

刘明宝, 李 静, 何方健, 等. 山楂微波干燥过程中环境相对湿度的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 487-493.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.032

山楂微波干燥过程中环境相对湿度的影响

刘明宝¹, 李 静^{1,2}, 何方健¹, 裴永胜¹, 李臻峰^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 采用基于环境相对湿度可控的微波干燥系统, 探究相对湿度对山楂微波干燥过程的影响。在物料干燥温度 60 ℃ 的条件下, 研究恒定湿度(相对湿度 5%、30%、50%、70%)和阶段变湿[CRP(恒速阶段)、FRP(降速阶段)]分别保持相对湿度 5%、30%、50%]共 10 种方案下山楂的干燥特性; 利用 Weibull 函数进行干燥动力学分析并计算有效水分扩散系数(D_{eff}); 基于复水性、色差、 V_c 含量和感官品质, 评估不同干燥条件下干制品品质。结果表明: 恒定湿度条件及阶段变湿条件下, 干燥时间均随相对湿度的下降而缩短, 其中, 相对湿度 5% 条件下干燥时间比相对湿度 70% 条件下缩短了 51.62%; FRP 阶段降湿可显著缩短干燥时间。Weibull 函数可很好地拟合山楂干燥过程, D_{eff} 随相对湿度的下降而增大, 验证了降低相对湿度可增强干燥过程中水分扩散速率, 其中 FRP 阶段降湿对水分有效扩散系数的提升更为明显。恒定相对湿度 30% 和阶段变湿(恒速阶段相对湿度 50%、降速阶段相对湿度 30%)条件下干制品色差、 V_c 含量和感官品质较好。

关键词: 山楂; 微波干燥; 相对湿度; 干燥速率; 品质

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)02-0487-07

Effect of environmental relative humidity on microwave drying process of hawthorn

LIU Ming-bao¹, LI Jing^{1,2}, HE Fang-jian¹, PEI Yong-sheng¹, LI Zhen-feng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: Microwave drying system based on controllable relative humidity was adopted to investigate the effect of environmental relative humidity on the microwave drying process of hawthorn. Under the condition of material drying temperature of 60 ℃, the drying characteristics of hawthorn were studied under 10 schemes including constant humidity (relative humidity of 5%, 30%, 50% and 70%) and phase humidification relative humidity of 5%, 30% and 50%. The phase humidification was divided into constant rate period (CRP) and falling rate period (FRP). Weibull function was used to fit the drying curve and calculate moisture diffusion coefficient (D_{eff}). The quality of dried products under different drying conditions was evaluated based on rehydration, color difference, V_c content and sensory scores. The results showed that the drying time was shortened with the decrease of relative humidity under constant humidity and phase humidification, and the drying time was shortened by 51.62% under the condition of 5% relative humidity compared with that under the condition of 70% relative humidity. Dehumidification at FRP stage could significantly shorten the drying time. Weibull model could fit the drying curves of hawthorn under different conditions accurately. D_{eff} increased with the decrease of relative humidity, which verified that reduc-

收稿日期: 2019-07-17

基金项目: 国家青年自然科学基金项目(21606109)

作者简介: 刘明宝(1995-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为食品微波干燥。(E-mail) 784048590@qq.com

通讯作者: 李臻峰, (E-mail) 1736691239@qq.com

ing relative humidity could enhance the water diffusion rate in the drying process. Dehumidification at FRP stage has a more obvious improvement on the D_{eff} . The color difference, V_c content and sensory scores of dried products were better under the conditions of constant relative humidity of 30%

and phase humidification (relative humidity of 50% at CRP stage, relative humidity of 30% at FRP stage).

Key words: hawthorn; microwave drying; relative humidity; drying rate; quality

山楂为蔷薇科苹果亚科山楂属植物,可药食两用,是中国传统的中药材^[1]。中国是山楂生产大国,年产量大约为 1×10^6 t^[2]。山楂在存储过程中易发生腐烂,因此需研究其保存方法。干燥加工能够抑制微生物的繁殖和酶的活性,且产品易于运输,因此干燥成为国内外研究较多的食品储藏加工方法之一^[3]。微波干燥具有干燥时间短、传热效率高^[4-5]、清洁安全且兼有杀菌消毒等特点,在农产品与食品加工工业中得到广泛运用^[6]。

