

基于温度控制的猕猴桃片微波真空干燥特性研究

Microwave-vacuum drying characteristics of kiwifruit slice based on controlling temperature

宋树杰^{1,2,3} 黄 雪^{1,2,3} 郭玉蓉^{1,2,3}

SONG Shu-jie^{1,2,3} HUANG Xue^{1,2,3} GUO Yu-rong^{1,2,3}

(1. 陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 陕西 西安 710062; 2. 国家苹果加工技术研发专业中心, 陕西 西安 710062; 3. 西部果品资源高值利用教育部工程研究中心, 陕西 西安 710119)

(1. College of Food Engineering and Nutrition Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China; 2. National Research & Development Center of Apple Processing Technology, Xi'an, Shaanxi 710062, China; 3. Engineering Research Center of High Value Utilization of Western China Fruit Resources, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

摘要:目的: 研究温度控制下猕猴桃片微波真空干燥特性, 并确定其最佳数学干燥模型。方法: 以猕猴桃片为原料, 利用自制的温度自适应微波真空干燥机干燥猕猴桃片, 研究不同控制温度、真空度和微波功率密度对其干燥特性和水分有效扩散系数的影响, 利用 SPSS 19.0 软件将试验数据与 6 个常用的薄层干燥模型进行非线性拟合, 以确定系数 R^2 , 均方根误差 R_{MSE} 及卡方 χ^2 作为评价指标, 筛选出最佳干燥模型。结果: 温度控制条件下的猕猴桃片的微波真空干燥为降速干燥过程, 无明显恒速阶段。在试验范围内, 控制温度与真空度对猕猴桃片的干燥特性影响显著, 控制温度越高、真空度越大, 物料的干燥速率越大; 根据费克第二定律计算出猕猴桃于温度控制下微波真空干燥过程中的水分有效扩散系数, 且随着控制温度与真空度的增大而增大, 其最大值为 $6.814\ 97 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$, 平均活化能为 $70.77\ \text{kJ/mol}$ 。所选用的 6 个模型中, Two-term exponential 模型具有最大的确定系数 R^2 (0.999 9), 最低的 R_{MSE} (0.002 02) 和最小的 χ^2 (0.000 30), 是猕猴桃片温度控制下微波真空干燥的最佳模型。结论: 控制温度、真空度对猕猴桃片微波真空干燥特性、干燥速率和水分有效扩散系数具有显著影响。在试验范围内, Two-term exponential 模型的拟合度最高, 可有效描述猕猴桃片温度自适应下微波真空干燥过程中的水分随时间的变化规律。

关键词: 猕猴桃片; 温度控制; 微波真空; 干燥特性; 动力学

力学

Abstract: Objective: To improve the dry product quality and drying efficiency of kiwifruit slices (KS), the effects of microwave-vacuum drying conditions with controlling temperature on the drying characteristics of KS were studied and the drying kinetics model was established to predict the moisture change in the drying process. Methods: Using KS as raw materials, the effects were studied, including in different setting temperature, vacuum degree and microwave power density on the drying characteristics of KS and its effective moisture diffusion coefficient (EMDC) of water, and the activation energy was also calculated. With the R^2 , R_{MSE} and χ^2 as the evaluation indexes, the six common dry models were screened with fitting the experimental data by SPSS 19.0 software, the relationships between the model parameters and drying conditions was established. Results: Microwave-vacuum drying process of KS occurred in the falling-rate period, and there was no constant drying rate period. Under the experiment conditions, setting temperature and microwave power density had a certain influence on the microwave-vacuum drying characteristics of KS. With the increase of setting temperature and vacuum degree, the drying rate increased. However, the effect of microwave power density was not significant. The water effective diffusion coefficient of the KS during drying process could be calculated by Fick's second law, and it increased with the increase of setting temperature and vacuum degree. The maximum EMDC was $6.814\ 97 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$. Arrhenius was used to calculate the activation energy of KS in drying process and the value of E_a was $70.77\ \text{kJ/mol}$. Among the six models, the Two-term exponential model had the highest coefficient of determination R^2 (0.999 9), the lowest chi-square χ^2 (0.000 30) and R_{MSE} (0.002 02), and it is the optimum model of the KS in microwave-

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (编号: 2020NY-149)

作者简介: 宋树杰, 男, 陕西师范大学讲师, 博士。

通信作者: 郭玉蓉 (1962—), 女, 陕西师范大学教授, 博士。

E-mail: yrguo@snnu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-07

vacuum drying with setting temperature. **Conclusion:** The setting temperature and vacuum degree had influence on the drying curves, the drying rate curve and EMDC, and the effect of microwave power density was not significant. Two-term exponential model could properly describe the microwave-vacuum drying behavior of KS, and could be used to predict the moisture change of the KS in microwave-vacuum drying process based on the temperature controlling under the test conditions.

Keywords: kiwifruit slices; temperature controlled; microwave-vacuum; drying characteristics; kinetics

猕猴桃因其水分含量较高,采后猕猴桃不耐贮藏,而将其加工成干制品可显著减少采后贮藏损失并增加附加值^[1]。其中,猕猴桃片是目前国际和国内市场需求量较大的猕猴桃干制加工品,其发展前景极为广阔。

猕猴桃片干燥方法主要有热风干燥^[2]、微波干燥^[5]、微波真空干燥^[3-4]和真空冷冻干燥^[5-6]。其中,微波及其联合干燥技术是最具潜力猕猴桃片干燥技术^[7],具有干燥效率高的优势,但由于微波温度无法控制仍然存在物料干燥温度飙升的现象,进而造成物料焦糊、表面硬化等品质下降。

控制微波干燥过程中的物料温度成为维持品质的重要途径,同时温度作为干燥过程的重要参数,若对其进行控制可间接实现对微波干燥过程的控制。莫愁等^[8]构建了微波干燥恒温控制系统,实现物料干燥温度处于某一预设温度区间,但控制精度较低且缺乏干燥特性分析。陈霖^[9]对控温与常规微波干燥后花生品质进行了分析,结果表明常规微波干燥花生有焦糊现象,而控温微波干燥效果好,且无焦糊现象。目前,关于温度控制下猕猴桃片的微波真空干燥研究尚未见报道^[10]。

研究拟以猕猴桃片为研究对象,利用自制的可实现温度控制的微波真空干燥机对其进行干燥试验,研究控制温度、真空度及微波功率密度对猕猴桃片基于温度控制下微波真空干燥特性的影响,并确定最佳的干燥动力学模型,以期对猕猴桃片的微波真空干燥设备控制及其工业化生产加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验试剂与原料

试验用“海沃德”猕猴桃采集于西安市周至县,选取无机械损伤、外形与成熟度基本一致的样品。猕猴桃样品的水分含量参照 AOAC 925.40 方法测定,其平均湿基含水量为 82.71%。试验前将猕猴桃样品保存在(0.0±0.4)℃的恒温箱中 12 h,以使猕猴桃样品每次干燥试验的初始温度保持一致。

