

## 预处理对赛买提杏片热风干燥特性和水分迁移的影响

陈 恺<sup>1</sup>, 承春平<sup>1</sup>, 王雪妃<sup>1</sup>, 杜雨桐<sup>1</sup>, 许铭强<sup>2\*</sup>, 李焕荣<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>新疆农业大学食品科学与药学学院 乌鲁木齐 830052

<sup>2</sup>新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所 乌鲁木齐 830091)

**摘要** 为研究不同预处理对赛买提杏片热风干燥特性及水分迁移规律的影响,以切分去核的赛买提杏片为原料,在消除酶促褐变的基础上,经 4 种预处理(热水漂烫、蒸汽漂烫、微波处理及硫处理),探究 3 个温度(40,50,60 °C)下的干燥特性、水分有效扩散系数及活化能,并建立干燥动力学模型,研究模型参数与干燥温度间的关系。结合低场核磁共振(LF-NMR)和成像技术(MRI),通过横向弛豫时间和成像伪彩图的变化阐明干燥过程中杏片内部水分迁移规律。结果表明:与 40 °C 相比,经 4 种预处理的杏片干燥耗时分别缩短 41.67%,36.36%,53.85%,50.00%。 $D_{eff}$  随着温度的升高而增大,主要在  $5.9637 \times 10^{-7} \sim 1.3530 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  范围。基于干燥动力学进行模型拟合,漂烫及微波等热处理的最适模型均为 Wang and Singh 模型, $R^2$  分别为 0.9929,0.9955,0.9942,而非热预处理的硫处理最适模型为 Page 模型( $R^2 = 0.9967$ )。LF-NMR 试验表明干燥前期主要由表面汽化为主,杏片中自由水最先被脱除,干燥后期由内部扩散控制,部分自由水转化为不易流动水和结合水,水分扩散速率降低。护色预处理结合热风干燥对杏片干燥特性及水分迁移均有一定影响。方差分析显示,4 种护色处理方式在各温度干燥时  $D_{eff}$  无显著差异( $P > 0.05$ ),干燥温度对干燥过程中的水分扩散起决定性作用。结合低场核磁共振技术可知,微波和硫处理组杏片至干燥结束,在干燥温度 50 °C 和 60 °C,干燥时间相较于漂烫处理组可缩短 4 h。

**关键词** 赛买提杏片; 漂烫; 硫处理; 微波处理; 模型验证; 低场核磁

文章编号 1009-7848(2024)08-0311-14 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.08.030

赛买提杏营养价值较高,是优良的干鲜兼用品种<sup>[1]</sup>。受地域性、季节性和杏自身生理特性的影响,在原料产地极易腐烂变质,从而失去商品价值,因此研究杏干制技术对特色林果产地初加工具有至关重要的意义<sup>[2]</sup>。传统杏干制技术以添加亚硫酸盐为预处理方式,结合自然晾晒,该方法周期长、效率低,且安全性得不到保障。与之相比,热风干燥具有操作简单,不受天气、气候等自然因素的控制,适合规模化生产,尤其新疆得天独厚的光热资源,热风干燥技术以其节能优势被广泛应用于杏产地初加工。

目前,市场上的杏干产品以 2 种形式存在:一种为带核杏干,另一种为去核杏干(杏片)。杏制干主要存在 2 方面的问题:一是加工过程中极易引起褐变,干燥前护色灭酶处理能够有效抑制酶

促褐变<sup>[3-7]</sup>,而大多数研究仅处于实验室阶段,不适用工业生产。靳力为等<sup>[5]</sup>将超声作为微波冷冻干燥杏片的预处理。Deng 等<sup>[6]</sup>利用高湿热冲击漂烫(High-humidity hot air impingement blanching, HHAIB)技术辅助提高杏干燥效率及品质。二是预处理方式和干燥技术同时影响干燥速率和干燥过程中水分变化及迁移规律。近年来,干燥数学模型与低场核磁共振技术在果蔬加工中逐步得到应用,宏观上可运用数学模型预测水分变化<sup>[8-9]</sup>,而 LF-NMR 及 MRI 技术从微观角度上观察内部水分迁移规律和空间分布,依靠弛豫时间变化分析水分分子迁移变化的规律,在果蔬中主要应用于胡萝卜、月柿、猕猴桃、海鲜菇等<sup>[10-13]</sup>。

水分含量是影响杏干品质的重要指标,鲜杏去核/不去核、护色处理以及干燥技术等对杏干燥特性有不同的影响,而预处理结合热风干燥对杏干燥特性及干燥过程中水分迁移规律鲜有报道。本文以切分去核的赛买提鲜杏片为原料,在消除酶促褐变的基础上,研究不同预处理(热水漂烫、蒸汽漂烫、微波处理及硫处理)结合不同热风温度(40,50,60 °C)对杏片干燥特性、水分有效扩散系

收稿日期: 2023-08-19

基金项目: 2020 年中央财政林草科技推广示范项目([新 2020JTG19 号]); 国家重点研发计划项目(2019 YFD1002303-2)

第一作者: 陈恺,男,硕士,正高级实验师

通信作者: 许铭强 E-mail: xmq2046@hotmail.com

数和能耗的影响,优选描述杏片热风干燥的最佳模型,探究杏片内部水分迁移规律,为热风干燥过程的水分控制、预测以及制干工艺的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

赛买提杏产自新疆喀什地区,可溶性固形物含量为24%,初始含水量为(83.75±0.21)%。

亚硫酸氢钠,分析纯级,天津市福晨化学试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

DHG-9140A 电热鼓风干燥箱,上海一恒科技有限公司;AL 204 电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;G70F23CN2P-BM1(SO)微波炉,广东格兰仕集团有限公司。

### 1.3 操作要点

1.3.1 原料 人工挑选大小均匀、无机械损伤的赛买提杏,沿杏果赤道面对半切分(厚度约为10 mm)、去核,备用。

1.3.2 护色预处理 在前期预试验的基础上,以多酚氧化酶失活率>90%为评价指标<sup>[14]</sup>,确定4种护色预处理的最佳条件分别为:热水漂烫(100℃、90 s);蒸汽漂烫(100℃、90 s);微波处理中功率为50%(约350 W)、时间5 min;硫处理(质量浓度2 g/L,时间2 h,在此条件下SO<sub>2</sub>残留量为0.08 g/kg)。

漂烫处理:取对半切分去核的赛买提鲜杏片10 kg,按料水比为0.55:1分别进行热水和蒸汽漂烫试验,待其完成后迅速用冷水冷却并沥干待用。

微波处理:取对半切分去核的赛买提鲜杏片5 kg,每次称取0.55 kg平铺于微波炉中开展试验,待其完成后,冷却待用。

硫处理:取对半切分去核的赛买提鲜杏片5 kg,按 $m_{\text{杏}}:V_{\text{亚硫酸盐溶液}}=0.55:1$ 的比例进行浸硫处理,待其灭酶完成后,捞出、沥干待用。

1.3.3 干燥试验 热风温度分别设定为40,50,60℃,风速为0.9 m/s,干燥前烘箱预热,将杏片果皮面朝下平铺干燥箱内,干燥过程中间隔4 h取样,含水量≤21%(以湿基计)结束干燥。

1.3.4 低场核磁共振试验 用FID序列获得样品

中心频率,再利用CPMG脉冲序列[其中测量温度(30±0.05)℃]测定样品 $T_2$ ,设置参数如表1所示,最终得到干燥过程中 $T_2$ 图谱。

1.3.5 低场核磁成像试验 采用多层自旋回波(SE)序列对杏片样品进行核磁共振成像试验,设置参数如表2所示。

表1 应用脉冲序列参数

参数名称	参数	数值
主频	SF	18 MHz
偏移频率	O1	600 964.45 kHz
90°脉冲时间	P1	12 μs
180°脉冲时间	P2	26 μs
采样点数	TD	565 556
重复时间	TW	2 000 ms
累加次数	NS	4 次
回波时间	TE	0.377 ms
回波数	NECH	15 000

表2 多层自旋回波序列参数

参数名称	参数	数值
中心频率	SF01	23.16
层数	Slices	3
层宽	Slice Width	3.0
层间隙	Slice Gap	1.0
回波时间	TE	20 ms
重复等待时间	TR	500 ms
模拟增益	RG	20.0
累加次数	Averages	4.0
频率编码步数	Read Size	256
相位编码步数	Phase Size	192