大量研究结果表明,微波干燥过程中干燥温度、环境湿度和切片厚度均可显著影响干燥速率^[7-8]。Xin等^[9]在研究热风干燥烟草中发现,恒定气流下环境湿度越大则干燥时间越长。Zlatanovic等^[10]在研究热风干燥苹果块中发现,干燥速率随相对湿度的减小而增大。张波等^[11]在研究无核葡萄热风干燥中,通过控制干燥的温度与湿度可获得综合品质指标较优的干制品。因此,研究干燥过程中相对湿度对提高干燥效率、改善干制品品质十分必要。但目前大多数相关研究集中于热风干燥,而对微波干燥过程中环境相对湿度对干燥效果影响的研究较少。

在食品干燥中,微波干燥过程一般分为恒速期(CRP)和降速期(FRP),CRP转为FRP的转折点定义为Mc点^[12]。巨浩羽等^[13]研究了第一阶段相对湿度50%保持不同时间下胡萝卜的干燥特性。目前阶段变湿研究中,大多数是研究湿度保持时间对物料干燥特性的影响,没有研究以Mc点作为阶段变湿的分界点对物料干燥特性的影响。

Weibull函数具有很好的兼容性和适用性,广泛应用于干燥过程的模拟分析。宋镇等^[14]利用Weibull函数拟合杏鲍菇的干燥曲线,明确了尺度参数与传热介质的相互关系。巨浩羽等^[13]则利用Weibull函数很好地拟合了不同湿度条件下干燥曲线。

本研究利用Weibull函数对干燥过程的尺度参数和水分有效扩散系数进行分析,结合品质指标,探究相对湿度对山楂干燥速率和干制品品质的影响,为山楂微波干燥中相对湿度的控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

试验以山楂为材料,购买自山东省临沂市,大小

基本一致,无损伤,切割成5 mm的薄片进行试验。山楂的湿基含水率为 $77.53\% \pm 0.4\%$ (烘干法,105℃烘干至质量恒定)。试验前山楂冷藏,置于 (4 ± 1) ℃的冰箱中。

HH-1恒温水浴锅,邦西科技有限公司产品;3NH NR110色差仪,三恩时科技有限公司产品;UV-1800岛津紫外可见分光光度计,日本岛津制作所产品。

1.2 相对湿度可控的微波干燥试验系统

相对湿度可控的微波干燥试验系统(图1)主要由微波干燥单元^[15]、湿度检测与控制单元及在线采集单元组成。微波干燥部分由微波炉、物料罐、物料、光纤解调仪组成,可自动控制物料温度^[8]。湿度检测与控制部分由空气压缩机、质量流量计、干燥管、2个电动球阀、蒸汽发生器和2个温湿计组成。空气压缩机内的气流经质量流量计后保证空气流量为 $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$,而后在干燥管作用下变成接近绝干空气(5%相对湿度),蒸汽发生器产生相对湿度100%的湿空气。

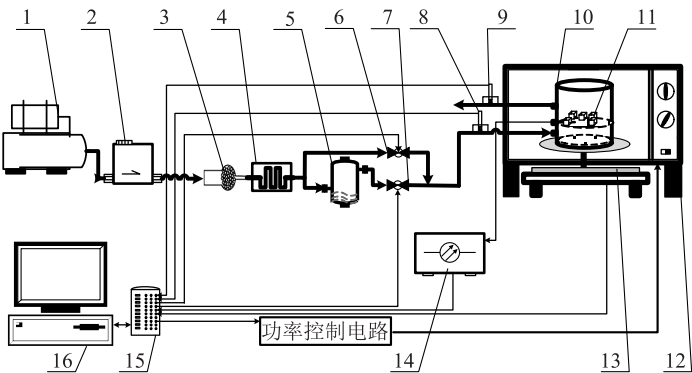
干、湿支路气流可通过对应的电动球阀开度控制流量,混合后得到特定湿度的空气送入物料罐,完成干燥过程后排出。温湿计1与温湿计2检测进出物料罐的空气温湿度。整个试验系统气路部分自恒温水浴锅后采用保温措施,确保温度一致,以保证湿度测量的准确性。