1.2 仪器设备与试验装置

电子分析天平:AB204-N 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

恒温恒湿箱:SH-045B 型,上海实验仪器厂;

温度控制微波真空干燥系统(如图 1 所示):由 1.5 kW、2 450 MHz 微波加热系统附带一个 1.2 kW 真空度可调的真空泵,由实验室自行改装设计。

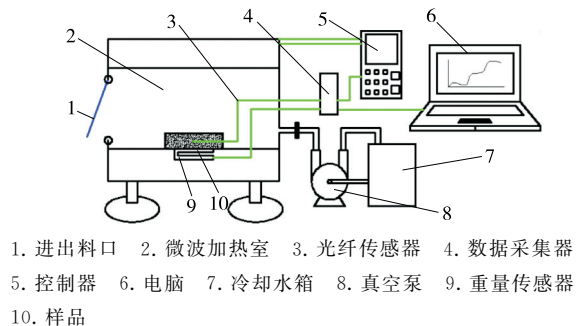


图 1 温度控制的微波真空干燥系统示意图

Figure 1 Schematic view of microwave-vacuum system with auto controlled temperature

1.3 温度控制的微波真空干燥过程与方法

将试验用猕猴桃从冰箱中取出,清洗去皮后,再均匀切成厚度为 5 mm,直径为 48 mm 的薄片。将 500 g 猕猴桃片置于材质为聚氯乙烯的样品篮(27.5 cm×20.0 cm×7.0 cm)内,并将猕猴桃平铺以防止重叠,然后将样品篮置于微波真空干燥箱内的重量传感器上。根据试验设计要求,设定规定的微波功率后开始干燥试验。干燥期间每次间隔 1 min 记录样品重量,直至干基水分含量<2%时为止。每组试验重复 3 次,取平均值。基于预试验及相关参考文献^[4,11],选取试验参数与水平,详见表 1。

1.4 指标测定与计算

1.4.1 水分比计算与干燥速率 在猕猴桃片的微波真空干燥过程中,其水分比(M_r)可由式(1)求得^[13]。

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

式中:

M_r ——水分比;

M_0 ——干燥过程中猕猴桃片的初始干基含水量,

g/g;

M_t ——干燥过程中猕猴桃片在 t 时刻的干基含水量,

g/g;

M_e ——干燥过程中猕猴桃片的平衡干基含水量,g/g。

干燥速率(D_r)按式(2)计算:

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

式中:

D_r ——干燥速率,g/(g·min);

t ——干燥时间,min;

$M_{t+\Delta t}$ ——猕猴桃片干燥过程中于 $t + \Delta t$ 时刻的干基含水量,g/g。

表 1 基于温度控制的猕猴桃微波真空干燥试验设计与参数

Table 1 Drying experiment design and parameters of kiwifruit slices dried by microwave-vacuum drying method with controlling temperature

试验序号	控制温度/ ℃	真空度/ kPa	微波功率密度/ (W · g ⁻¹)	试验序号	控制温度/ ℃	真空度/ kPa	微波功率密度/ (W · g ⁻¹)
1	50	-85	8	8	60	-90	8
2	55	-85	8	9	60	-95	8
3	60	-85	8	10	60	-85	4
4	65	-85	8	11	60	-85	6
5	70	-85	8	12	60	-85	10
6	60	-70	8	13	60	-85	12
7	60	-80	8				

1.4.2 水分有效扩散系数 为了表达物料内部水分迁移的难易程度,水分有效扩散系数(D_{eff})是描述物料在干燥过程中水分扩散特性重要参数。菲克第二扩散方程^[12]已被大量干燥试验证实可用于描述圆柱形等形状规则的农产品物料的干燥特性。

$$\ln M_r = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}, \quad (3)$$

式中:

L ——猕猴桃片的切片厚度,mm;

t ——干燥时间,min;

D_{eff} ——物料干燥过程中的水分有效扩散系数, m^2/s 。

以式(3)为基础,猕猴桃片的水分有效扩散系数 D_{eff} 可由水分比 M_r 的对数与相对应时间 t 的直线方程的斜率求得:

$$k = -\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2}, \quad (4)$$

式中:

k ——式(3)的斜率值;

L ——猕猴桃片的切片厚度,mm;

D_{eff} ——物料干燥过程中的水分有效扩散系数, m^2/s 。

1.4.3 干燥活化能 干燥活化能(E_a)为物料干燥过程中脱除单位质量水分所需的能量,以表示物料被干燥的难易程度,可由 Arrhenius 指数模型描述^[13],即

$$D_{\text{eff}} = D_0 \times \exp\left(\frac{E_a}{R} \times \frac{1}{T + 273.15}\right), \quad (5)$$

式中:

E_a ——活化能,W/g;

R ——气体常数,8.314 J/(mol · K);

T ——温度,K;

D_0 ——Arrhenius 方程指数前因子, m^2/s 。

将式(5)两侧取对数可得:

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \times \frac{1}{T + 273.15}。 \quad (6)$$

由式(6)可知, $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/(T + 273.15)$ 呈线性关系, 由此可求出干燥活化能 E_a 。

1.4.4 干燥模拟拟合与误差分析 表 2 为试验选用的 6 种国内外相关文献中常用的薄层干燥数学模型。利用基于温度控制的猕猴桃片微波真空干燥试验数据进行拟合,并根据其决定系数(R^2)、离差平方和(χ^2)和均方根误差(R_{MSE})用以确定模型拟合程度的优劣,其中 R^2 越高, R_{MSE} 和 χ^2 越小,表明模型拟合度越高。 R^2 、 R_{MSE} 和 χ^2 的计算公式:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{r \text{ exp},i} - M_{r \text{ pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{r \text{ exp},i} - M_{r \text{ pre},i})^2}, \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{r \text{ exp},i} - M_{r \text{ pre},i})^2}{N - z}, \quad (8)$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{r \text{ exp},i} - M_{r \text{ pre},i})^2}{N}}, \quad (9)$$

表 2 薄片干燥数学模型

Table 2 Mathematical models of thin-layer drying

数学模型	模型方程
Lewis ^[14]	$M_r = \exp(-k \times t)$
Page ^[15]	$M_r = \exp(-k \times t^n)$
Henderson and Pabis ^[16]	$M_r = a \times \exp(-k \times t)$
Logaritlunic ^[17]	$M_r = a \times \exp(-k \times t^n) + c$
Two-term exponen- tial ^[18]	$M_r = a \times \exp(-k \times t) + (1 - a) \times \exp(-k \times a \times t)$
Wang and singh ^[19]	$M_r = a \times t^2 + b \times t + 1$