### 1.4 指标计算

1.4.1 水分含量的测定 根据《食品中水分的测定》(GB T 5009.3-2016)中的第一法<sup>[15]</sup>测定水分含量。

1.4.2 水分比的测定

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中:MR为水分比; $M$ 为干燥 $t$ 时刻物料干基含水率,g/g; $M_e$ 为平衡含水率,g/g; $M_0$ 为初始干基含水率,g/g。

由于干燥过程中温度较高,  $M_e$  相较于  $M_0$  (0.84 g/g) 和  $M$  而言较小, 故忽略不计<sup>[16-17]</sup>, 因此可简化为(2)。

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

#### 1.4.3 干燥速率的测定

$$DR[g/(g \cdot h)] = \frac{X_t - X_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: DR 为干燥速率,  $g/(g \cdot h)$ ;  $X_t$  为  $t$  时刻的干基含水率,  $g/g$ ;  $X_{t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻的干基含水率,  $g/g$ ;  $\Delta t$  为失去水分所需的时间,  $h$ 。

1.4.4 有效水分扩散系数、活化能的测定 基于 Fick 第二扩散定律, 计算  $D_{eff}$  和  $E_a$  可间接评价干燥方式的优劣, 反映水分迁移的快慢及能耗损失情况<sup>[18]</sup>。通过绘制(4)式中  $\ln MR-t$  之间的曲线, 拟合后由直线的斜率计算出  $D_{eff}$ 。通过绘制(5)式中

$\ln D_{eff}-1/T$  的曲线, 拟合后由直线的斜率计算出  $E_a$ 。

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (4)$$

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

式中:  $D_{eff}$  为有效水分扩散系数,  $m^2/s$ ;  $L$  为样品厚度的一半,  $m$ ;  $D_0$  为 Arrhenius 方程指数前因子,  $m^2/s$ ;  $E_a$  为活化能,  $kJ/mol$ ;  $R$  为气体常数,  $8.314 J/(mol \cdot K)$ ;  $T$  为绝对温度,  $K$ 。

#### 1.5 常用干燥模型筛选

表 3 为 4 种常见的干燥模型, 模型拟合程度可通过相关系数  $R^2$ 、卡方  $\chi^2$ 、均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 进行评价, 其中  $R^2$  越大、 $\chi^2$  和 RMSE 越小, 拟合程度越好, 所选的数学模型越能代表实际干燥过程。

表 3 常用的干燥数学模型<sup>[19-22]</sup>

Table 3 Common drying mathematical models<sup>[19-22]</sup>

序号	模型名称	模型表达式	线性表达式
1	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$\ln(-\ln MR) = \ln k + n \ln t$
2	Wang and Singh	$MR = a + bt + ct^2$	$MR = a + bt + ct^2$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$-\ln MR = -\ln a + kt$
4	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$\ln(-\ln MR) = n \ln k + n \ln t$

注:  $k$  为干燥常数,  $a, b, c, n$  为待定常数,  $t$  为干燥时间 ( $h$ )。

#### 1.6 数据处理与分析

试验数据均为 3 次重复测定的平均值, 采用 Excel 2010 汇总整理, 用 Origin Pro 2019b 进行线性、非线性回归拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 杏片干燥速率曲线

图 1 为 4 种预处理结合不同热风温度的杏片干燥速率曲线。由图 1 可知, 杏片的干基含水量随干燥时间的延长呈缓慢降低的趋势, 干燥速率整体呈现先升速后降速的现象, 整个干燥过程无明显恒速干燥阶段。就预处理而言, 蒸汽漂烫和微波处理的杏片干燥速率变化趋势较为相似, 而热水漂烫和硫处理杏片的干燥速率曲线呈现锯齿状变化, 尤其是在  $40^\circ C$  和  $50^\circ C$  的干燥温度时较为明显, 这可能是热水漂烫和硫处理均为杏片浸没在溶液中, 杏片组织结构破坏的同时, 外源水分大量

附着在果肉组织, 导致干燥过程中果肉内部水分扩散阻力增大<sup>[23]</sup>。

干燥温度为  $60^\circ C$  时, 4 种预处理的干燥速率均出现在第 8 小时, 其中微波预处理杏片干燥速率最大为  $0.51 g/(g \cdot h)$ , 是干燥温度  $40^\circ C$  的 2.22 倍。随着干燥的持续进行, 内部水分扩散阻力远大于表面汽化, 干燥速率转由内部水分扩散为主。干燥温度越高, 杏表面易出现由高温所致的硬化现象阻碍水分散失<sup>[24]</sup>, 致使干燥速率在干燥后期下降缓慢。

### 2.2 水分有效扩散系数

干燥过程水分逐渐从物料内部向外扩散, 扩散速率可表示为水分有效扩散速率, 反映内部水分迁移快慢<sup>[25]</sup>。由表 4 可知, 经 4 种预处理的杏片在不同温度下的  $D_{eff}$  范围为  $5.9637 \times 10^{-7} \sim 1.3530 \times 10^{-6} m^2/s$ 。同一预处理下,  $D_{eff}$  随热风温度的升高而增大, 说明温度越高, 水分向外扩散速率越快; 同

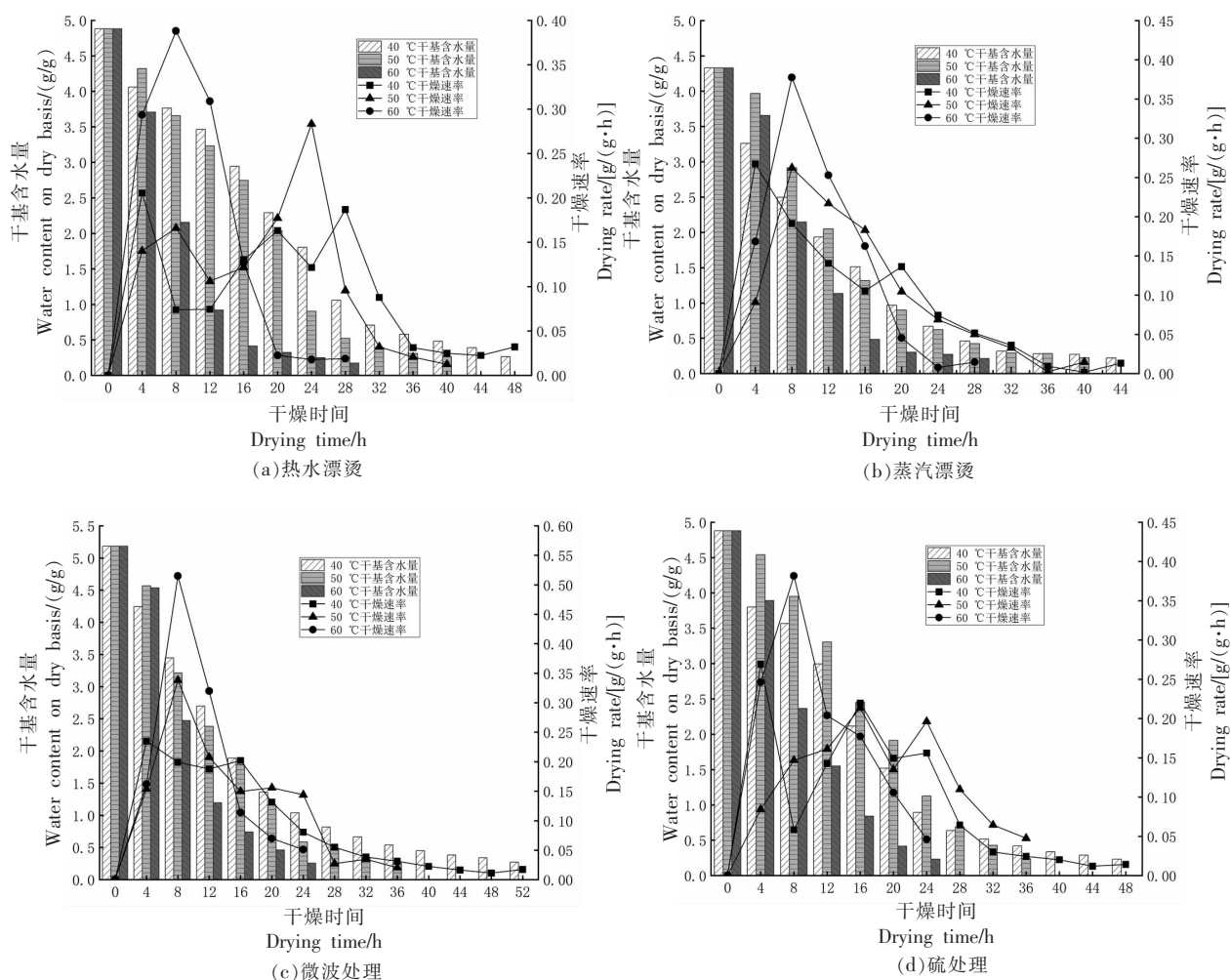


图1 不同热风温度下杏片的干燥速率曲线

Fig.1 Drying rate curve of cut apricot under different hot air temperatures

一热风温度下,各预处理结合干燥温度的  $D_{eff}$  没有形成统一规律,其中干燥温度为 40 °C 时,硫处理和蒸汽漂烫  $D_{eff}$  均达到  $7.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  以上,而温度为 60 °C 时  $D_{eff}$  除蒸汽漂烫外,其余预处理数值变化不大。经方差分析可知,4 种护色处理方式在各温度干燥时  $D_{eff}$  无显著差异 ( $P > 0.05$ ),说明经 4 种护色预处理后,干燥温度对干燥过程中的水分扩散起决定性作用。

