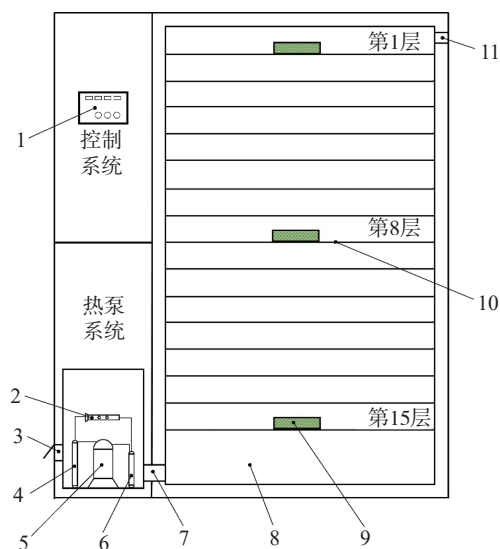


图1 热泵干燥机示意图

Fig.1 Schematic diagram of heat pump dryer

注:1.控制面板;2.膨胀阀;3.新风进口;4.蒸发器;5.压缩机;6.冷凝器;7.进风口;8.干燥室;9.样品;10.筛网架;11.出风口。

1.2 实验方法

1.2.1 单因素实验 单因素实验作为预试验, 得到青花椒热泵干燥特性, 分析温度、风速、铺放厚度对干燥速率及色差的影响, 确定正交试验因子水平。热泵干燥机由热泵系统、干燥室和控制系统等组成, 如图 1 所示。干燥室内置 15 层筛网架, 根据风速仪测得第 1、8、15 层的风速分别为 0.3、0.5、0.7 m/s。根据筛网高度确定铺放厚度水平, 分别为 6.2、11.9、17.6 mm(对应青花椒质量 50、100、150 g)。各单因素实验工艺参数见表 1。试验时, 热泵干燥机设置为恒温模式, 每隔 0.5 h 对样品称取质量、测色差。青花椒湿基含水率降至 10% 以下且质量稳定时停止干燥^[14], 每组试验重复 3 次。

表 1 单因素实验方案
Table 1 Scheme of single factor test

工艺参数	温度(℃)	风速(m·s ⁻¹)	铺放厚度(mm)
温度	35	0.7	11.9
	40		
	45		
	50		
	55		
	60		
风速	40	0.3	11.9
		0.5	
		0.7	
铺放厚度	40	0.7	6.2
			11.9
			17.6

1.2.2 正交试验 以温度、风速和铺放厚度为试验因子, 以有效水分扩散系数、光合色素单位质量含量、色差为评价指标进行正交试验, 选择正交表 L₉(3⁴)^[15], 根据单因素实验确定因子水平, 因子与水平见表 2。

表 2 正交试验因子与水平设计
Table 2 Design of orthogonal experimental factors and levels

水平	因子		
	A温度(℃)	B风速(m·s ⁻¹)	C铺放厚度(mm)
1	40	0.3	6.2
2	50	0.5	11.9
3	60	0.7	17.6

1.2.3 指标测定及计算

1.2.3.1 干燥指标测定与计算 使用卤素水分测定仪测量青花椒初始含水率, 3 次重复。干燥过程中青花椒的含水率按照国家标准 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行测量, 湿基含水率 W 和干基含水率 M 分别按公式(1)、(2)计算:

$$W = \frac{m_t - m_0}{m_t} \times 100$$
 式 (1)

$$M = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$
 式 (2)

式中: W 为湿基含水率, %; M 为干基含水率, g/g;

m_t 为干燥过程中 t 时刻青花椒质量, g; m₀ 为青花椒干物质质量, g。

干燥速率 DR 按公式(3)计算:

$$DR = \frac{M_1 - M_2}{t_2 - t_1} \times 100$$
 式 (3)

式中: DR 为干燥速率, g/(g·h); M₁、M₂ 分别为干燥过程中 t₁、t₂ 时刻青花椒干基含水率, g/g。

水分比 MR 按公式(4)计算:

$$MR = \frac{M_1 - M_e}{M_0 - M_e}$$
 式 (4)

式中: M_e 为青花椒平衡干基含水率, g/g; M₀ 为青花椒初始干基含水率, g/g。

有效水分扩散系数(Effective Moisture Diffusivity, EMD)按公式(5)计算:

$$\ln MR = \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \right) - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4r^2}$$
 式 (5)

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数, m²/s; r 为花椒颗粒平均半径, m; r=0.002 m; t 为干燥时间, s。

活化能按公式(6)计算^[14]:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT_a} \right)$$
 式 (6)

式中: D₀ 为扩散前置因子, m²/s; E_a 为活化能, J/mol; R 为摩尔气体常数, 8.314 J/(mol·K); T_a 为干燥温度, K。

1.2.3.2 光合色素测定与计算 选取温度分别为 40、50、60 ℃, 按干燥速率最快时的风速和铺放厚度条件, 即风速 0.7 m/s, 铺放厚度 6.2 mm, 进一步研究青花椒光合色素随温度的变化。采用有机溶剂直接浸提法提取光合色素^[16]。使用分析纯丙酮混合纯净水制备 80% 丙酮溶液, 按体积比 1:1 将 80% 丙酮溶液与 95% 乙醇溶液混合制备光合色素提取液(以下简称“提取液”)^[17]。取干燥过程中不同时刻青花椒果皮 0.1~0.2 g 放入离心管中, 取 10 mL 提取液加入其中, 浸泡果皮, 在黑暗环境下静置 72 h, 至果皮色泽变淡。取 2 mL 提取液倒入 1 号比色皿, 长时间静置后在离心管内液体充分摇匀后, 取 2 mL 倒入 2 号比色皿, 将两支比色皿分别放入分光光度计槽中, 分别在 470、645、663 nm 波长下测量光吸收值^[18-20], 结合 Arnon 公式确定类胡萝卜素、叶绿素 a、叶绿素 b 的含量。叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量分别按公式(7)、(8)计算^[21-22]:

$$C_a = 12.71 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645}$$
 式 (7)

$$C_b = 22.88 \times A_{645} - 4.67 \times A_{663}$$
 式 (8)