式中:

$M_{r\text{ pre},i}$ ——模型预测水分比;

$M_{r\text{ exp},i}$ ——实验室测水分比;

z ——回归模型中参数个数;

N ——试验数据个数。

1.5 干燥模型的验证

按照 1.3 试验过程和方法,将猕猴桃片分别在试验条件 I:控制温度为 63 ℃,真空度为-82 kPa,微波功率密度为 9 W/g,和试验条件 II:控制温度为 58 ℃,真空度为-76 kPa,微波功率密度为 11 W/g 的条件下进行试验,将所得数据与拟确定的最佳模型预测值进行线性拟合分析,利用拟合的确定系数 R^2 检验模型的拟合效果。

1.6 数据处理

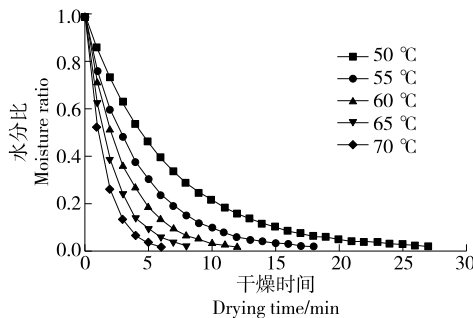
采用 SPSS 19.0 软件进行非线性或者线性回归分析,并应用 Origin 2015 软件绘制图片。其中,显著性水平取 0.05。

2 结果与分析

2.1 基于温度控制的猕猴桃片微波真空干燥特性

2.1.1 控制温度对猕猴桃片微波真空干燥特性的影响

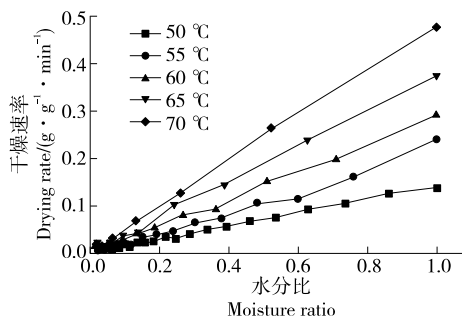
由图 2 可知,猕猴桃片的水分含量随干燥时间的延长而持续降低。随着控制温度的升高,猕猴桃片干燥所需时间越短。控制温度对猕猴桃片的干燥时间有显著影响,在控制温度分别为 50,55,60,65,70 ℃下,猕猴桃片所需干燥时间分别为 27,18,12,8,6 min。因为随着控制温度的升高,物料中的水分子运动加剧,猕猴桃片的传热传质效率越高。由图 3 可知,不同控制温度下,猕猴桃片的干燥速率随着水分含量的减少而减少,且控制温度越高,其干燥速率越大。猕猴桃片的温度控制微波真空干燥属于降速干燥,无明显恒速干燥阶段。其原因可能为猕猴桃片在干燥过程中,水分蒸发的界面随着干燥时间延长,不断向猕猴桃片内部迁移,进而水分迁移距离持续增加,加之干燥界面两侧的温湿差逐渐缩小,从而不断降



微波功率密度 8 W/g、真空度-85 kPa

图 2 控制温度对猕猴桃片的干燥特性曲线的影响

Figure 2 Effects of setting temperature on the drying curves of kiwifruit slices



微波功率密度 8 W/g、真空度-85 kPa

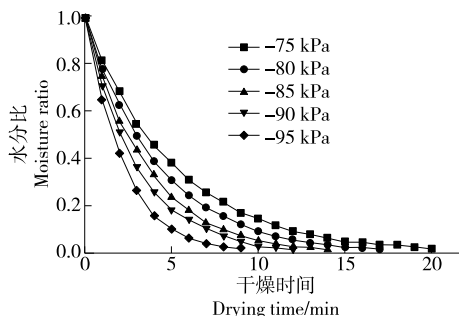
图 3 控制温度对猕猴桃片的干燥速率曲线的影响

Figure 3 Effects of setting temperature on the drying rate curves of kiwifruit slices

低干燥速率。

2.1.2 真空度对猕猴桃片微波真空干燥特性的影响 由图 4 可知,猕猴桃片的水分随干燥时间延长而逐渐降低。且随着真空度的增加,干燥所需时间随之缩短。在真空度分别为-70,-80,-85,-90,-95 kPa,猕猴桃片所需要的干燥时间分别为 20,17,12,11,9 min。因此,在试验的真空度范围内,真空度对猕猴桃片的干燥时间有明显影响,真空度越高,干燥时间越短。其原因可能为猕猴桃片在干燥过程中,随着干燥真空度的升高,引起水分蒸发温度降低,从而导致干燥时间缩短。由图 5 可知,不同控制温度下,猕猴桃片的干燥速率随水分含量的减少而减少,且猕猴桃片的微波真空干燥属于降速干燥,无明显恒速干燥阶段。真空度越高,微波真空干燥速率越高。

2.1.3 微波功率密度对猕猴桃片微波真空干燥特性的影响 由图 6 可知,猕猴桃片的水分比逐渐降低,但微波功率密度增大,而猕猴桃片干燥时间均为 12 min,且取相同分析时间时,水分比无显著差异。因此,微波功率密度对温度控制下猕猴桃片微波真空干燥特性的影响不显著 ($P < 0.05$)。其原因因为在温度控制的条件下,微波功率密度大,其升温速率快,但同时物料达到控制温度时微波启



微波功率密度 8 W/g、控制温度 60 ℃

图 4 真空度对猕猴桃片的干燥特性曲线的影响

Figure 4 Effects of vacuum degree on the drying curves of kiwifruit slices

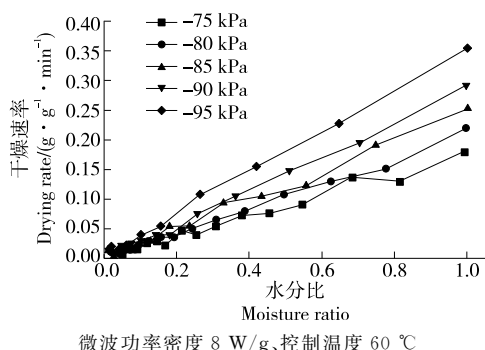


图 5 真空度对猕猴桃片的干燥速率曲线的影响

Figure 5 Effects of vacuum degree on the drying rate curves of kiwifruit slices

止间隔时间长,而微波功率密度小,其升温速率慢,但微波起止间隔时间长,从而在整个微波真空干燥过程中,猕猴桃片吸收的微波能量几乎一致。由图 7 可知,猕猴桃片的温度控制微波真空干燥属于降速干燥,无明显恒速干燥阶段。且不同微波功率密度下,猕猴桃片的干燥速率随水分含量的减少而减少,但微波功率密度对猕猴桃片干燥速率也无显著影响。