### 2.3 活化能

活化能表示物料在干燥过程中脱除单位水分所需要启动的能量,间接反映物料干燥的难易程度。按照式(5),将  $\ln D_{eff} - 1/T$  进行线性拟合,根据斜率  $A = -E_a/R$  计算  $E_a$ ,如图 2 所示。经计算得出  $E_a$  分别为 24.96 kJ/mol (热水漂烫)、17.56 kJ/mol

(蒸汽漂烫)、27.87 kJ/mol (微波处理)、20.08 kJ/mol (硫处理),平均  $E_a$  为 22.62 kJ/mol,说明干燥过程中去除 1 mol 水分需要的平均能量最少需要 22.62 kJ,常见的食品物料在干制过程中活化能在 15~50 kJ/mol 范围内<sup>[26]</sup>。4 种预处理中微波处理的活化能最高,这可能是因为微波破坏了杏片组织和细胞的完整性,重组了营养理化成分的分布区域,从而增大水分子与其它大分子的结合机会,并且微波处理可减少固形物损失,以至于干燥时所需的能量较大。

### 2.4 杏片干燥模型

2.4.1 干燥模型的确定 基于 Origin 数学分析软件,对 4 种常见数学干燥模型与实际水分比进行拟合,结果见表 5。



表 4 不同温度下杏片的有效水分扩散系数

Table 4 Effective water diffusivity of apricot at different temperatures

预处理	干燥温度/℃	线性拟合方程	决定系数( $R^2$ )	水分扩散系数( $D_{eff}$ )
热水漂烫	40	$\ln MR = -0.0638x + 0.2693$	0.9686	$6.4709 \times 10^{-7}$
	50	$\ln MR = -0.0841t + 0.3120$	0.9512	$8.5298 \times 10^{-7}$
	60	$\ln MR = -0.1326t - 0.0814$	0.9670	$1.3449 \times 10^{-6}$
蒸汽漂烫	40	$\ln MR = -0.0726x + 0.0013$	0.9807	$7.3634 \times 10^{-7}$
	50	$\ln MR = -0.0841x + 0.0146$	0.9875	$8.5298 \times 10^{-7}$
	60	$\ln MR = -0.1216x + 0.0959$	0.9613	$1.2333 \times 10^{-6}$
微波处理	40	$\ln MR = -0.0588x - 0.0488$	0.9873	$5.9637 \times 10^{-7}$
	50	$\ln MR = -0.0904x + 0.1840$	0.9869	$9.1687 \times 10^{-7}$
	60	$\ln MR = -0.1327x + 0.1874$	0.9883	$1.3459 \times 10^{-6}$
硫处理	40	$\ln MR = -0.074x + 0.0444$	0.9839	$7.5054 \times 10^{-7}$
	50	$\ln MR = -0.0895x + 0.4431$	0.9500	$9.0775 \times 10^{-7}$
	60	$\ln MR = -0.1334x + 0.1808$	0.9877	$1.3530 \times 10^{-6}$

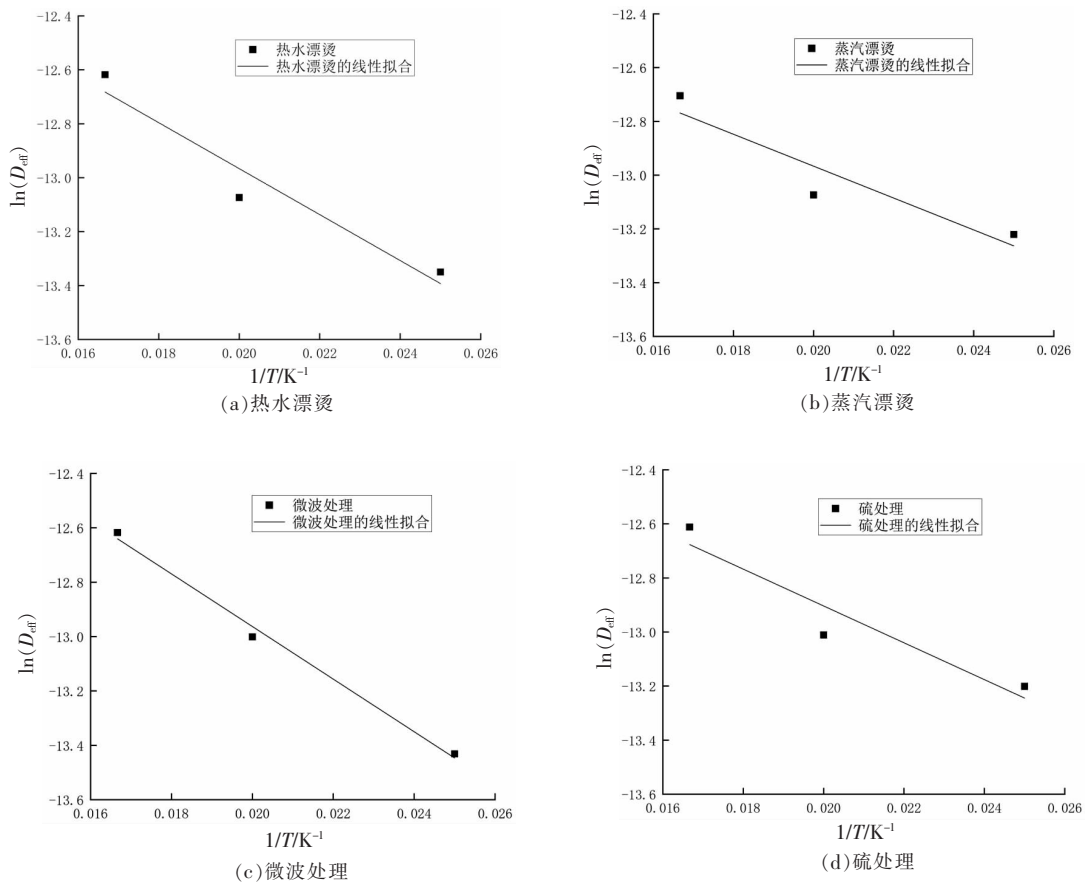


图 2 有效扩散系数与温度的线性拟合关系

Fig.2 Linear fitting relationship between effective diffusion coefficient and temperature