式中: C_a、C_b 分别为叶绿素 a 和叶绿素 b 含量, mg/L; A₆₆₃、A₆₄₅ 分别为浸泡过青花椒果皮的提取液在 663、645 nm 下的光吸收值。

类胡萝卜素按公式(9)计算:

$$C_{\text{ar}} = \frac{1000 \times A_{470} - 3.27 \times C_a - 104 \times C_b}{229}$$
 式 (9)

式中: C_{ar} 为类胡萝卜素含量, mg/L; A_{470} 为浸泡过青椒果皮的提取液在波长 470 nm 下的光吸收值。

光合色素总量按公式(10)计算:

$$C_T = C_a + C_b + C_{ar} \quad \text{式 (10)}$$

式中: C_T 为光合色素总量, mg/L。

光合色素单位质量含量按公式(11)计算:

$$C = \frac{C_T \times V_T}{F_w \times 1000} \times n \quad \text{式 (11)}$$

式中: C 为光合色素单位质量含量, mg/g; V_T 为提取液体积, L, $V_T=0.01$ L; F_w 为提取果皮质量, mg; n 为稀释倍数, $n=1$ 。

1.2.3.3 色差测定与计算 用标准白色板和黑板校正色差仪, 取外观品质好的新鲜青椒, 用色差仪测量总色差 ΔE , 作为后续试验色差标样。设置色差仪为平均测量模式, 每隔 0.5 h 随机取样测量青椒果皮色差。色差 ΔE 采用国际 CIE *Lab* 色度空间表示, 按公式(12)[23] 计算:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{式 (12)}$$

式中: L^* 为明亮度, 变化范围为 0~100, 0 为绝对黑色, 100 为绝对白色; a^* 为红绿值, 变化范围为 -100~+100, 负值为偏绿, 正值为偏红; b^* 为黄蓝值, 变化范围为 -100~+100, 负值为偏蓝, 正值为偏黄。

1.2.3.4 干燥数学模型及评价指标 表 3 为 6 种常用于干燥数学模型, 分别对正交试验的 9 组试验数据进行非线性拟合。选用决定系数 R^2 、卡方 χ^2 、均方根误差 RMSE 评价模型拟合的优劣。 R^2 越接近 1, χ^2 越小, 模型与试验数据拟合效果越好。均方根误差 RMSE 表明模型预测值和试验数据的平均偏差程度, 越小两者越接近。评价指标分别按公式(13)~(15)计算:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{exp,i}} - MR_{pre,i})^2} \quad \text{式 (13)}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad \text{式 (14)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N}} \quad \text{式 (15)}$$

式中: $MR_{exp,i}$ 为第 i 个数据点测量水分比; $MR_{pre,i}$ 为第 i 个数据点模型预测水分比; $\overline{MR_{exp,i}}$ 为测量水分比平均值; N 为数据点个数; n 为模型中参数个数。

1.3 数据处理

使用软件 Design-Expert 12 设计正交试验方案并分析试验结果, 使用软件 Excel 2016 处理数据, 使用软件 Origin 2019b 绘制试验数据变化曲线, 使用 SPSS Statistics 26 拟合干燥数学模型。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 温度 图 2 表示温度对青椒干燥速率、水分比及色差的影响。由图 2a 可知, 干燥温度越高, 干燥速率越大; 由图 2b 可知, 在干燥初始阶段水分比下降较快, 随着时间延长, 水分比下降趋于平缓。当温度分别为 35、40、45、50、55、60 °C 时, 湿基含水率降至 10% 的时间分别为 15.0、11.5、10.0、8.5、8.0、7.0 h, 即温度越高青椒完成干燥所需时间越短, 干燥速率越快; 由图 2c 可知, 青椒果皮色差在干燥初期变化较大, 温度越高青椒果皮色泽变化越快。

青椒热泵干燥有效水分扩散系数及其平均活化能通过拟合得出结果, 见表 4。由表 4 可知, 随着温度升高, 有效水分扩散系数增大, 青椒内部水分子扩散速度提高, 脱水能力增强, 干燥速率相应增大, 与图 2 分析结果一致。干燥时的平均活化能为 32153.8 J/mol, 表示在给定热泵干燥条件下, 蒸发 1 mol 水所需能量为 32153.8 J。综合有效水分扩散系数, 选择 40~60 °C 进行正交试验。

2.1.2 风速 图 3 表示风速对青椒干燥速率、水分比及色差的影响。由图 3 可知, 青椒在干燥初期, 干基含水率较高, 风速越高干燥速率越快, 水分比下降越快, 色泽变化也越大。在温度 40 °C、铺放厚度 11.9 mm 的条件下, 风速 0.7 m/s 时干燥开始时干燥速率可达 0.4 g/(g·h) 以上。在干燥前期, 干燥速率较快, 水分比下降较快, 随着时间延长, 干燥速率降低, 水分比下降趋于平缓, 与图 2 所示规律一致。这是由于干燥后期青椒内存在部分结合水不易流失,

表 3 干燥数学模型

Table 3 Drying mathematical models

模型序号	模型名称	方程	参考文献
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	[24]
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[25]
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[25]
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[25]
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[25]
6	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	[24]