由图 2~图 7 可知,猕猴桃片的干燥特性和干燥速率

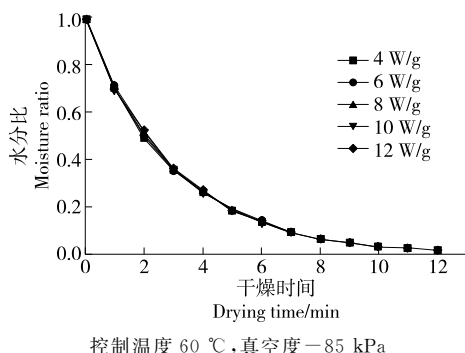


图 6 微波功率密度对猕猴桃片的干燥特性曲线的影响

Figure 6 Effects of microwave power density on the drying curves of kiwifruit slices

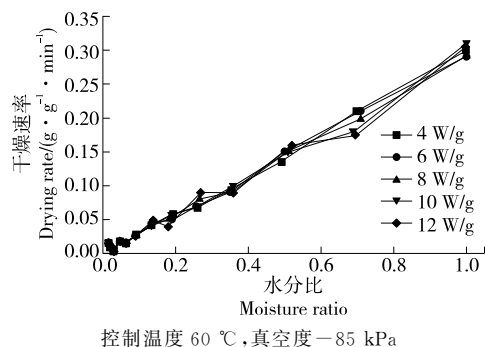


图 7 微波功率密度对猕猴桃片的干燥速率曲线的影响

Figure 7 Effects of microwave power density on the drying rate curves of kiwifruit slices

均会随控制温度、真空度的变化而变化,而微波功率密度对其无显著影响。以上现象说明物料在温度控制下微波真空干燥过程中水分主要通过热扩散完成散失,且可通过控制温度来达到控制微波真空干燥过程的目的。物料温度直接影响物料中水分吸收微波能量后的温度,其温度越高,传热传质效率越高,因此其干燥速率越快,与莲子表面温度区间控制其微波干燥^[20]的结论一致。其中,物料中水分蒸发温度会随真空度提高而降低,进而加快物料内部向外传质的速率,从而干燥速率增加^[12]。微波功率密度对猕猴桃片微波真空干燥特性无显著影响($P < 0.05$),与现有无温度控制的微波真空干燥研究^[4,12]不同。其原因为在温度控制的基础下,微波功率密度大,其升温速率快,但同时物料达到控制温度时微波启止间隔时间长,而微波功率密度小,其升温速率慢,但微波启止间隔时间长,从而在整个微波真空干燥过程中,猕猴桃片吸收的微波能量几乎一致^[21]。

在不同的温度控制微波真空干燥试验条件下,猕猴桃片在 6~27 min 内基本完成干燥,所需干燥时间均较短,未出现温度飙升及表面焦糊硬化现象,因此可将温度控制微波真空干燥技术应用于猕猴桃片的干燥,且具有较高的干燥效率。由猕猴桃片的干燥速率曲线可以看出,其微波真空干燥过程属于降速干燥,与板栗、荔枝、香芋片、莲子等很多食品物料^[22-25]在微波真空干燥速率曲线相似。其原因为:干燥初期,猕猴桃片表面水分充分暴露,迁移距离短而扩散阻力小,而物料内部水分深层因其迁移路径延长,扩散阻力增加,使得扩散速率减小^[26]。

2.2 有效水分扩散系数

由表 3 可知,当保持真空度与微波功率密度不变,控制温度为 50,55,60,65,70 °C 时,水分有效扩散系数分别为 $1.467\ 98 \times 10^{-6}$, $2.240\ 39 \times 10^{-6}$, $3.484\ 19 \times 10^{-6}$, $4.811\ 72 \times 10^{-6}$, $6.814\ 97 \times 10^{-6}$ m²/s。其中,猕猴桃片的水分有效扩散系数随控制温度的升高而呈增大趋势。当保持控制温度与微波功率密度为定值,真空度分别为 -70,-80,-85,-90,-95 kPa 时,水分有效扩散系数分别为 $1.979\ 50 \times 10^{-6}$, $2.438\ 46 \times 10^{-6}$, $3.484\ 19 \times 10^{-6}$, $3.567\ 30 \times 10^{-6}$, $4.561\ 50 \times 10^{-6}$ m²/s,真空度越大,猕猴桃片的有效水分扩散系数越大。当维持控制温度与真空度恒定,控制微波功率密度分别为 4,6,8,10,12 W/g 时,猕猴桃片的有效水分扩散系数分别为 $3.456\ 05 \times 10^{-6}$, $3.451\ 05 \times 10^{-6}$, $3.484\ 19 \times 10^{-6}$, $3.461\ 77 \times 10^{-6}$, $3.469\ 34 \times 10^{-6}$ m²/s。其中,微波功率密度变大,而猕猴桃片的水分有效扩散系数并无显著差异($P < 0.05$)。以上结果与目前食品物料的传统微波真空干燥的结果不同,板栗片^[23]、熟化甘薯片^[27]等的传统微波真空干燥的水分有效扩散系数随微波功率密度、真空度的增大而增大,主要原因可能为温度控制的原因。在所有的干燥试

验组中,在控制温度为 70 ℃、真空度为 -85 kPa、微波功率密度为 8 W/g 时,猕猴桃片的有效水分扩散系数达到最高值 $6.814\ 97 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。在用微波真空干燥技术的相关研究中,曾目成等^[28]研究的猕猴桃片的传统微波真空干燥过程中的有效扩散系数为 $3.450\ 78 \times 10^{-7} \sim 6.746\ 13 \times 10^{-7}\ \text{m}^2/\text{s}$,而研究中猕猴桃片的水分有效扩散系数为 $1.467\ 98 \times 10^{-6} \sim 6.814\ 97 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$,其有效扩散系数增大了近一个数量级。一部分原因可能与其样品切片厚度及猕猴桃品种性质不同;另外,也与微波功率密度及真空度参数范围有关。

2.3 干燥活化能

猕猴桃片于真空度为 -85 kPa 下,其 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/(T+273.15)$ 的关系曲线如图 8 所示,由图 8 可知:猕猴桃片的温度控制微波真空干燥活化能 E_a 为 70.77 kJ/mol,基于

表 3 基于温度控制的微波真空干燥条件下猕猴桃片的有效水分扩散系数

Table 3 Moisture effective diffusion coefficients of kiwifruit slices under various drying conditions