表5 4种干燥模型的拟合结果  
Table 5 Fitting results of four drying models

模型名称	预处理	温度/ ℃	线性关系	模型参数	$R^2$	$\chi^2$	RMSE	
Page	热水漂烫	40	$y=1.2447x-3.832$	$n=1.2447 k=0.0217$	0.9505	0.0033	0.0528	
		50	$y=1.4860x-4.3621$	$n=1.4860 k=0.0128$	0.9700	0.0037	0.0545	
		60	$y=1.1968x-2.6227$	$n=1.1968 k=0.0726$	0.9717	0.0018	0.0355	
	蒸汽漂烫	40	$y=1.0335x-2.724$	$n=1.0335 k=0.0656$	0.9914	0.0004	0.0175	
		50	$y=1.4975x-4.1819$	$n=1.4975 k=0.0153$	0.9708	0.0020	0.0401	
		60	$y=1.4994x-3.612$	$n=1.4994 k=0.0270$	0.9584	0.0028	0.0448	
	微波处理	40	$y=1.0710x-3.0408$	$n=1.0710 k=0.0478$	0.9900	0.0006	0.0224	
		50	$y=1.4237x-3.8697$	$n=1.4237 k=0.0209$	0.9880	0.0007	0.0236	
		60	$y=1.7041x-4.1109$	$n=1.7041 k=0.0164$	0.9603	0.0047	0.0562	
	硫处理	40	$y=1.1559x-3.2959$	$n=1.1559 k=0.0370$	0.9626	0.0023	0.0434	
		50	$y=1.7209x-5.1147$	$n=1.7209 k=0.0060$	0.9967	0.0004	0.0182	
		60	$y=1.4410x-3.4273$	$n=1.4410 k=0.0325$	0.9963	0.0004	0.0161	
	Wang and Singh	热水漂烫	40	$y=0.0003x^2-0.0345x+1.0187$	$a=1.0187 b=-0.0345 c=0.0003$	0.9830	0.0025	0.0436
			50	$y=0.0004x^2-0.0412x+1.0466$	$a=1.0466 b=-0.0412 c=0.0004$	0.9747	0.0045	0.0571
			60	$y=0.0019x^2-0.0868x+1.0034$	$a=1.0034 b=-0.0868 c=0.0019$	0.9929	0.0016	0.0317
		蒸汽漂烫	40	$y=0.0007x^2-0.0499x+0.9616$	$a=0.9616 b=-0.0499 c=0.0007$	0.9955	0.0300	0.1500
			50	$y=0.0008x^2-0.0579x+1.057$	$a=1.0570 b=-0.0579 c=0.0008$	0.9895	0.0023	0.0413
			60	$y=0.0017x^2-0.0845x+1.0568$	$a=1.0568 b=-0.0845 c=0.0017$	0.9837	0.0037	0.0481
微波处理		40	$y=0.0005x^2-0.0441x+0.9777$	$a=0.9777 b=-0.0441 c=0.0005$	0.9915	0.0021	0.0410	
		50	$y=0.0008x^2-0.0571x+1.0362$	$a=1.0362 b=-0.0571 c=0.0008$	0.9942	0.0013	0.0298	
		60	$y=0.0018x^2-0.0865x+1.0656$	$a=1.0656 b=-0.0865 c=0.0018$	0.9729	0.0063	0.0600	
硫处理		40	$y=0.0005x^2-0.0447x+1.0074$	$a=1.0074 b=-0.0447 c=0.0005$	0.9884	0.0021	0.0402	
		50	$y=0.0003x^2-0.0383x+1.0562$	$a=1.0562 b=-0.0383 c=0.0003$	0.9878	0.0032	0.0475	
		60	$y=0.0015x^2-0.0766x+1.0262$	$a=1.0262 b=-0.0766 c=0.0015$	0.9947	0.0011	0.0254	
Henderson and Pabis		热水漂烫	40	$y=0.0638x-0.2693$	$k=0.0638 a=1.3090$	0.9686	0.0160	0.1163
			50	$y=0.0834x-0.3571$	$k=0.0834 a=1.4292$	0.9471	0.0311	0.1596
			60	$y=0.1278x+0.0022$	$k=0.1278 a=0.9978$	0.9679	0.0031	0.0479
		蒸汽漂烫	40	$y=0.0728x+0.0131$	$k=0.0728 a=0.9870$	0.9808	0.0006	0.0215
			50	$y=0.0822x-0.1308$	$k=0.0822 a=1.1397$	0.9849	0.0043	0.0594
			60	$y=0.1216x-0.0959$	$k=0.1216 a=1.1006$	0.9613	0.0079	0.0771
	微波处理	40	$y=0.0588x+0.0488$	$k=0.0588 a=0.9524$	0.9873	0.0014	0.0351	
		50	$y=0.0901x-0.1974$	$k=0.0901 a=1.2182$	0.9861	0.0070	0.0749	
		60	$y=0.1322x-0.1983$	$k=0.1322 a=1.2193$	0.9872	0.0152	0.1041	
	硫处理	40	$y=0.0688x-0.1128$	$k=0.0688 a=1.1194$	0.9817	0.0045	0.0614	
		50	$y=0.0847x-0.4075$	$k=0.0847 a=1.5031$	0.9394	0.0402	0.1793	
		60	$y=0.1308x-0.232$	$k=0.1308 a=1.2611$	0.9822	0.0152	0.1042	
	Modified Page	热水漂烫	40	$y=1.2447x-3.832$	$n=1.2447 k=0.0460$	0.9505	0.0033	0.0528
			50	$y=1.486x-4.3621$	$n=1.4860 k=0.0531$	0.9700	0.0037	0.0545
			60	$y=1.1968x-2.6227$	$n=1.1968 k=0.1118$	0.9717	0.0018	0.0355
		蒸汽漂烫	40	$y=1.0335x-2.724$	$n=1.0335 k=0.0717$	0.9914	0.0004	0.0175
			50	$y=1.4975x-4.1819$	$n=1.4975 k=0.0613$	0.9708	0.0020	0.0401
			60	$y=1.4994x-3.612$	$n=1.4994 k=0.0899$	0.9584	0.0028	0.0448

(续表 5)

模型名称	预处理	温度/ °C	线性关系	模型参数	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
微波处理		40	$y=1.071x-3.0408$	$n=1.0710 \quad k=0.0585$	0.9900	0.0006	0.0224
		50	$y=1.4237x-3.8697$	$n=1.4237 \quad k=0.0660$	0.9880	0.0007	0.0236
		60	$y=1.7041x-4.1109$	$n=1.7041 \quad k=0.0896$	0.9603	0.0047	0.0562
硫处理		40	$y=1.1559x-3.2959$	$n=1.1559 \quad k=0.0578$	0.9626	0.0023	0.0434
		50	$y=1.7209x-5.1147$	$n=1.7209 \quad k=0.0512$	0.9967	0.0004	0.0182
		60	$y=1.441x-3.4273$	$n=1.4410 \quad k=0.0927$	0.9963	0.0004	0.0161

由表 5 可知, 在 4 种模型中,  $R^2$ 、 $\chi^2$ 、RMSE 的变化范围分别为 0.9500~0.9985, 0.0002~0.0474, 0.0105~0.1948, 拟合效果差异较大, 因此选取 4 种

模型在不同温度下模型参数的平均值作为评价拟合效果的指标, 结果见表 6。

表 6 4 种干燥数学模型的拟合效果评价结果

Table 6 Fitting effect evaluation results of four thin layer drying mathematical models

预处理	模型序号	$\bar{R}^2$	$\bar{\chi}^2$	$\overline{\text{RMSE}}$
热水漂烫	1	0.9641	0.0029	0.0476
	2	0.9835	0.0029	0.0441
	3	0.9612	0.0167	0.1079
	4	0.9641	0.0029	0.0476
蒸汽漂烫	1	0.9735	0.0017	0.0341
	2	0.9896	0.0120	0.0798
	3	0.9757	0.0043	0.0527
	4	0.9735	0.0017	0.0341
微波处理	1	0.9794	0.0020	0.0341
	2	0.9862	0.0032	0.0436
	3	0.9869	0.0079	0.0713
	4	0.9794	0.0020	0.0341
硫处理	1	0.9852	0.0010	0.0259
	2	0.9903	0.0021	0.0377
	3	0.9678	0.0199	0.1150
	4	0.9852	0.0010	0.0259

注: 1 为 Page 模型, 2 为 Wang and Singh 模型, 3 为 Henderson and Pabis 模型, 4 为 Modified Page 模型。

由表 6 可知, 不同预处理下, 4 种模型的  $\bar{R}^2$ 、 $\chi^2$  和  $\overline{\text{RMSE}}$  的变化范围分别为 0.9612~0.9903, 0.0010~0.0199, 0.0259~0.1150, 与  $R^2$ 、 $\chi^2$ 、RMSE 相比变化较小, 作为评价模型拟合程度较为合适。由各模型的  $\bar{R}^2$  值可知, Wang and Singh 模型适用于热水漂烫、蒸汽漂烫和微波等处理, 而 Page 模型适用于硫处理。

2.4.2 最佳模型待定常数的确定 根据在不同预处理和干燥温度的干燥特性作  $\text{MR}-t$ 、 $\ln(-\ln\text{MR})-\ln t$  的线性关系。由表 5 可知模型常数随温度的变