注: k 、 n 、 a 、 b 、 c 均为数学模型参数。

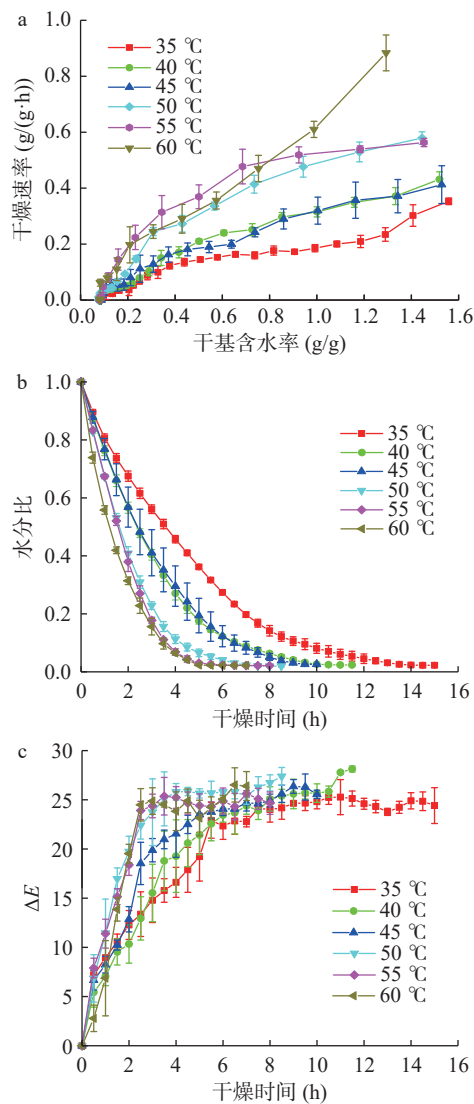


图 2 温度对青花椒干燥速率、水分比及色差的影响

Fig.2 Effects of temperature on drying rate, moisture ratio and color change of green Sichuan pepper

注: a. 对干燥速率的影响; b. 对水分比的影响; c. 对色差的影响; 图 3~图 4 同。

表 4 不同温度时的有效水分扩散系数及平均活化能

Table 4 D_{eff} and average activation energy of green Sichuan pepper at different temperatures

温度(℃)	有效水分扩散系数 ($10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	相关系数	活化能($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)	相关系数
35	4.4222	0.9931	32153.8	0.9828
40	5.7654	0.9951		
45	6.3414	0.9919		
50	8.3972	0.9858		
55	10.3484	0.9669		
60	11.3942	0.9842		

且自由水减少后使水分梯度减小,从而表现为降速^[26],例如风速 0.3 m/s 时,干燥开始后干燥速率为 0.2953 g/(g·h),之后逐渐降低至接近 0。

由于热风干燥中活化能仅与温度相关,故研究不同风速下的有效水分扩散系数及其平均活化能时应改变温度,通过拟合得出结果,结果见表 5。由

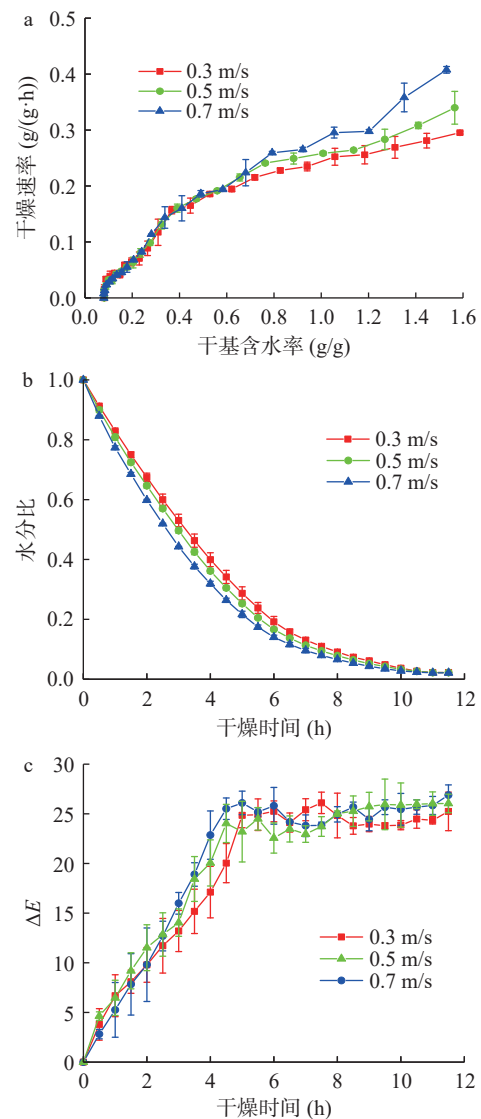


图 3 风速对青花椒干燥速率、水分比及色差的影响

Fig.3 Effects of air speed on drying rate, moisture ratio and color change of green Sichuan pepper

表 5 可知,随着风速与温度的升高,有效水分扩散系数增大,平均活化能为 24137.57 J/mol。

表 5 不同风速时的有效水分扩散系数及平均活化能

Table 5 D_{eff} and average activation energy of green Sichuan pepper at different air speed

风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	温度 (℃)	有效水分扩散系数 ($10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	相关系数	活化能 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)	相关系数
0.3	40	5.6832	0.9836	24137.57	0.9979
0.5	50	7.7763	0.9946		
0.7	60	10.1570	0.9822		

2.1.3 铺放厚度 图 4 表示铺放厚度对青花椒干燥速率、水分比及色差的影响。由图 4 可知,青花椒在筛网内的铺放厚度越小,干燥速率越快,水分比变化越快,色泽变化越大。当干燥时间达 6 h 时,总色差 ΔE 趋于平稳,即不同铺放厚度条件下的青花椒色泽变化保持稳定。干燥后期,青花椒果皮皱缩,导致内部通道堵塞,酶促反应减少,因此色差趋于平稳。