试验序号	线性回归方程	R^2	$D_{\text{eff}}/(\times 10^{-6}\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	$\ln M_r = -0.144\ 74t + 0.074\ 571$	0.997 1	1.467 98
2	$\ln M_r = -0.220\ 89t + 0.135\ 614$	0.998 0	2.240 39
3	$\ln M_r = -0.343\ 53t + 0.364\ 231$	0.999 1	3.484 19
4	$\ln M_r = -0.474\ 42t + 0.472\ 306$	0.999 3	4.811 72
5	$\ln M_r = -0.671\ 93t + 0.670\ 857$	0.999 6	6.814 97
6	$\ln M_r = -0.195\ 17t + 0.004\ 35$	0.998 0	1.979 50
7	$\ln M_r = -0.240\ 42t + 0.013\ 113$	0.998 6	2.438 46
8	$\ln M_r = -0.351\ 72t + 0.054\ 973$	0.994 3	3.567 30
9	$\ln M_r = -0.449\ 75t + 0.007\ 74$	0.998 4	4.561 50
10	$\ln M_r = -0.340\ 75t + 0.340\ 282$	0.999 1	3.456 05
11	$\ln M_r = -0.340\ 26t + 0.345\ 37$	0.998 8	3.451 05
12	$\ln M_r = -0.341\ 32t + 0.348\ 416$	0.999 2	3.461 77
13	$\ln M_r = -0.342\ 07t + 0.355\ 759$	0.998 5	3.469 34

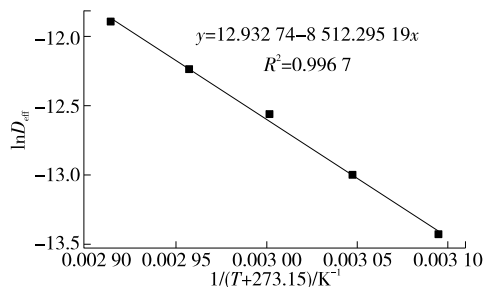


图 8 不同控制温度下 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/(T+273.15)$ 的拟合结果

Figure 8 The fitting results between $\ln D_{\text{eff}}$ and $1/(T+273.15)$ with different setting temperature

活化能定义说明在微波功率密度为 8 W/g、真空度为 -85 kPa 的猕猴桃微波真空干燥条件下,猕猴桃去除 1 kg 水分所需要的最低能量为 3 931.68 kJ。

2.4 猕猴桃片的温度控制下微波真空干燥数学模型拟合

基于 SPSS 19.0 软件的非线性回归分析,将温度控制下猕猴桃片的微波真空干燥试验数据与 6 个常用薄层干燥模型(表 2)进行拟合,并依据较高 R^2 ,较低 R_{MSE} 和 χ^2 作为评价模型的依据,选择最适模型。据此,所得到的分析结果如表 4 所示。

由表 4~表 6 可知,所选用的 6 种薄层干燥模型的决定系数 R^2 均在可接受范围之内。其中,从 1 号模型到 6 号模型, R^2 范围分别在 0.967 1~0.999 7, 0.999 4~0.999 9, 0.999 3~0.999 8, 0.999 4~0.999 9, 0.999 3~0.999 9, 0.999 4~0.999 9; R_{MSE} 范围分别在 0.004 20~0.135 41, 0.002 04~0.007 21, 0.002 91~0.007 54, 0.002 02~0.007 21, 0.002 39~0.007 41, 0.050 79~0.060 90; χ^2 范围分别在 0.000 75~0.188 28, 0.000 30~0.003 38, 0.000 30~0.004 91, 0.000 36~0.002 50, 0.000 39~0.003 54, 0.132 77~0.576 94。其中,因其具有最高的 R^2 (0.999 9),最低的 R_{MSE} (0.002 02) 和最小的 χ^2 (0.000 30), 5 号 Two-term exponential 模型具有最佳拟合度。因此,在控制温度 50~70 ℃,真空度 -70~-95 kPa,微波功率密度 4~12 W/g 范围内,所选用的 6 个模型中 Two-term exponential 模型是描述温度控制条件下猕猴桃片微波真空干燥过程中的水分变化情况的最佳模型,对该模型进行拟合分析。

2.5 干燥动力学模型及其验证

由 2.3 中的结果可知 Two-term exponential 模型中的参数 a 和 k 与干燥控制条件、控制温度和真空度呈一定的线性关系,因此可表示为:

$$a = b + cT + dD, \quad (10)$$

$$k = e + fT + gD, \quad (11)$$

式中:

T ——控制温度, K;

D ——真空度, kPa;

b, c, d, e, f 和 g ——待定系数。

根据各试验中的控制温度和真空度及 Two-term exponential 模型中的 k 和 a 值,基于 SPSS 19.0 软件的线性回归分析,分别求出 Two-term exponential 模型中的 b, c, d, e, f 和 g 等待定系数的值,并代入式 (10) 和式 (11) 中,可得:

$$a = 0.077\ 56 + 9.606\ 00T - 0.003\ 48D, \quad (12)$$

$$k = 1.273\ 60 + 0.001\ 45T + 0.069\ 32D. \quad (13)$$

将式 (12) 和式 (13) 代入到 Two-term exponential 模型方程中,得到猕猴桃片温度控制下微波真空干燥的数学模型为:

$$M_t = a \exp(-k \times t) + (1 - a) \exp(-k \times a \times t) \quad , \quad (14)$$

式中：

$$a = 0.077\ 56 + 9.606\ 00T - 0.003\ 48D \ ;$$
$$k = 1.273\ 60 + 0.001\ 45T + 0.069\ 32D \ .$$

图 8 和图 9 分别是试验条件 I 和 II 下的干燥模型预测值与实测值相关性结果,其实测值与干燥模型预测值的拟合度良好($R^2 > 0.99$)。现有研究发现,多种物料在微波真空干燥条件下,Page 模型和 Modified Page 模型为最合适的模型,如板栗片^[23]、熟化甘薯片^[27]等的微波真

空干燥模型,但由于物料差异、模型种类及温度控制方面的影响,研究所得猕猴桃片的温度控制微波真空干燥最佳模型为 Two-term exponential 模型。

3 结论

以猕猴桃片为研究对象,利用自制的温度自适应微波真空干燥机干燥猕猴桃片,研究不同控制温度、真空度和微波功率密度对其干燥特性和水分有效扩散系数的影响,并计算猕猴桃片的干燥活化能。利用 SPSS 19.0 软件将试验数据与 6 个常用的薄层干燥模型进行非线性拟

表 4 Lewis 和 Page 模型的参数及 R^2 、 R_{MSE} 和 χ^2

Table 4 Drying model parameters and R^2 , R_{MSE} and χ^2 for Lewis and Page models