在线采集单元由电脑和Ni-6008数据采集卡组成,实时采集物料的质量、微波功率、温度参数和温湿计的温湿度数据。

1.3 试验方案

试验前,挑选大小均匀、表面较光滑、有光泽的山楂作为试验原料。微波干燥温度设为60℃,空气流量为 $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[15]。按表1所示的试验方案进行试验,分恒定湿度和阶段变湿2种方案:恒定湿度方案中整个干燥过程保持恒定湿度;阶段变湿方案中以Mc点作分界点,CRP和FRP阶段分别保持不同的湿度。

每组试验中,称取 (30 ± 1) g新鲜山楂,干燥至山楂湿基含水率为10%时停止。重复试验3次取平均值。干燥完成后,冷却,装入真空密封罐保存。



1:空气压缩机;2:质量流量计;3:干燥管;4:恒温水浴锅;5:蒸汽发生器;6:电动球阀(干);7:电动球阀(湿);8:温湿计 1;9:温湿计 2;10:物料罐;11:物料;12:微波炉;13:电子秤;14:光纤解调仪;15:NI-6008 数据采集卡;16:电脑。

图 1 相对湿度可控的微波干燥试验系统
Fig.1 Microwave drying experiment system based on controllable relative humidity

表 1 试验设计
Table 1 Design of experiments

干燥方案	试验编号	相对湿度 (%)	湿度变化阶段
恒定湿度	H5	5	直至结束
	H30	30	直至结束
	H50	50	直至结束
	H70	70	直至结束
阶段变湿	H5-30	5	开始至 Mc 点
		30	Mc 点至结束
	H5-50	5	开始至 Mc 点
		50	Mc 点至结束
	H30-5	30	开始至 Mc 点
		5	Mc 点至结束
	H30-50	30	开始至 Mc 点
		50	Mc 点至结束
	H50-5	50	开始至 Mc 点
		5	Mc 点至结束
	H50-30	50	开始至 Mc 点
		30	Mc 点至结束

Mc 点:恒速期(CRP)转为降速期(FRP)的转折点。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 干基含水率及干燥速率测定 不同干燥时间山楂片的水分比^[16]计算公式: $MR = M_t/M_0$,式中, M_0 、 M_t 分别为山楂初始、 t 时刻的干基含水率。干基含水率^[16]计算公式: $M_t = (W_t - G)/G$,式中, M_t 为山楂干基含水率, W_t 为任意时刻的总质量(g), G 为干质量(g)。干燥速率^[17]计算公式: $DR = (MR_{t_2} - MR_{t_1})/(t_2 - t_1)$,式中, DR 为干燥速率(%/min), MR_{t_2} 、 MR_{t_1} 为干燥过程中时间 t_2 、 t_1 的水分比(%)。

1.4.2 Weibull 函数模型 Weibull 分布函数如下式

所示^[16]: $MR = \exp[-(t/\alpha)^\beta]$,式中, MR 为水分比(%), t 为干燥时间(min), α 为时间参数(min), β 为形状参数。模型拟合好坏由拟合决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和离差平方和(χ^2)来评价^[7]。

1.4.3 有效水分扩散系数的计算 利用简化后的菲克第二定律计算有效水分扩散系数^[17]: $MR = \frac{M_t}{M_0} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t)$,式中, D_{eff} 为水分有效扩散系数(m^2/s), L 为山楂厚度(m), t 为干燥时间(s)。

1.4.4 复水比测定 将干燥后的山楂称质量后放入恒温水浴锅复水,测定方法参照文献[7]。

1.4.5 色差值测定 用色差计测定新鲜与干制山楂色度,测定方法参照文献[8]。

1.4.6 V_c 含量测定 利用紫外分光光度法^[7]对干制山楂中 V_c 含量进行测定。

1.4.7 感官品质评价 样品干燥冷却后由 20 名未经训练的评委(10 男 10 女,年龄 20~50 岁,食品专业的学生和工作人员)进行品尝打分,结果取平均值。评定标准见表 2^[7]。

1.5 数据处理 采用软件 SPSS24.0 对试验数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 不同恒定相对湿度条件下山楂的微波干燥特性 微波干燥温度为 60℃时,不同恒定相对湿度条件下山楂的微波干燥特性和干燥速率曲线如图 2 所