研究不同铺放厚度下的有效水分扩散系数及其

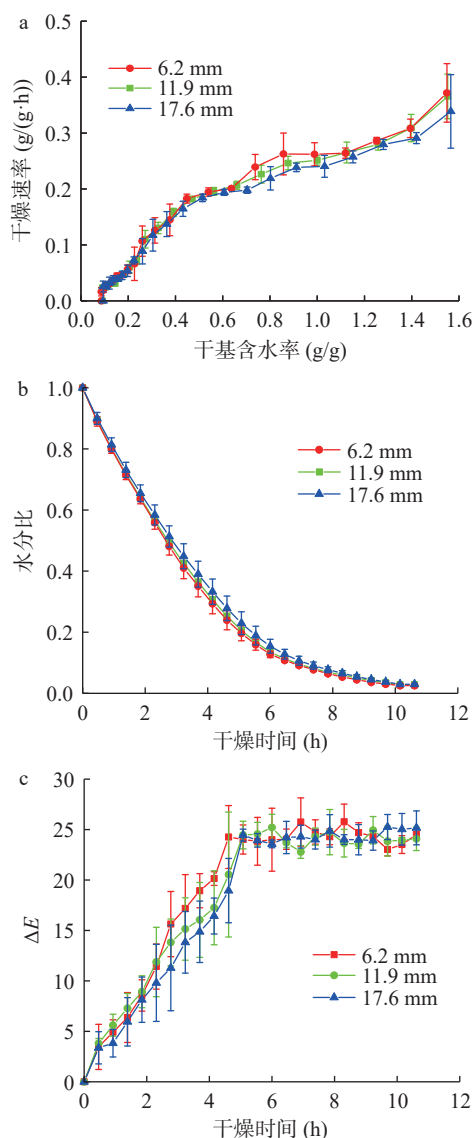


图4 铺放厚度对青花椒干燥速率、水分比及色差的影响
Fig.4 Effects of laying thickness on drying rate, moisture ratio and color change of green pricklyashes

平均活化能通过拟合得出结果,结果见表6。由表6可知,随着铺放厚度与温度的升高,有效水分扩散系数增大,平均活化能为25070.33 J/mol。

表6 不同铺放厚度时的有效水分扩散系数及平均活化能
Table 6 D_{eff} and average activation energy of green Sichuan pepper at different laying thickness

铺放厚度 (mm)	温度 (℃)	有效水分扩散系数 ($10^{-7} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	相关系数	活化能 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)	相关系数
6.2	40	5.5397	0.9932	25070.33	0.9893
11.9	50	7.9069	0.9956		
17.6	60	10.1252	0.9693		

2.2 数学模型

2.2.1 模型选择 拟合结果见表7,对比6种干燥数学模型的卡方 χ^2 、决定系数 R^2 、均方根误差RMSE可知,模型2~模型6的决定系数平均值达到0.99及以上,其中Page模型和Modified Page模型对试验数据的拟合度最好,此两种模型 R^2 最大,同时 χ^2 和RMSE最小,模型评价指标的平均值均为 $R^2=0.99896$,

$\chi^2=0.00011$, RMSE=0.00907。从简化和实用角度考虑,选择Page模型进行模型验证和数据分析。

2.2.2 模型验证 正交试验各试验号的干燥数学模型表达式见表8。通过数学模型表达式可计算出试验各条件下干燥至安全含水率(10%w.b.)即水分比约为6%时所需的干燥时间。试验值由表2试验号3的试验条件(温度40℃、风速0.7 m/s、铺放厚度17.6 mm)试验得到,预测值由表8试验号3表达式计算,预测值与试验值对比如图5。Page模型预测值与试验值之间的平均相对误差为8.34%,拟合度较高。

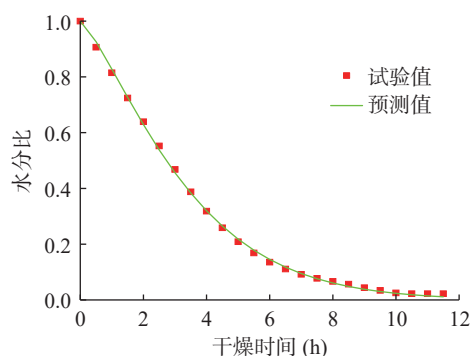


图5 Page模型预测值与试验值对比
Fig.5 Comparison values of predictive and experimental based on Page model

2.3 正交试验

2.3.1 有效水分扩散系数和活化能 正交试验结果、不同干燥条件下的有效水分扩散系数及平均活化能见表9。平均活化能根据公式(6)拟合得到,拟合时有效水分扩散系数为40、50、60℃时的平均值。其中,第8组有效水分扩散系数最大,与表6中干燥时间最短的组号一致。不同温度条件下 D_{eff} 的范围分别为 $6.0362 \times 10^{-7} \sim 6.1747 \times 10^{-7}$ 、 $7.5437 \times 10^{-7} \sim 8.0574 \times 10^{-7}$ 、 $10.6057 \times 10^{-7} \sim 10.8882 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, D_{eff} 随温度升高而升高,与温度单因素实验结论相符。与表5、表6对比,活化能相对误差分别为3.93%、7.94%,可知风速与铺放厚度对 D_{eff} 影响较小。

2.3.2 数据分析 通过色差仪测量青花椒果皮色泽变化,发现青花椒干燥初始阶段色泽变化基本呈现偏黑少绿少黄,在一定干燥时间后,青花椒果皮出现偏红,第1~9组开始出现偏红现象的干燥时间分别为2.0、3.0、2.0、1.0、1.5、0.5、0.5、0.5 h。然后以湿基含水率降至10%以下时的色差、光合色素单位质量含量值及有效水分扩散系数作为响应指标,分别进行极差分析和方差分析,结果分别见表10和表11。

由表10和表11可知,有99%的概率可认为,在显著性水平 $\alpha=0.01$ 的条件下,温度和铺放厚度对青花椒果皮色差影响极显著;有95%的概率可认为,在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件下,风速对青花椒果皮色差影响显著。较优的干燥工艺参数为温度40℃、风速0.3 m/s、铺放厚度11.9 mm。