试验序号	Lewis 模型				Page 模型				
	k	R^2	R_{MSE}	χ^2	k	n	R^2	R_{MSE}	χ^2
1	0.132 605	0.995 6	0.035 29	0.040 53	0.157 853	0.988 43	0.999 8	0.003 30	0.003 38
2	0.191 678	0.991 2	0.047 81	0.051 22	0.265 215	0.941 25	0.999 8	0.003 57	0.000 83
3	0.247 237	0.988 0	0.073 93	0.108 82	0.339 202	0.996 19	0.999 9	0.002 90	0.000 56
4	0.310 728	0.979 3	0.103 68	0.134 70	0.471 672	1.009 06	0.999 8	0.003 62	0.000 54
5	0.378 958	0.967 1	0.135 41	0.188 28	0.651 878	1.032 26	0.999 9	0.002 04	0.000 30
6	0.195 896	0.999 7	0.004 64	0.001 37	0.198 555	0.992 69	0.999 7	0.004 51	0.001 38
7	0.236 648	0.999 7	0.004 20	0.001 40	0.238 605	0.995 05	0.999 7	0.004 20	0.001 40
8	0.337 730	0.999 6	0.005 59	0.002 68	0.345 674	0.982 30	0.999 7	0.004 97	0.003 31
9	0.446 800	0.999 7	0.005 90	0.001 17	0.431 331	1.034 09	0.999 8	0.003 75	0.000 89
10	0.343 202	0.999 6	0.006 31	0.001 09	0.357 823	0.967 95	0.999 7	0.004 29	0.001 24
11	0.340 364	0.999 7	0.005 08	0.000 99	0.348 206	0.982 53	0.999 7	0.004 42	0.001 04
12	0.340 140	0.999 5	0.006 63	0.000 75	0.352 502	0.972 81	0.999 6	0.005 36	0.001 35
13	0.337 193	0.999 6	0.007 43	0.001 42	0.342 823	0.987 45	0.999 4	0.007 21	0.001 84

表 5 Hendsen and Pabis 和 Logaritlunic 模型的参数及 R^2 、 R_{MSE} 和 χ^2

Table 5 Drying model parameters and R^2 , R_{MSE} and χ^2 for Hendsen & Pabis and Logaritlunic models

试验序号	Hendsen and Pabis					Logaritlunic					
	a	k	R^2	R_{MSE}	χ^2	a	k	c	R^2	R_{MSE}	χ^2
1	0.998 597	0.153 88	0.999 8	0.003 69	0.004 91	0.995 681	0.157 53	0.007 02	0.999 9	0.002 02	0.000 91
2	0.981 052	0.236 04	0.999 3	0.007 54	0.004 26	0.976 423	0.243 92	0.009 69	0.999 5	0.006 10	0.001 32
3	0.998 438	0.337 00	0.999 9	0.002 91	0.000 49	0.999 309	0.335 50	−0.001 43	0.999 9	0.002 84	0.000 36
4	1.001 529	0.476 51	0.999 8	0.003 78	0.000 47	1.001 615	0.476 34	−0.000 12	0.999 8	0.003 78	0.000 47
5	1.002 747	0.667 56	0.999 8	0.004 21	0.000 30	1.006 059	0.659 61	−0.004 12	0.999 8	0.003 78	0.000 54
6	0.992 582	0.194 44	0.999 7	0.004 09	0.001 32	0.993 015	0.193 91	−0.000 86	0.999 7	0.004 08	0.001 31
7	0.993 483	0.235 12	0.999 8	0.003 79	0.001 34	0.995 488	0.232 32	−0.003 77	0.999 8	0.003 44	0.000 98
8	0.992 520	0.335 26	0.999 7	0.005 04	0.002 72	0.992 930	0.334 54	−0.000 68	0.999 7	0.005 03	0.002 50
9	1.004 684	0.448 75	0.999 6	0.005 67	0.001 04	1.008 535	0.441 44	−0.005 52	0.999 7	0.005 11	0.001 85
10	0.992 654	0.340 73	0.999 8	0.005 85	0.000 90	0.990 723	0.344 26	0.003 24	0.999 6	0.005 68	0.001 26
11	0.996 795	0.339 29	0.999 7	0.004 98	0.000 94	0.995 428	0.341 74	0.002 28	0.999 7	0.004 87	0.001 16
12	0.991 638	0.337 36	0.999 5	0.006 07	0.000 68	0.991 393	0.337 79	0.000 40	0.999 5	0.006 06	0.000 73
13	0.994 596	0.335 42	0.999 3	0.007 23	0.001 49	0.996 007	0.333 01	−0.002 32	0.999 4	0.007 16	0.001 28

表 6 Two-term exponential 和 Wang and singh 模型的参数及 R^2 、 R_{MSE} 和 χ^2

Table 6 Drying model parameters and R^2 , R_{MSE} and χ^2 for Two-term exponential and Wang & singh models

试验序号	Two-term exponential					Wang and singh				
	a	k	R^2	R_{MSE}	χ^2	a	b	R^2	R_{MSE}	χ^2
1	0.701 760	0.172 24	0.999 9	0.002 67	0.001 82	0.002 557 0	-0.101 50	0.972 6	0.058 74	0.576 94
2	0.049 404	4.629 91	0.999 9	0.002 80	0.001 57	0.005 839 2	-0.154 00	0.966 9	0.066 78	0.548 42
3	0.006 034	5.604 09	0.999 9	0.002 78	0.000 56	0.012 242 1	-0.222 30	0.975 6	0.056 56	0.267 99
4	1.226 580	0.496 89	0.999 8	0.003 70	0.000 55	0.025 880 9	-0.321 55	0.980 1	0.050 79	0.132 77
5	1.369 448	0.737 44	0.999 9	0.002 39	0.000 39	0.046 980 2	-0.436 64	0.979 9	0.052 40	0.167 77
6	0.812 913	0.203 92	0.999 7	0.004 60	0.001 37	0.004 379 6	-0.132 21	0.978 6	0.053 39	0.305 18
7	1.120 568	0.239 81	0.999 8	0.004 26	0.001 12	0.006 140 9	-0.157 18	0.977 6	0.055 11	0.320 89
8	0.737 437	0.367 32	0.999 6	0.005 31	0.003 54	0.012 178 4	-0.221 66	0.973 3	0.059 45	0.279 24
9	1.392 188	0.500 37	0.999 8	0.003 62	0.001 11	0.021 517 7	-0.295 13	0.979 8	0.051 74	0.215 43
10	0.662 163	0.397 95	0.999 6	0.005 21	0.001 70	0.012 386 4	-0.223 77	0.971 9	0.060 90	0.292 74
11	0.714 903	0.376 47	0.999 7	0.004 58	0.001 31	0.012 317 2	-0.223 02	0.972 9	0.059 29	0.277 96
12	0.716 038	0.375 91	0.999 5	0.006 27	0.001 26	0.012 302 9	-0.222 91	0.974 1	0.059 02	0.276 91
13	0.866 680	0.343 87	0.999 3	0.007 43	0.001 48	0.012 228 2	-0.222 15	0.975 9	0.056 76	0.261 56