化而改变, 因此通过多元线性方程组求解最佳模型下的待定常数。

1) 漂烫和微波处理最佳模型的求解 由 2.4.1 节可知, 热水、蒸汽漂烫及微波处理条件均选取 Wang and Singh 模型为最佳模型, 其模型表达式为  $\text{MR}=a+bt+ct^2$ , 以时间为自变量, 水分比为因变量。

$$\text{令 } a = a_0 + a_1T + a_2T^2 \tag{6}$$

$$b = b_0 + b_1T + b_2T^2 \tag{7}$$

$$c = c_0 + c_1T + c_2T^2 \tag{8}$$

式中:  $T$  为干燥温度, °C;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $c_0$ 、

$c_1, c_2$  均为待定系数。

将通过模型预测出的不同干燥温度的  $a, b, c$  值带入式(6)、(7)、(8)中得到三元二次方程组,对其求解得到杏片在不同温度的动力学模型表达式分别为:

热水漂烫处理:  $MR = (0.1961 + 0.034785T - 3.555 \times 10^{-4}T^2) + (-0.5307 + 0.022865T - 2.615 \times 10^{-4}T^2)t + (0.0139 - 6.2 \times 10^{-4}T + 7 \times 10^{-6}T^2)t^2$

蒸汽漂烫处理:  $MR = (-0.376 + 0.05256T - 4.78 \times 10^{-4}T^2) + (-0.2039 + 7.57 \times 10^{-3}T - 9.3 \times 10^{-5}T^2)t + (8.3 \times 10^{-3} - 3.5 \times 10^{-3}T + 4 \times 10^{-6}T^2)t^2$

微波处理:  $MR = (0.4527 + 0.018945T - 1.455 \times 10^{-4}T^2) + (-0.1561 + 6.08 \times 10^{-3}T - 8.2 \times 10^{-5}T^2)t + (6.3 \times 10^{-3} - 2.85 \times 10^{-4}T + 3.5 \times 10^{-6}T^2)t^2$

2) 硫处理最佳模型的求解 经过硫处理杏片的最佳模型为 Page 模型,其线性表达式为  $\ln(-\ln MR) = \ln k + n \ln t$ ,以  $\ln t$  作为自变量,  $\ln(-\ln MR)$  为因变量来计算。

令  $k = a_0 + a_1T + a_2T^2$  (9)

$n = b_0 + b_1T + b_2T^2$  (10)

式中:  $T$  为干燥时间, h;  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  均为待定系数。

将通过模型预测出的不同干燥温度下  $k, n$  值带入到式(9)、(10)中,得到三元二次方程组对其求解:

$k = 0.736 - 0.028975T + 2.875 \times 10^{-4}T^2$

$n = 7.3449 - 0.323705T + 4.2245 \times 10^{-3}T^2$

则得到硫处理杏片在不同温度的动力学模型表达式为:

$MR = \exp [-(0.736 - 0.028975T + 2.875 \times 10^{-4}T^2)t^{(7.3449 - 0.323705T + 4.2245 \times 10^{-3}T^2)}]$

2.4.3 最佳模型的验证 由图 3 可知,水分比预测值与实际值经拟合验证后  $R^2$  分别为 0.9929(热水漂烫)、0.9955(蒸汽漂烫)、0.9942(微波处理)、0.9967(硫处理),均大于 0.99,说明所选模型拟合度较好。

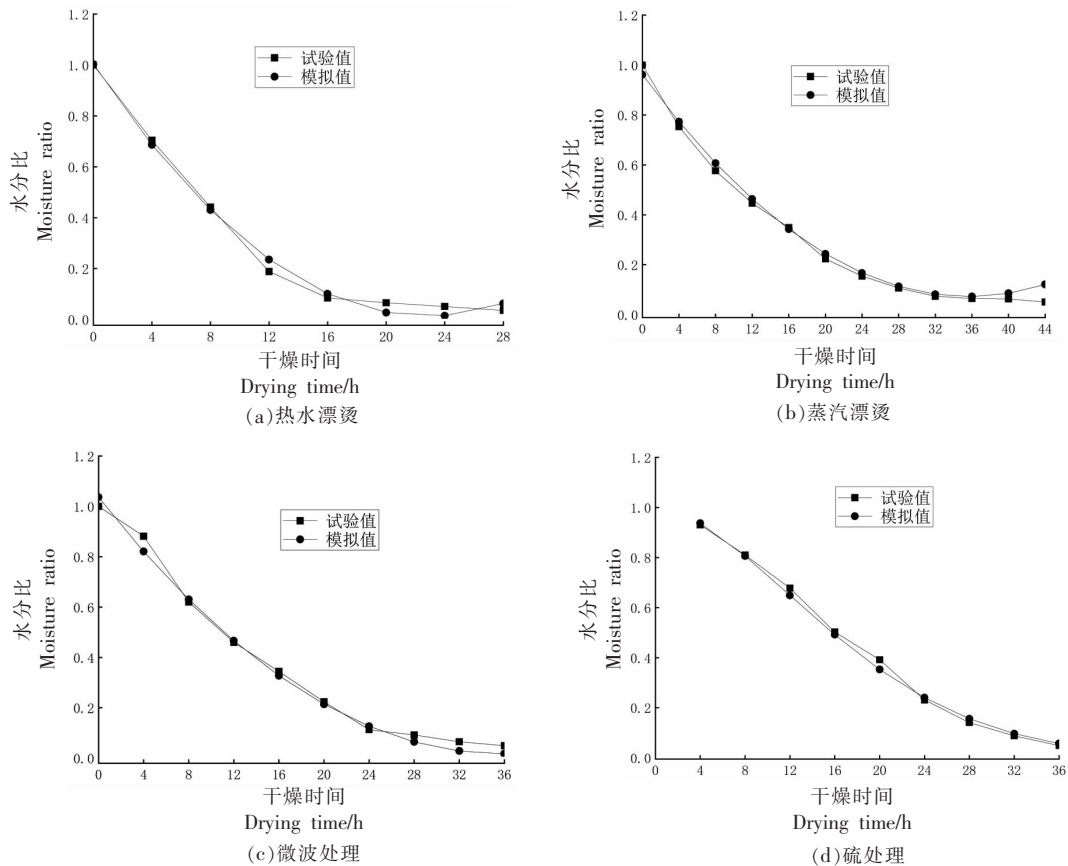


图 3 不同预处理下杏片热风干燥模型验证

Fig.3 Verification of hot air drying model of sliced apricot under different pretreatment



## 2.5 干燥温度对杏片干燥过程中水分迁移规律的影响

**2.5.1 新鲜赛买提杏片  $T_2$  反演图谱** 图 4 是经过切分、去核处理的赛买提鲜杏的  $T_2$  反演图谱,  $T_2$  弛豫时间反映杏片内部水分自由度的大小。按波峰所在区域划定杏果中水分的 3 种状态, 从左到右依次为  $T_{21}$  (0.1~10 ms)、 $T_{22}$  (10~100 ms) 和  $T_{23}$  (> 100 ms), 根据水分子存在的环境,  $T_{21}$  为与非水组分结合紧密、不易脱除的结合水,  $T_{22}$  为不易流动水,  $T_{23}$  为自由水, 流动性较强。

**2.5.2 热风干燥过程中内部水分迁移规律** 图 5 是不同预处理、不同热风干燥温度杏片  $T_2$  反演图谱。随干燥时间的延长,  $T_2$  图谱整体向左迁移且有信号强度逐渐降低的趋势, 即杏片中自由水逐渐脱除并实际表现为水分含量持续降低的现象, 这与图 1 干燥特性趋势一致。

同一预处理对比 40, 50, 60 °C 干燥温度的反演图谱可知, 干燥温度越高,  $T_{23}$  信号幅度在干燥前期 (8 h 内) 快速下降, 表明杏片内部流动性较强的自由水最先被脱除。随着干燥的持续进行, 结合水与不易流动水略微增加, 说明一部分自由水可能转化为流动性较差的不易流动水和结合水<sup>[27-28]</sup>, 以致干燥后期出现  $T_{21}$  与  $T_{22}$  部分重合现象。