表 7 青花椒热泵干燥数学模型拟合结果
Table 7 Mathematical model fitting results of heat pump drying of green Sichuan pepper

模型	参数及指标	试验参数值及指标值拟合结果									平均值
		试验号1	试验号2	试验号3	试验号4	试验号5	试验号6	试验号7	试验号8	试验号9	
1	k	0.28212	0.27726	0.2872	0.38352	0.38906	0.40898	0.54678	0.54979	0.52568	/
	R^2	0.97772	0.97900	0.98188	0.99147	0.99325	0.99082	0.99292	0.98800	0.99141	0.98739
	χ^2	0.00225	0.00211	0.00179	0.00083	0.00065	0.00090	0.00072	0.00127	0.00088	0.00127
	RMSE	0.04747	0.04588	0.04236	0.02886	0.02543	0.03002	0.02688	0.03567	0.02959	0.03468
	k	0.17451	0.17435	0.18866	0.30937	0.32379	0.33044	0.47302	0.45364	0.45191	/
2	n	1.33349	1.32084	1.29755	1.19091	1.16481	1.19946	1.18186	1.23935	1.17860	/
	R^2	0.99863	0.99886	0.99921	0.99974	0.99959	0.99924	0.99938	0.99828	0.99774	0.99896
	χ^2	0.00014	0.00011	0.00008	0.00003	0.00004	0.00008	0.00006	0.00018	0.00023	0.00011
	RMSE	0.01175	0.01069	0.00886	0.00501	0.00004	0.00868	0.00792	0.01348	0.01517	0.00907
	k	0.27003	0.26649	0.27655	0.37338	0.3798	0.39725	0.53077	0.52844	0.50969	/
3	n	1.33398	1.32106	1.29758	1.19093	1.16484	1.19951	1.18188	1.23961	1.17883	/
	R^2	0.99863	0.99886	0.99921	0.99974	0.99959	0.99924	0.99938	0.99828	0.99774	0.99896
	χ^2	0.00014	0.00011	0.00008	0.00003	0.00004	0.00008	0.00006	0.00018	0.00023	0.00011
	RMSE	0.01175	0.01069	0.00886	0.00501	0.00004	0.00868	0.00792	0.01348	0.01517	0.00907
	a	1.07868	1.07777	1.07549	1.04778	1.04118	1.04779	1.03770	1.04520	1.03191	/
4	k	0.30252	0.29758	0.30762	0.40121	0.40459	0.42755	0.56600	0.57240	0.54133	/
	R^2	0.98351	0.98480	0.98733	0.99382	0.99499	0.99301	0.99410	0.98947	0.99200	0.99034
	χ^2	0.00167	0.00152	0.00125	0.00060	0.00048	0.00069	0.00060	0.00112	0.00082	0.00099
	RMSE	0.04084	0.03903	0.03541	0.02458	0.02192	0.02620	0.02453	0.03340	0.02855	0.03050
	a	1.14612	1.14193	1.12455	1.08740	1.07346	1.11468	1.06351	1.08582	1.07029	/
5	k	0.23889	0.23762	0.25549	0.34627	0.35708	0.41458	0.51018	0.49119	0.46783	/
	c	-0.10056	-0.09574	-0.07594	-0.05901	-0.04887	-0.02876	-0.03874	-0.05919	-0.05614	/
	R^2	0.99244	0.99265	0.99309	0.99715	0.99741	0.99624	0.99619	0.99428	0.99589	0.99504
	χ^2	0.00076	0.00074	0.00068	0.00028	0.00025	0.00027	0.00039	0.00061	0.00042	0.00049
	RMSE	0.02766	0.02715	0.02615	0.01669	0.01577	0.01629	0.01973	0.02461	0.02047	0.02161
6	a	1.87501	1.86979	1.85648	1.73628	1.69979	1.75020	1.72022	1.77877	1.70094	/
	k	0.40828	0.40142	0.41308	0.51817	0.51516	0.55603	0.72954	0.75434	0.69286	/
	R^2	0.99772	0.99831	0.99906	0.99980	0.99969	0.99939	0.99943	0.99793	0.99784	0.99880
	χ^2	0.00023	0.00017	0.00009	0.00002	0.00003	0.00006	0.00006	0.00022	0.00022	0.00012
	RMSE	0.01517	0.01300	0.00966	0.00446	0.00541	0.00776	0.00763	0.01480	0.01486	0.01031

表 8 干燥数学模型及干燥时间

Table 8 Drying mathematical model and drying time

实验号	Page模型	干燥时间(h)
1	$MR=\exp(-0.17451t^{1.33349})$	6.92146
2	$MR=\exp(-0.17435t^{1.32084})$	7.05580
3	$MR=\exp(-0.18866t^{1.29755})$	6.87662
4	$MR=\exp(-0.30937t^{1.19091})$	5.39502
5	$MR=\exp(-0.32379t^{1.16481})$	5.38777
6	$MR=\exp(-0.33044t^{1.19946})$	5.04567
7	$MR=\exp(-0.47302t^{1.18186})$	3.81568
8	$MR=\exp(-0.45364t^{1.23935})$	3.70897
9	$MR=\exp(-0.45191t^{1.17860})$	3.98110

有 90% 的概率可认为在显著性水平 $\alpha=0.1$ 的条件下, 温度对青花椒果皮光合色素单位质量含量影响较显著, 与单因素实验结果一致, 即青花椒果皮内光合色素的分解随温度升高而加快。有 75% 的概率可认为在显著性水平 $\alpha=0.25$ 的条件下, 铺放厚度对青花椒果皮光合色素单位质量含量有一定影响。风速对光合色素单位质量含量影响最小。较优的干燥工艺参数为温度 40 ℃、风速 0.5 m/s、铺放厚度 11.9 mm。