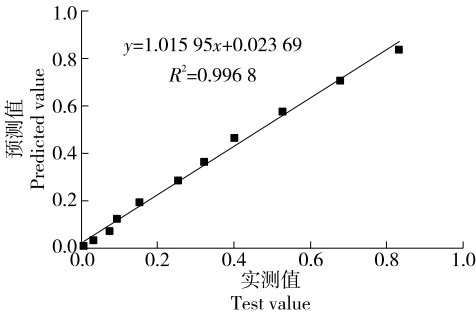


图 9 试验条件 I 下干燥模型预测值与实测值的相关性比较

Figure 9 Correlation between the predicted and experimental value under condition I

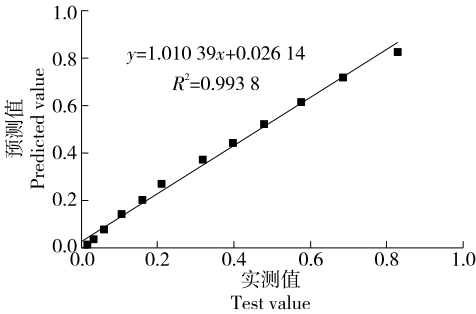


图 1 相同条件下干燥模型预测值与实测值的相关性比较

Figure 10 Correlation between the predicted and experimental value under condition II

合,筛选出最佳干燥模型。试验结果表明:温度控制条件下的猕猴桃片的微波真空干燥为降速干燥过程,无明显

恒速阶段。在试验范围内,控制温度与真空度对猕猴桃片的干燥特性影响显著,控制温度越高、真空度越大,物料的干燥速率越大;根据费克第二定律计算出猕猴桃于温度控制下微波真空干燥过程中的水分有效扩散系数,且随控制温度与真空度的增大而增大,其最大值为 $6.814\ 97 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,其平均活化能为 70.77 kJ/mol 。所选用的 6 个模型中,Two-term exponential 模型具有最大的决定系数(0.999 9),最低的均方根误差(0.002 02)和最小的离差平方和(0.000 30),是猕猴桃片温度控制下微波真空干燥的最佳模型;在所有的干燥试验组中,在控制温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 、真空度为 -85 kPa 、微波功率密度为 8 W/g 时,猕猴桃片的有效水分扩散系数达到最高值 $6.814\ 97 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,其干燥时间最短为 6 min 。

参考文献

[1] CONCHA-MEYER A A, D'IGNOTI V, SAEZ B, et al. Effect of storage on the physico-chemical and antioxidant properties of strawberry and kiwi leathers[J]. Journal of Food Science, 2016, 81 (1/2/3): 569-577.

[2] ORIKASA T, WU L, SHIINA T, et al. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(2): 303-308.

[3] MASKAN M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48 (2): 169-175.

[4] TIAN Y T, WU S Z, ZHAO T T, et al. Drying characteristics and processing parameters for microwave-vacuum drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2015, 39(6): 2 620-2 629.

- [5] 张付杰, 辛立东, 代建武, 等. 猕猴桃片旋转托盘式微波真空干燥特性分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 501-508.
ZHANG Fu-jie, XIN Li-dong, DAI Jian-wu, et al. Rotating tray microwave vacuum drying characteristics of kiwifruit slices[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 501-508.
- [6] 康苗苗, 段续, 黄略略, 等. 猕猴桃片冻干—真空微波联合干燥过程中品质变化及收缩模型[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 140-145, 210.
LIAN Miao-miao, DUAN Xu, HUANG Lue-lue, et al. Quality change and shrinkage model of kiwi during freeze drying and vacuum microwave combined drying[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 140-145, 210.
- [7] JIANG H, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Comparison of drying characteristic and uniformity of banana cubes dried by pulse-spouted microwave vacuum drying, freeze drying and microwave freeze drying[J]. Journal of the Ence of Food & Agriculture, 2014, 94(9): 1 827-1 834.
- [8] 莫愁, 陈霖, 陈懿, 等. 微波干燥恒温控制系统的设计[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 77-79.
MO C, CHEN L, CHEN Y, et al. Microwave drying temperature control system[J]. Food & Machinery, 2011, 27(2): 77-79.
- [9] 陈霖. 基于控温的花生微波干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 267-271.
CHEN L. Microwave drying technology of peanuts based on constant temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(S2): 267-271.
- [10] SONG S J, LIU Y F, ZHAO W Q. Fuzzy control of microwave dryer for drying Chinese jujube[J]. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 2019, 320: 181-190.
- [11] 薛珊, 赵武奇, 高贵田, 等. 苦瓜片气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 743-754.
XUE S, ZHAO Wu-qi, GAO Gui-tian, et al. Drying characteristics and model of bitter melon slice in air-impingement jet dryer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(4): 743-754.
- [12] 朱德泉, 王继先, 钱良存, 等. 猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 248-252.
ZHU De-quan, WANG Ji-xian, QIAN Liang-cun, et al. Optimization of technical parameters of microwave-vacuum drying of Chinese gooseberry slices [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 248-252.
- [13] CLEMENTE G, NEUS S, CÁRCEL J, et al. Influence of temperature, air velocity, and ultrasound application on drying kinetics of grape seeds[J]. Drying Technology, 2014, 32(1): 68-76.
- [14] WANG Z F, SUN J, LILOX J, et al. Mathematical modeling on hot air Drying of thin layer apple pomace[J]. Food Research International, 2007, 40(1): 39-46.
- [15] WHITE G M, ROSS I J, PONELER R. Fully exposed drying of popcorn[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1981, 24: 466-468.
- [16] CHKIR I, BALTI M A, AYEDA L, et al. Effects of air drying properties on drying kinetics and stability of cactus/brewer's grains mixture fermented with lactic acid bacteria[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 10-19.
- [17] BAINI R, LANGRISH T A G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 330-343.
- [18] O'CALLAGHAN J R, MENZIES D J, BAILEY P H. Digital simulation of agricultural dryer performance[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1971, 16(3): 223-244.
- [19] WANG Z, SUN J, CHEN F, et al. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 536-544.
- [20] 张绪坤, 杨祝安, 吴肖望, 等. 基于控温的莲子微波干燥特性及干燥品质研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 40-46.
ZHANG Xu-kun, YANG Zhu-an, WU Xiao-wang, et al. Characteristics and quality of microwave drying lotus seed based on temperature control[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 40-46.
- [21] BÓRQUEZ R, MELO D, SAAVEDRA C. Microwave-vacuum drying of strawberries with automatic temperature control[J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8(2): 266-276.
- [22] 李辉, 林河通, 袁芳, 等. 荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 107-112.
LI Hui, LIN He-tong, YUAN Fang, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of litchi pulp[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 107-112.
- [23] 张乐, 赵守涣, 王赵改, 等. 板栗微波真空干燥特性及干燥工艺研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 206-210.
ZHANG Le, ZHAO Shou-huan, WANG Zhao-gai, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and drying process of Chinese chestnut[J]. Food & Machinery, 2018, 34(4): 206-210.
- [24] 程新峰, 周守标, 杭华, 等. 基于 LF-NMR 的香芋微波真空干燥中水分扩散特性研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(2): 17-23.
CHEN Xin-feng, ZHOU Shou-biao, HANG Hua, et al. Study on water diffusion characteristics of taro slices during microwave vacuum drying based on LF-NMR[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(2): 17-23.
- [25] 赵莹婷, 王为为, 庄玮婧, 等. 莲子微波真空干燥特性及动力学模型的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 111-115.
ZHAO Ying-ting, WANG Wei-wei, ZHUANG Wei-jing, et al. Drying characteristics and kinetics of lotus seeds using microwave vacuum drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(18): 111-115.
- [26] TADPITCHAYANGKOON P, PARK J W, YONGSAWATDIGUL J. Conformational changes and dynamic rheological properties of fish sarcoplasmic proteins treated at various pHs[J]. Food Chemistry, 2010, 121(4): 1 046-1 052.