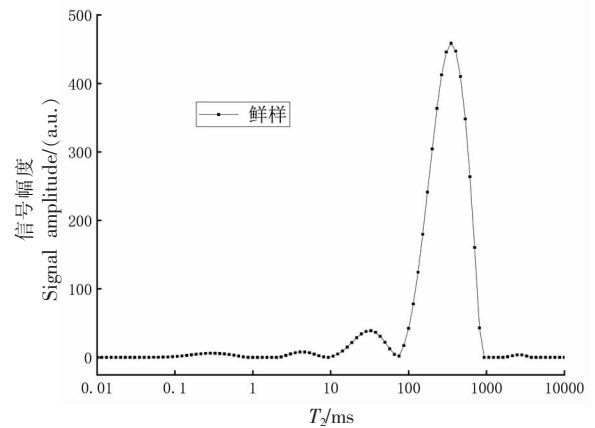
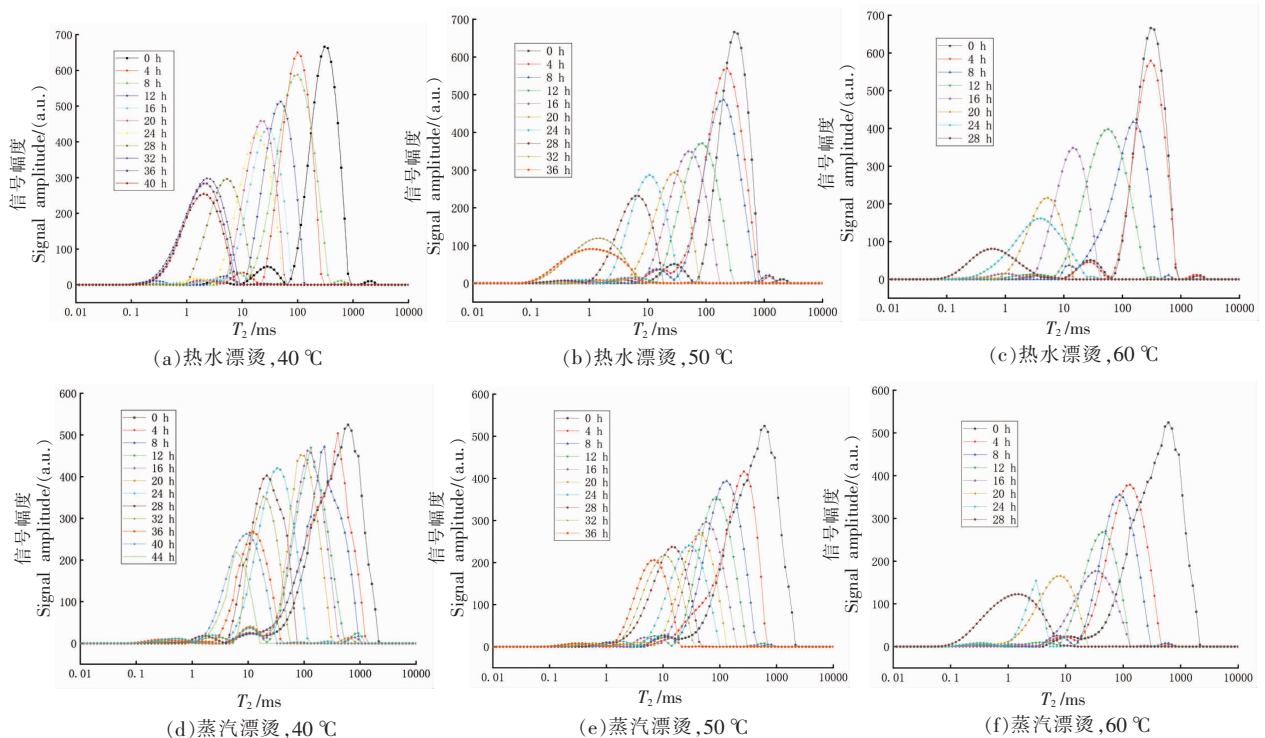


图 4 新鲜赛买提杏片的  $T_2$  图谱

Fig.4  $T_2$  map of fresh Saimaiti cut aprico

对比 4 种预处理的反演图谱可知, 各预处理对杏片干燥均起到了积极的作用, 其中热水漂烫处理杏片  $T_{23}$  信号幅度 (600 以上) 均大于其它处理组, 印证了热水漂烫预处理致使外源水分进入杏片组织内部的假设, 而硫处理同样是杏片浸没于溶液之中,  $T_{23}$  信号幅度仍低于 550 以下, 进一步说明非热护色处理对杏片的组织破坏能力小于热处理护色处理, 导致外源水分进入组织相对较少。



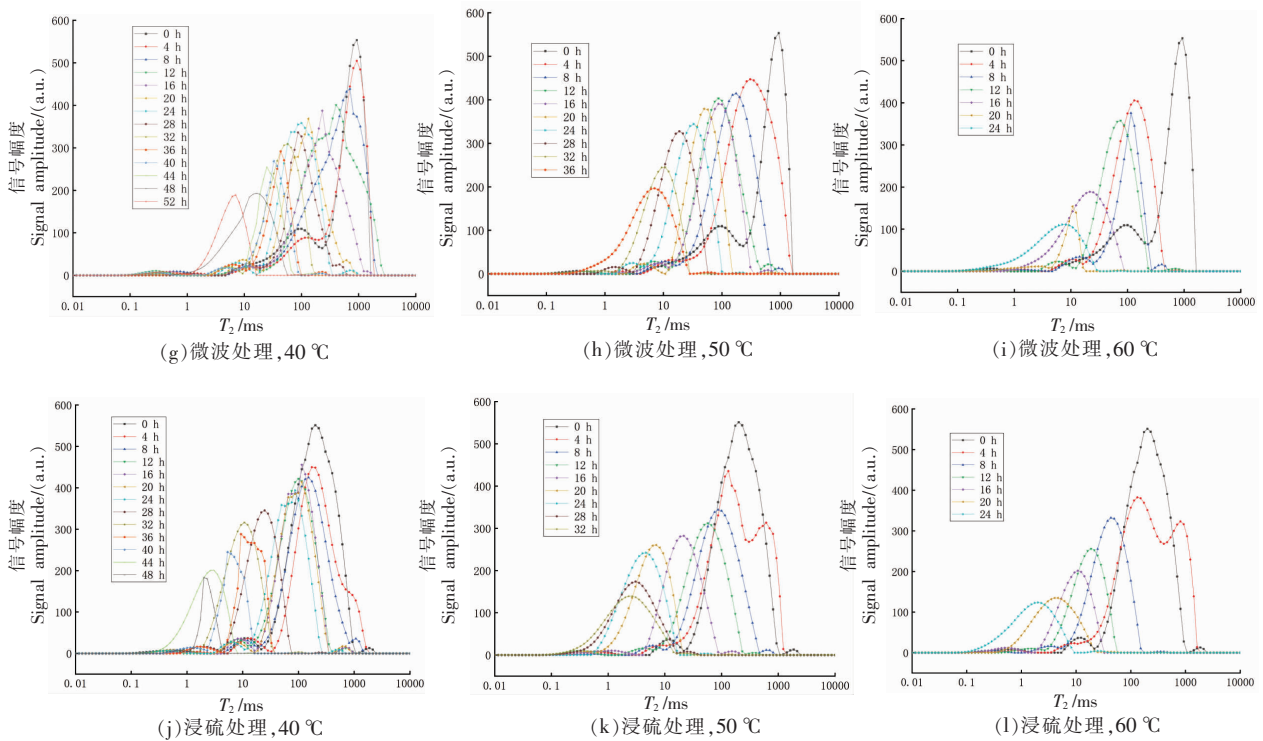


图5 不同预处理及温度下的杏片在干燥过程中的  $T_2$  图谱

Fig.5  $T_2$  map of cut apricot under different pretreatment and temperature during drying

2.5.3 低场核磁成像分析 通过MRI伪彩图能够得到样品内部的质子密度加权成像,反映样品中氢质子的分布,结合颜色条可间接反映杏片内部水分空间分布情况<sup>[29]</sup>,颜色不同代表质子密度不同(含水量不同),红色表示含水量最高,蓝色表示含水量低。

图6为4种预处理结合3个热风温度的杏片

干燥过程中的MRI伪彩图。杏片干燥前4种预处理对比可知,热水漂烫处理红色深且区域较大,说明热水漂烫处理使杏片中的水分均匀分布,同为热处理的蒸汽漂烫和微波以及非热处理的浸硫护色的黄色区域相对明显,再次说明热水漂烫处理外源的水分进入到杏片组织中,随干燥时间的延长,杏片四周颜色最先转为黄绿色,随后中心区域