有 99% 的概率可认为在显著性水平 $\alpha=0.01$ 的条件下, 温度对青花椒有效水分扩散系数影响极显著, 与单因素实验结果一致, 即青花椒干燥速度随温

表 9 试验结果、有效水分扩散系数及平均活化能
Table 9 Results test, D_{eff} and average activation energy

实验号	A温度	B风速	C铺放厚度	D误差	色差	光合色素单位质量含量($10^{-4}\cdot\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	有效水分扩散系数($10^{-7}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	决定系数	活化能($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$)
1	1	1	1	1	20.87	2.04892	6.1747	0.9840	23225.63 ($R^2=0.9766$)
2	1	2	2	2	19.64	3.00457	6.0473	0.9892	
3	1	3	3	3	21.15	2.56018	6.0362	0.9922	
4	2	1	2	3	22.18	1.93573	7.5437	0.9949	
5	2	2	3	1	24.27	1.47309	7.6075	0.9971	
6	2	3	1	2	25.72	1.17079	8.0574	0.9873	
7	3	1	3	2	23.89	1.56878	10.6057	0.9899	
8	3	2	1	3	26.38	1.15968	10.8613	0.9639	
9	3	3	2	1	24.47	1.40890	10.8882	0.9633	

表 10 极差分析

Table 10 Analysis of range

评价指标		A温度	B风速	C铺放厚度	D误差
色差	K ₁	61.66	66.94	72.97	69.61
	K ₂	72.17	70.29	66.29	69.25
	K ₃	74.74	71.34	69.31	69.71
	R ₁	13.08	4.40	6.68	0.46
	因子主次	1	3	2	4
光合色素 单位质量含量	K ₁	7.6137	5.5534	4.3794	4.9309
	K ₂	4.5796	5.6373	6.3492	5.7441
	K ₃	4.1374	5.1399	5.6021	5.6556
	R ₂	3.4763	0.4975	1.9698	0.8132
	因子主次	1	4	2	3
有效水分 扩散系数	K ₁	18.2535	24.3194	24.0887	24.6657
	K ₂	23.2086	24.5161	24.4792	24.7104
	K ₃	32.3552	24.9818	24.2494	24.4412
	R ₃	14.097	0.6577	0.844	0.2692
	因子主次	1	3	2	4

注: K₁、K₂、K₃为水平数据和; R₁、R₂、R₃为极差。

表 11 方差分析

Table 11 Analysis of variance

评价指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F值	显著性
色差	A	32.0168	2	16.0084	820.4767	S**
	B	3.5206	2	1.7603	90.2192	S*
	C	7.4598	2	3.7299	191.1686	S**
	误差	0.0390	2	0.0195	—	—
	优组合			A ₁ B ₁ C ₂		
光合色素 单位质量含量	A	2.3795	2	1.1897	17.9148	S(*)
	B	0.0468	2	0.0234	0.3525	
	C	0.6591	2	0.3295	4.9622	
	误差	0.1328	2	0.0664	—	—
	优组合			A ₁ B ₂ C ₂		
有效水分 扩散系数	A	34.0991	2	17.0496	2459.1870	S**
	B	0.0763	2	0.0382	5.5606	
	C	0.1269	2	0.0636	9.0394	S*
	误差	0.0141	2	0.0071	—	—
	优组合			A ₃ B ₃ C ₁		

注: $F_{0.01}(2,2)=99.01$, $F_{0.05}(2,2)=19.00$, $F_{0.1}(2,2)=9.00$, $F_{0.25}(2,2)=3.00$; S**为极显著, S*为显著, S(*)为较显著。

度升高而加快。有 75% 的概率认为在显著性水平 $\alpha=0.25$ 的条件下, 风速对青花椒有效水分扩散系数有一定影响。有 90% 的概率认为在显著性水平 $\alpha=0.1$ 的条件下, 铺放厚度对青花椒有效水分扩散系数影响显著。有效水分扩散系数最大时的干燥工艺参数为温度 60 ℃, 风速 0.7 m/s, 铺放厚度 6.2 mm, 即温度越高、风速越大、铺放厚度越小时, 有效水分扩散系数越大。

综合考虑干燥工艺参数对色差、光合色素单位质量含量和有效水分扩散系数的影响, 确定最优工艺参数为: 温度 40 ℃、风速 0.3 m/s、铺放厚度 11.9 mm。以此条件试验验证, 得色差为 20.01, 光合色素单位质量含量为 2.9601×10^{-4} mg/g。

2.4 干燥温度对干燥中光合色素含量的影响

根据正交试验, 温度对光合色素单位质量含量

指标的影响最显著, 结果如图 6 所示。

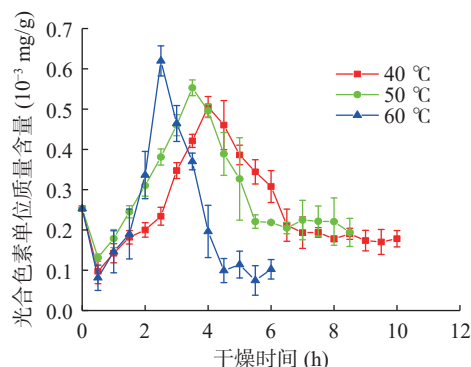


图 6 温度对青花椒光合色素单位质量含量的影响

Fig.6 Effects of temperatures on unit mass content of photosynthetic pigment of green Sichuan pepper