(下转第 244 页)

技术壁垒现象。实际上,中国食品技术贸易壁垒之所以存在,主要源自如下问题:① 安全质量问题。技术贸易壁垒是保障食品安全的重要机制,中国出口食品整体质量并未达到发达国家层次,而且各国对进口食品的安全质量把控标准也有所不一。比如,不同国家对转基因食品的安全性持有不同态度,中国相关食品生产很难找到一条适合国际普遍要求的发展道路。② 生态环保问题。部分发达国家利用 WTO 中关于环境保护的条款大做文章,突发性地制定环保技术标准和设置绿色技术壁垒让中国食品生产难以及时应对,从而限制了中国食品出口。同时,中国食品贸易市场集中在日本、美国和欧盟等发达国家和地区,这些国家和地区都有着较为先进的食品生产技术,善于设置技术壁垒并且经验丰富,对中国来说这些都是增大食品贸易风险的因素。③ 中国食品产业的自身问题。中国食品国际贸易中,劳动密集型产品占比较大,这部分产品的质量还不够高,难以达到发达国家要求的标准,而且许多产品的包装材料过于简陋,塑料制品应用较为广泛,成为发达国家设置绿色技术壁垒的把柄。此外,在长期的食品生产过程中,中国食品安全质量把控还未能达到发达国家标准,食品安全问题还时有发生,处于贸易舆论不利地位。④ 中国出口食品种类中,竞争性的产品占比较大,特色性的产品占比较小,未能形成中国特色,吸引力不够强大。

在已知技术壁垒对中国食品贸易造成巨大影响的情况下,如何采取应对措施并跨越技术壁垒是中国食品产业需要面对并解决的关键问题。该书从食品安全性、食品技术创新等角度对提升中国食品贸易竞争力作出了探讨,为中国跨越食品贸易技术壁垒提供了一定参考。结合该书相关内容和中国应对技术贸易壁垒的经验,中国可采取以下措施来应对食品技术贸易壁垒。

(1) 在根源上把控中国出口食品的产品安全。随着世界各国对食品安全问题的重视逐渐加强,越来越多的国家将食品安全问题作为设置技术壁垒的原因。为此,中国必须要充分重视食品安全问题,在根源上把控出口食品的质量。首先,食品出口企业必须以标准化生产技术进行食品制造,确保生产流程的每一流程都可追溯,严格把控生产质量。生产企业也可通过对生产基地的建设和系统管理,促进标准生产模式的生成,从根本上提升食品的生产质量。其次,中国相关部门和食品出口企业需要全力合作,充分考察国际食品安全相关标准,并了解国际食品安全指标演进趋势,有步骤、有计划地增强中国出口食品质量,跨越因食品安全而设置的技术贸易壁垒。

(2) 增强对环保食品产业的推广。根据近年来的食品贸易形势,增强中国食品产业的生态性和出口产品的环保性是必然趋势。中国食品出口企业需逐步改进传统的劳动力密集型生产模式,逐步实现现代化食品生产,充分实现生产过程的生态性。在产品生产过程中,食品出

口企业也需尽量减少塑料制品的使用,善于利用环保材质作为食品包装材料。当下,中国的绿色食品生产基地越来越多,食品生产过程和出口产品都更为注重对自然生态的保护,这对于跨越由生态问题而设置食品技术贸易壁垒来说具有重要作用。

(3) 逐步调整和完善中国食品出口结构和贸易结构。首先,中国需改变出口食品中竞争性产品占比过大的问题,多开发生产进出口特色产品。食品出口企业可通过对产品的深加工来开发特色产品,利用深加工提升产品的技术含量和附加值,使出口食品的国际竞争力得到提升。其次,中国要积极扩展食品贸易市场。中国食品出口的主要市场和地区在于日、美和欧盟国家和地区,因此,中国需要与这些国家和地区的权威食品认证机构进行交流沟通,以获得认证,把握住原有的食品出口市场。在此基础上,中国食品出口企业还应积极制定产品召回制度,利用产品召回制度拓宽绿色食品的出口贸易市场。

(4) 积极与贸易各国达成友好交流。中国需要与其他发展中国家保持友好联系,这样可以增强第三世界国家的相对力量,从而对自己的合法权益进行有效维护,也为应对发达国家的技术贸易壁垒提供支持。此外,中国也需积极与发达国家进行技术交流,通过技术交流促进中国食品生产技术和食品安全监测技术,并在此基础上通过努力达到世界食品制造的尖端水平,进而打破食品贸易的技术壁垒。

综上,中国需重视食品贸易中的技术壁垒现象,同时采取一系列措施削弱技术壁垒带来的影响,努力提升食品生产质量和出口的技术水平,跨越发达国家设置的技术壁垒。《食品国际贸易》一书融合了多个学科研究的基本特点,系统探讨了食品国际贸易中的问题,为中国进一步发展食品贸易提供了一定的指导。

(作者:郭晓丽,女,郑州工业应用技术学院副教授,硕士)

(上接第 132 页)

- [27] 宋树杰, 张舒晴, 姚谦卓, 等. 熟化甘薯片微波干燥特性及其动力学模型[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(10): 857-863.
- SONG Shu-jie, ZHANG Shu-qing, YAO Qian-zhuo, et al. Microwave vacuum drying characteristics and kinetic model of cooked sweet potato chips[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(10): 857-863.
- [28] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 基于 Weibull 分布函数猕猴桃切片微波真空干燥过程模拟及应用[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 134-140.
- ZENG Mu-cheng, BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, et al. Weibull distribution for modelling microwave vacuum drying of kiwifruit slices and its application[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(6): 134-140.