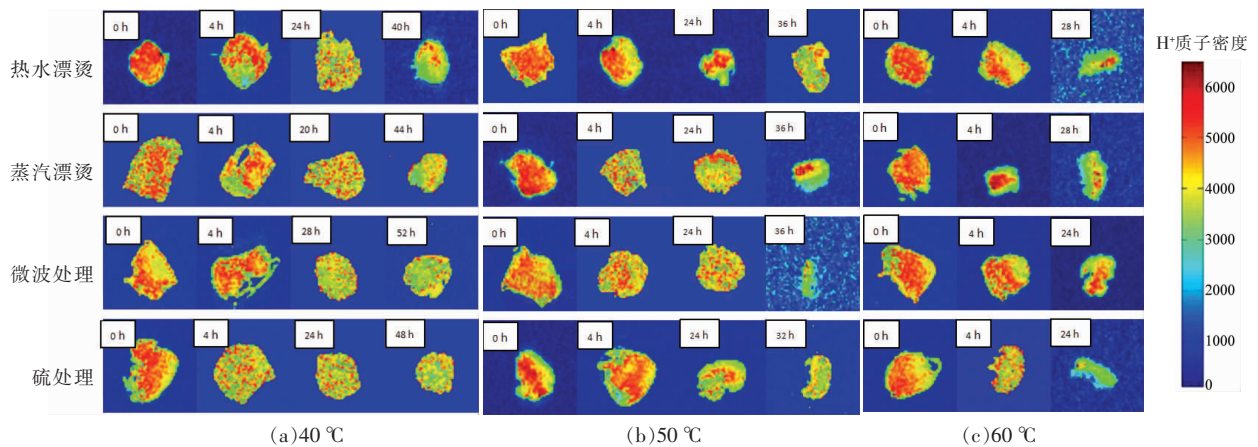


图6 不同温度、不同预处理的杏片在热风干燥过程中MRI伪彩图

Fig.6 MRI pseudocolor map of cut apricot with different temperature and different pretreatment during hot air drying

红色逐渐扩散,表明水分最先由外部的表面汽化开始,受水分梯度的影响,内部水分持续向外迁移。

不同干燥温度对比可知,热水漂烫处理组干燥温度为40℃,直至干燥结束时(48 h),除中心有少量的红色点状聚集外,其余处理组干燥结束时自由水分去除较为彻底,结合水分布均匀。60℃干燥的杏片,除硫处理组外,其余处理组杏片中心均出现了明显的红色聚集区域,进一步从微观的角度解释了高温结壳阻止了水分散失的现象,这可能是因为硫处理破坏杏片表面蜡质,水分散失阻力较小,至干燥结束,干燥时间相较于漂烫处理组缩短了4 h。

### 3 讨论

预处理按照作用机理可简单划分为热处理和非热处理<sup>[30]</sup>,而热风温度是热风干燥中影响干燥效率的重要因素之一<sup>[31-32]</sup>,干燥前预处理结合热风温度可有效缩短干燥时间,加速水分散失。本试验中杏片的干燥速率主要为升速和降速阶段,未出现明显恒速干燥阶段<sup>[33-35]</sup>,与大多数水果干燥特性相似。干燥速率与干燥过程中物料内部水分状态及空间分布有关。研究表明杏果成熟阶段以蔗糖为主<sup>[36]</sup>,干燥温度对多糖和蔗糖转化为单糖有促进作用,其中果糖和葡萄糖的持水力大于蔗糖。除此之外,也可能是水分子与其它大分子的结合条件发生改变<sup>[37]</sup>,导致干制后期水分脱除困难,在 $T_2$ 反演图谱中 $T_{21}$ 与 $T_{22}$ 出现了部分重合的现象。本文的研究结果表明护色预处理和热风温度均对杏片果中水分的迁移起到一定影响,升高温度能显著提高杏片干燥速率,可加快结合水、不易流动水以及自由水的迁移<sup>[38-40]</sup>,而方差分析显示,各护色预处理后杏片热风干燥的水分扩散速率无显著差异,干燥温度对其起关键性作用。

### 4 结论

通过研究护色预处理结合热风温度对杏片干燥特性的影响可知,在消除酶促褐变影响的前提下,漂烫、微波等热处理以及浸硫等非热处理均对杏片热风干燥速率有积极的影响,杏片热风干燥初始阶段(0~8 h)为表面汽化为主,随后主要由内

部扩散主导,水分扩散效率随温度升高而增大, $D_{eff}$ 范围为 $5.9637\times 10^{-7}\sim 1.3530\times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, $E_a$ 平均值为22.62 kJ/mol。

60℃下的干燥速率在任意热风干燥过程中均高于其它2种温度。就预处理而言,除40℃外,微波处理下的最大干燥速率均大于其它预处理,在较高温度下(50℃和60℃)分别为0.34 g/(g·h)和0.51 g/(g·h)。基于干燥动力学进行模型拟合,经验证后漂烫及微波等热处理的最佳模型均为Wang and Singh模型,而作为非热预处理的硫处理最佳模型为Page模型。结合低场核磁共振技术进一步验证了预处理结合干燥温度对杏片水分迁移的影响,至干燥结束的硫处理组杏片在50℃和60℃的干燥温度下,干燥时间相较于漂烫处理组缩短了4 h,能耗进一步降低。

### 参 考 文 献

- [1] 张汉禹,王雪妃,蒲志平,等.不同热风干燥温度对赛买提杏干非酶褐变的影响[J].食品科技,2022,47(7):38-45.  
ZHANG H Y, WANG X F, PU Z P, et al. Effects of different hot air drying temperatures on nonenzymatic browning of Saimaiti apricot[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(7): 38-45.
- [2] 李洁,胡灿,丁羽,等.新疆杏类果品干燥技术研究发展动态[J].现代农业装备,2021,42(3):6-10.  
LI J, HU C, DING Y, et al. Research and development trends of apricot fruit drying technology in Xinjiang[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(3): 6-10.
- [3] ANDO Y, MEADA Y, MIZUTANI K, et al. Impact of blanching and freeze-thaw pretreatment on drying rate of carrot roots in relation to changes in cell membrane function and cell wall structure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 40-46.
- [4] NIETO A, CASTRO M A, ALZAMORA S M. Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 50(3): 175-185.
- [5] 靳力为,任广跃,段续,等.超声预处理对杏片微波冻干过程中水分迁移的影响[J].食品与机械,2020,36(8):15-21,81.  
JIN L W, REN G Y, DUAN X, et al. Effect of

- ultrasonic pretreatment on water migration of apricot slices during microwave freeze-drying[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(8): 15-21, 81.
- [6] DENG L Z, PAN Z L, MUJUMDAR A S, et al. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying quality of apricots by inactivating the enzymes, reducing drying time and altering cellular structure[J]. *Food Control*, 2019, 96: 104-111.
- [7] HUANG W S, FENG Z S, AILA R, et al. Effect of pulsed electric fields (PEF) on physico-chemical properties,  $\beta$ -carotene and antioxidant activity of air-dried apricots[J]. *Food Chemistry*, 2019, 291: 253-262.
- [8] 刘焯, 陈鹏泉, 朱文学, 等. 农产品干燥过程数值模拟研究现状及进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(16): 331-339.
- LIU Y, CHEN P X, ZHU W X, et al. Research status and progress of numerical simulation of agricultural product drying process[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 49(16): 331-339.
- [9] TOĞRUL I T, PEHLIVAN D. Modelling of drying kinetics of single apricot[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 58(1): 23-32.
- [10] 朱洪梅, 王禹心, 刘喻心, 等. 胡萝卜脆片冻干过程中水分、微观结构及品质变化[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(11): 42-48.
- ZHU H M, WANG Y X, LIU Y X, et al. Changes of moisture, microstructure and quality of carrot chips during freeze-drying[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(11): 42-48.
- [11] 盘喻颜, 段振华, 钟静妮. 利用低场核磁共振技术分析月柿果片微波间歇干燥过程中的内部水分变化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 33-39.
- PAN Y Y, DUAN Z H, ZHONG J N. Low field NMR technique was used to analyze the internal moisture changes of tomato slices during microwave intermittent drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(14): 33-39.
- [12] 苑丽婧, 何秀, 林蓉, 等. 超声预处理对猕猴桃水分状态及热风干燥特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 263-272.
- YUAN L J, HE X, LIN R, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on water state and hot air drying characteristics of kiwifruit[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2021, 37(13): 263-272.
- [13] 赖谱富, 翁敏劫, 汤葆莎, 等. 基于低场核磁共振技术研究不同干燥方式对海鲜菇复水及品质特性的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(2): 350-361.
- LAI P F, WENG M J, TANG B S, et al. The effect of different drying methods on rehydration and quality characteristics of seafood mushroom was studied based on low field NMR technology[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2022, 36(2): 350-361.
- [14] 温馨, 胡锐, 赵金红, 等. 不同漂烫方式结合  $\text{CaCl}_2$  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 X, HU R, ZHAO J H, et al. The effect of different rinsing methods combined with  $\text{CaCl}_2$  pretreatment on the quality of cantaloupe[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 231-237.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB T 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
- National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China. National standards for food safety, determination of moisture in food: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-2.
- [16] 金建龙, 苑亚, 董建, 等. 八角热风干燥水分变化及品质分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 79-85.
- JIN J L, YUAN Y, DONG J, et al. Moisture change and quality analysis of star anise hot air drying[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(14): 79-85.
- [17] 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 J, PENG G L, ZHANG X F, et al. Study on hot air drying characteristics and dynamic model of *Astragalus slices*[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(8): 22-28, 56.
- [18] 邹三全, 刘显茜, 赵振超, 等. 猕猴桃切片流化床干燥特性与干燥动力学模型研究[J]. *食品与机械*, 2021, 37(4): 150-156.
- ZOU S Q, LIU X Q, ZHAO Z C, et al. Study on drying characteristics and drying kinetic model of kiwi slices in fluidized bed[J]. *Food and Machinery*, 2021, 37(4): 150-156.