由图 6 可知, 在干燥初始阶段, 温度对青花椒光合色素含量变化有显著影响。随着干燥时间的延长, 光合色素单位质量含量会呈现先略下降再上升而后下降至趋于稳定的变化。首先, “先略下降”是由于高温胁迫使光合色素发生酶促降解, 此降解反应在酶完全失活之前持续作用。同时, 植物因高温胁迫会激发自我防御机制, 酶促防御系统中的保护酶开始时具有较高活性, 随着干燥时间延长而迅速下降, 光合色素随之受到影响^[27]。但高温胁迫时间过长会对叶绿体造成损害, 导致叶绿素含量减少^[28]。其次, “再上升”是由于干燥使青花椒果皮大量失水, 导致光合色素单位质量含量短暂上升, 或者由于短期热刺激使青花椒为抵抗高温胁迫而略微提高叶绿素含量^[29]。再次, 光合色素单位质量含量到达峰值时, 由于青花椒果皮失水量减小, 失水变缓, 单位质量含量开始下降, 青花椒果皮几乎不再失水, 光合色素单位质量含量趋于平衡。而且高温胁迫对光合色素破坏不可逆^[30], 因而, 应当尽可能保证使干制青花椒果皮光合色素含量保持较高水平。

此外, 类胡萝卜素含量随温度变化趋势与叶绿素相似, 温度越高, 胁迫时间越长, 含量下降越明显^[31]。因此, 光合色素单位质量含量在温度为 60 ℃时的稳定值比 40 和 50 ℃时更低。

3 结论

随着温度和风速的升高、铺放厚度的减小, 干燥速率升高, 干燥至安全含水率(10%w.b.)所需的时间减少; 拟合结果表明 Page 模型是描述青花椒热泵干燥的最佳模型, 且温度越高, 有效水分扩散系数越大。温度对青花椒热泵干燥色差和光合色素单位质量含量的影响最显著。青花椒热泵干燥色泽较优条件为温度 40 ℃、风速 0.3 m/s、铺放厚度 11.9 mm, 在此温度和铺放厚度条件下的光合色素单位质量含量较优, 但风速对其影响较小。青花椒光合色素单位质量含量随干燥的进行呈现出先下降再上升又迅速下降至稳定的趋势。温度越高, 光合色素单位质量含量变化越快, 不利于干制青花椒品质的提高, 干燥工

艺设计时应重点关注温度的影响。本研究中未研究光合色素的分解抑制方法,青花椒工艺微观理论研究不足,今后需与控制干燥条件相结合研究青花椒光合色素降解机理,以保证青花椒果皮内的叶绿素含量。

参考文献

- [1] 田冰,王玲,彭林,等.多指标综合评分法优化青花椒热泵-微波联合干燥工艺[J].食品研究与开发,2019,40(19):149-155. [TIAN B, WANG L, PENG L, et al. Optimization of heat pump-microwave combined drying process for *Zanthoxylum Schinifolium* by multi-index comprehensive scoring method[J]. Food Research and Development, 2019, 40(19): 149-155.]
- [2] 代建武,付琪其,黄欢,等.青花椒真空脉动干燥特性及干燥品质工艺优化[J].农业工程学报,2021,37(8):279-287. [DAI J W, FU Q Q, HUANG H, et al. Drying characteristics and quality optimization of green prickly ashes during vacuum pulsed drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 279-287.]
- [3] 杨森,陈鸿平,刘友平,等.花椒干燥技术研究进展[J].中国调味品,2021,46(3):175-178,184. [YANG S, CHEN H P, LIU Y P, et al. Research progress on the drying technology of *Zanthoxylum bungeanum* [J]. China Condiment, 2021, 46(3): 175-178, 184.]
- [4] 王春霞,易文裕.花椒干燥技术研究[J].现代农业科技,2020(21):236-237,242. [WANG C X, YI W Y. Study on drying technology of *Zanthoxylum bungeanum* [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(21): 236-237, 242.]
- [5] JING Nana, WANG Minyan, GAO Menglu, et al. Color sensory characteristics, nutritional components and antioxidant capacity of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. as affected by different drying methods[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 160: 113167.
- [6] 汪洋,阚建全.光照对鲜青花椒干燥过程中叶绿素降解的影响[J].食品科学,2014,35(3):10-15. [WANG Y, KAN J Q. Chlorophyll breakdown in green pricklyash with illumination during drying[J]. Food Science, 2014, 35(3): 10-15.]
- [7] 徐毅,阚建全.青花椒干燥过程叶绿素光降解原因初探[J].中国食品学报,2015,15(11):135-141. [XU Y, KAN J Q. Studies on the photodegradation mechanism of chlorophyll from green pricklyash during drying process[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(11): 135-141.]
- [8] 蒲彪,姚佳.鲜食青花椒热处理工艺[J].食品科学,2012,33(12):46-51. [PU B, YAO J. Optimization of thermal treatment of fresh chinese prickly ash (*Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc) [J]. Food Science, 2012, 33(12): 46-51.]
- [9] 杨兵,梅晓飞,彭林,等.热风干制对青花椒品质的影响及工艺优化[J].食品与发酵工业,2018,44(11):251-258. [YANG B, MEI X F, PENG L, et al. Effects of hot air drying on the quality of *Zanthoxylum schinifolium* and its optimization[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(11): 251-258.]
- [10] 张甫生,陈科伟,郑炯,等.微波与护色剂结合处理对自然干制青花椒色泽的影响[J].食品工业科技,2013,34(24):329-333. [ZHANG F S, CHEN K W, ZHENG J, et al. Effect of microwave combined antibrowning reagent treatment on the color of green pricklyashes during natural drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(24): 329-333.]
- [11] 杨英鹏,张德康.烘烤过程中烟叶水分含量变化和叶绿素降解速率探究[J].南方农业,2021,15(24):4-7. [YANG Y P, ZHANG D K. Study on moisture content change and chlorophyll degradation rate of tobacco leaves during curing[J]. South China Agriculture, 2021, 15(24): 4-7.]
- [12] 朱明明,樊明涛,何鸿举.类胡萝卜素降解方式的研究进展[J].食品科学,2017,38(11):308-317. [ZHU M M, FAN M T, HE H J. Advances in methods for the degradation of carotenoids[J]. Food Science, 2017, 38(11): 308-317.]
- [13] 宋朝鹏,高远,武圣江,等.密集烘烤定色期烟叶类胡萝卜素降解及相关酶活性变化[J].中国农业科学,2009,42(8):2875-2881. [SONG Z P, GAO Y, WU S J, et al. The degradation mechanism of carotenoids in flue-cured tobacco and the changes of the related enzymes activities at leaf-drying stage during the bulk curing process[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2875-2881.]
- [14] 武逸凡,杨明金,李瑞,等.基于温度-水分-色泽耦合的青花椒变温干燥工艺研究[J].食品与发酵工业,2021,47(24):201-208. [WU Y F, YANG M G, LI R, et al. Research on temperature-varying drying technology of green pricklyashes based on temperature-moisture-color coupling[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 201-208.]
- [15] 葛宜元.试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015. [GE Y Y. Experimental design method and application of design-expert software[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015.]
- [16] NKHATA S G. Total color change (ΔE) is a poor estimator of total carotenoids lost during post-harvest storage of biofortified maize grains[J]. Heliyon, 2020, 6(10): e05173.
- [17] 张秀君,孙钱钱,乔双,等.菠菜叶绿素提取方法的比较研究[J].作物杂志,2011(3):57-60. [ZHANG X J, SUN Q Q, QIAO S, et al. A comparative study of chlorophyll extraction methods[J]. Crops, 2011(3): 57-60.]
- [18] 胡秉芬,黄华梨,季元祖,等.分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J].草业科学,2018,35(8):1965-1974. [HU B F, HUANG H L, JI Y Z, et al. Evaluation of the optimum concentration of chlorophyll extract for determination of chlorophyll content by spectrophotometry[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(8): 1965-1974.]
- [19] 刘畅,王世才,卢东昱.利用光学多通道分析仪与分光光度计测定叶绿素的紫外-可见光区吸收光谱[J].物理试验,2005(12):38-41. [LIU C, WANG S C, LU D Y. Measurement of UV-Vis absorption spectra of chlorophyll by using oma and spectrophotometer[J]. Physics Experimentation, 2005(12): 38-41.]
- [20] 张宪政.植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J].辽宁农业科学,1986(3):26-28. [ZHANG X Z. Determination of plant chlorophyll content by acetone ethanol mixture method[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 1986(3): 26-28.]
- [21] 徐敏,刘君,阿衣古力·阿布都瓦依提.植物生理试验教学中叶绿素提取方法比较[J].试验科学与技术,2018,16(4):129-133. [XU M, LIU J, AYIGULI A B D W Y T. Comparative methods on chlorophyll extraction in plant physiology experiment teaching[J]. Experiment Science and Technology, 2018, 16(4): 129-133.]
- [22] TALAPATRA N, GAUTAM R, MITTAL V, et al. A com-

- parative study of the growth of microalgae-bacteria symbiotic consortium with the axenic culture of microalgae in dairy wastewater through extraction and quantification of chlorophyll[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.227>.
- [23] GANJE M, JAFARI S M, FARZANEH V, et al. Kinetics modelling of color deterioration during thermal processing of tomato paste with the use of response surface methodology[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2018, 54(12): 3663–3671.
- [24] 尹晓峰, 杨明金, 李光林, 等. 稻谷薄层热风干燥工艺优化及数学模型拟合[J]. *食品科学*, 2017, 38(8): 198–205. [YIN X F, YANG M J, LI G L, et al. Optimization and mathematical modeling of thin layer hot-air drying of rough rice[J]. *Food Science*, 2017, 38(8): 198–205.]
- [25] 王立霞, 兰昊, 郑倩雨, 等. 红枣气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 131–140. [WANG L X, LAN H, ZHENG Q Y, et al. Drying characteristics and model of jujube in air jet impingement[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(2): 131–140.]
- [26] 杨森, 冯靖雯, 刘友平, 等. 热风干燥温度对竹叶花椒干燥特性及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(12): 203–209. [YANG S, FENG J W, LIU Y P, et al. The effect of hot air drying temperature on the drying characteristics and quality of *Zanthoxylum armatum* DC.[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(12): 203–209.]
- [27] 赵玉国, 王新忠, 吴沿友, 等. 高温胁迫及恢复对水稻叶绿素荧光动力学特性和保护酶活性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(27): 16487–16488, 16625. [ZHAO Y G, WANG X Z, WU Y Y, et al. Effects of high temperature stress and recovery on ps II dynamic characteristics and protective enzyme activities of rice (*O. sativa* L.)[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(27): 16487–16488, 16625.]
- [28] 陈文佳. 细叶小羽藓快繁体系及对逆境的生理响应研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012. [CHEN W J. Study on rapid propagation system and physiological responses of stress of *Haplocladium microphyllum*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2012.]
- [29] 王曼, 沙伟, 张梅娟, 等. 高温胁迫对毛尖紫萼藓生理生化特性的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2015, 34(6): 1290–1295. [WANG M, SHA W, ZHANG M J, et al. Effects of high temperature stress on the physiological and biochemical characteristics in *Grimmia pilifera*[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2015, 34(6): 1290–1295.]
- [30] WOJDYŁO A, NOWICKA P, TKACZ K, et al. Fruit tree leaves as unconventional and valuable source of chlorophyll and carotenoid compounds determined by liquid chromatography-photo-diode-quadrupole/time of flight-electrospray ionization-mass spectrometry (LC-PDA-qTof-ESI-MS)[J]. *Food Chemistry*, 2021, 349: 129156.
- [31] 徐超, 王明田, 杨再强, 等. 高温对温室草莓光合生理特性的影响及胁迫等级构建[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 231–240. [XU C, WANG M T, YANG Z Q, et al. Effects of high temperature on photosynthetic physiological characteristics of strawberry seedlings in greenhouse and construction of stress level[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 231–240.]