- [19] BIRCH D A, YOUNG W R, FRANKS P J. Thin layers of plankton: Formation by shear and death by diffusion[J]. *Deep-Sea Research Part I*, 2007, 55(3): 277-295.
- [20] 张静. 稻谷干燥特性及动力学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.  
ZHANG J. Study on drying characteristics and dynamics of rice[D]. Hefei: Hefei University of technology, 2018.
- [21] 田华, 韩艳婷. 苦瓜微波干燥特性及动力学模型[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(23): 125-129.  
TIAN H, HAN Y T. Microwave drying characteristics and kinetic model of balsam pear[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(23): 125-129.
- [22] REPPICH M, JEGLA Z, GRONDINGER J, et al. Mathematical modeling of drying processes of selected fruits and vegetables[J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2021, 93(10): 1581-1589.
- [23] 李潇. 苹果丁压差闪蒸联合干燥机理及质构形成影响机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.  
LI X. Study on the mechanism of differential pressure flash drying and the influence mechanism of texture formation of diced apple[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [24] 张大鹏. 苹果切片热风干燥过程中的热湿传递研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.  
ZHANG D P. Study on heat and moisture transfer during hot air drying of apple slices [D]. Jinan: Shandong University of Architecture, 2020.
- [25] 靳力为. 超声强化对杏冻干特性的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.  
JIN L W. Research on the frozen characteristics of *Apricots* with ultrasonic reinforcement[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [26] 王存堂, 张雄峰, 杨丽, 等. 干制温度和切片厚度对山楂切片热风干燥动力学的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(13): 131-136.  
WANG C T, ZHANG X F, YANG L, et al. Effects of drying temperature and slice thickness on hot air drying kinetics of Hawthorn slices[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2016, 37(13): 131-136.
- [27] ZHU Y Y, JU R H, MA F F, et al. Moisture variation analysis of the green plum during the drying process based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(12): 5137-5147.
- [28] 叶爽, 陈璐, 高虹, 等.  $\gamma$ 射线辐照对香菇采后贮藏过程中水分特性及理化指标的影响 [J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 91-97.  
YE S, CHEN C, GAO H, et al. Effect of gamma irradiation on water properties and physicochemical indexes of *Lentinus edodes* during postharvest storage[J]. *Food Science*, 2021, 42(17): 91-97.
- [29] XU F F, JIN X, ZHANG L, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods[J]. *Food Research International*, 2017, 96(25): 191-197.
- [30] 张倩. 不同预处理对铁皮石斛热风干燥过程及品质的影响[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2022.  
ZHANG Q. Effect of different pretreatment on hot air drying process and quality of *Dendrobium candidum*[D]. Wuhu: Anhui University of Engineering, 2022.
- [31] DENG L Z, ARUN S M, YANG W X, et al. Hot air impingement drying kinetics and quality attributes of orange peel[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(1): 1-11.
- [32] SUFER O, PALAZOGLU T K. A study on hot-air drying of pomegranate[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 137(6): 1981-1990.
- [33] 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 H, LIN H T, YUAN F, et al. Microwave vacuum drying characteristics and kinetic model of litchi pulp[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 107-112.
- [34] 王存堂, 张译心, 李梦. 百合热风干燥动力学研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 74-78, 84.  
WANG C T, ZHANG Y X, LI M. Study on drying kinetics of lily by hot air[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2017, 38(18): 74-78, 84.
- [35] 张欣, 张记, 彭桂兰, 等. 山药切片真空干燥特性及模型研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(4): 82-89.  
ZHANG X, ZHANG J, PENG G L, et al. Study on vacuum drying characteristics and model of yam slices [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(4): 82-89.
- [36] 李琼. 干制温度对杏果实糖转化及香气成分的影响



- [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- LI Q. Effect of dry temperature on sugar conversion and aroma composition of apricot fruits[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.
- [37] WEI S, TIAN B Q, JIA H F, et al. Investigation on water distribution and state in tobacco leaves with stalks during curing by LF-NMR and MRI[J]. *Drying Technology*, 2018, 36(12): 1515-1522.
- [38] 魏明, 张倩, 钱森和, 等. 不同预处理对铁皮石斛热风干燥特性及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8): 281-287.
- WEI M, ZHANG Q, QIAN S H, et al. Effect of different pretreatment on hot air drying characteristics and quality of *Dendrobium candidum*[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2022, 38(8): 281-287.
- [39] 覃焱婷, 段振华, 韦珍珍, 等. 微波功率对月柿果片微波间歇干燥中水分迁移及品质的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(10): 1-5, 78.
- QIN Y T, DUAN Z H, WEI Z Z, et al. Effect of microwave power on moisture transfer and quality of persimmon slices during microwave intermittent drying[J]. *Food and Machinery*, 2021, 37(10): 1-5, 78.
- [40] 薛广, 李敏, 关志强, 等. 基于低场核磁共振的罗非鱼片微波真空干燥过程水分变化规律[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, 40(6): 123-129.
- XUE G, LI M, GUAN Z Q, et al. Moisture change law of tilapia fillet during microwave vacuum drying based on low field NMR[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40(6): 123-129.

### Effects of Pretreatment on Hot Air Drying Characteristics and Water Migration of Saimaiti Apricot Slices

Chen Kai<sup>1</sup>, Cheng Chunping<sup>1</sup>, Wang Xuefei<sup>1</sup>, Du Yutong<sup>1</sup>, Xu Mingqiang<sup>2\*</sup>, Li Huanrong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052

<sup>2</sup>Research Institute of Agro-products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091)

**Abstract** To study the drying characteristics and water migration of Saimaiti apricot slices after different pretreatment during hot air drying. Saimaiti apricot slices was used as raw material, the drying characteristics, effective diffusion coefficient and activation energy of water were investigated at three temperatures (40, 50 °C and 60 °C) after four kinds of pretreatment (hot water blanching, steam blanching, microwave treatment and sulfur treatment) on the basis of eliminating enzymatic browning, and the drying kinetics model was established. The relationship between model parameters and drying temperature was studied. Further combining with low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI), the lateral relaxation time and pseudo-color images were used to elucidate the water migration in apricot slices during drying. Results showed that the drying time of apricot slices compared with 40 °C was shortened by 41.67%, 36.36%, 53.85% and 50.00%, respectively.  $D_{eff}$  increased with the increase of temperature, mainly in the range of  $5.9637 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  to  $1.3530 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . For model fitting based on drying kinetics, Wang and Singh model was the most suitable model for blanching and microwave heat treatment, with  $R^2$  of 0.9929, 0.9955 and 0.9942, respectively, while Page model was the most suitable model for sulfur treatment without thermal pretreatment ( $R^2=0.9967$ ). The results of LF-NMR experiment showed that the surface vaporization was the main factor in the early drying stage, and the free water was the first to be removed. In the late drying stage, the water diffusion was controlled by internal diffusion, and part of the free water was converted into immobilized water and bound water, and the water diffusion rate decreased. Color protection pretreatment combined with hot air drying had certain effects on drying characteristics and water migration of apricot slices. Analysis of variance showed that there was no significant difference in  $D_{eff}$  of the four color protection treatments at different temperatures ( $P>0.05$ ), and the drying temperature played a decisive role in the water diffusion during drying. Combined with low-field NMR technology, the drying time of apricot slices in microwave and sulfur treatment group could be shortened by 4 h at 50 °C and 60 °C compared with that in blanching treatment group.

**Keywords** Saimaiti apricot slices; blanching; sulfur treatment; microwave treatment; model validation; LF-NMR