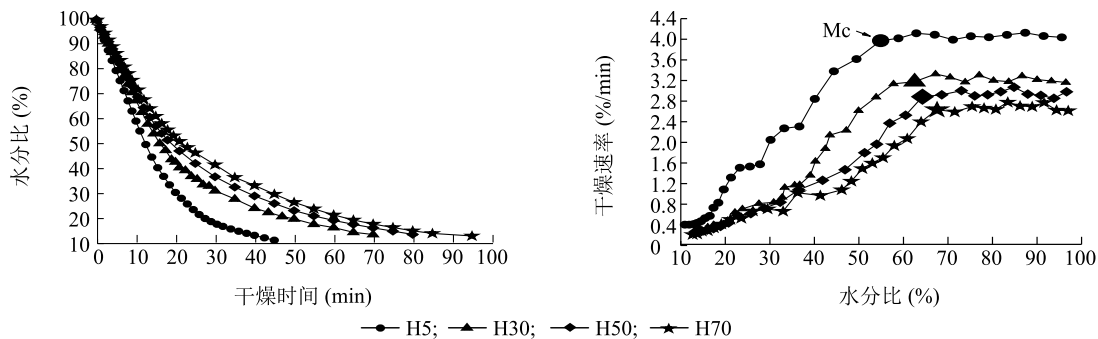
示。由图 2 可知,H5、H30、H50 和 H70 干燥时间分别为 45 min、70 min、80 min 和 93 min,干燥时间随相对湿度的降低而减少,H5 比 H70 的干燥时间缩短了 51.62%。因此,环境相对湿度的降低可以显著缩短干燥时间,提高干燥效率。由菲克定律及其

边界条件可知,相对湿度越低,物料和环境之间的水蒸气压力差越大,干燥驱动力越大,干燥时间越短,干燥效率也越高^[18]。因此降低相对湿度有助于提升干燥效率,缩短干燥时间。这与 Ramírez 等^[19]研究结论一致。

表 2 干燥山楂感官评价标准

Table 2 Standards for sensory evaluation of dried hawthorn

参数	评分等级			
	4	3	2	1
色泽	色泽均匀,果肉微黄	色泽较均匀,果肉淡黄色,轻微色变	色泽不均匀,浅褐,色变较严重	色泽不均匀,褐色,严重色变
形态组织状态	皱缩较少,酥脆,有弹性	轻微皱缩,脆,弹性较好	皱缩较多,硬,弹性较小	严重皱缩,生硬粗糙,无弹性
气味	有山楂特有香气,气味浓郁	有山楂特有香气,气味较淡	无山楂特有香气	出现不良气味



H5、H30、H50、H70、Mc 见表 1。

图 2 恒定相对湿度下山楂的干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.2 Drying curves and drying rate curves at the constant relative humidity

由图 2 可以看到,不同恒定相对湿度条件下干燥速率分为恒速阶段(CRP)和降速阶段(FRP),这与夏文水等^[12]研究结果基本一致。H5、H30、H50 和 H70,对应的 CRP 阶段的平均干燥速率分别为 4.07 %/min、3.24 %/min、2.95 %/min、2.68 %/min;H5 相比于 H70 下 CRP 阶段的干燥速率提高 51.86%,与干燥曲线中的规律一致。

由图 2 可知,70%相对湿度条件下干燥时间过长,干燥速率过低,因此在阶段变湿方案中不予考虑。Mc 点在物料温度一定的情况下与环境相对湿度有关,且随相对湿度的增加而延迟。在阶段变湿方案中,以 Mc 点作为 2 个阶段的分界点,CRP 阶段和 FRP 阶段分别保持不同的湿度。

2.2 阶段变湿下山楂的微波干燥特性

由图 3 可知,H5-30 和 H30-5 与 H30 相比,是分别在 CRP 与 FRP 阶段保持 5%的相对湿度,2 种方

案下干燥时间分别为 65 min 和 48 min,与 H30 (70 min) 比较干燥时间分别缩短 7.14% 和 31.42%,故阶段降低湿度可缩短干燥时间。同时,相比于 CRP 阶段,FRP 阶段保持低湿能更显著地缩短干燥时间。这可能是因为:FRP 阶段主要脱去物料中难以脱去的半结合水和结合水,导致 FRP 阶段占用整个干燥进程的大部分干燥时间^[12],因此,FRP 阶段降低湿度可显著缩短干燥时间。

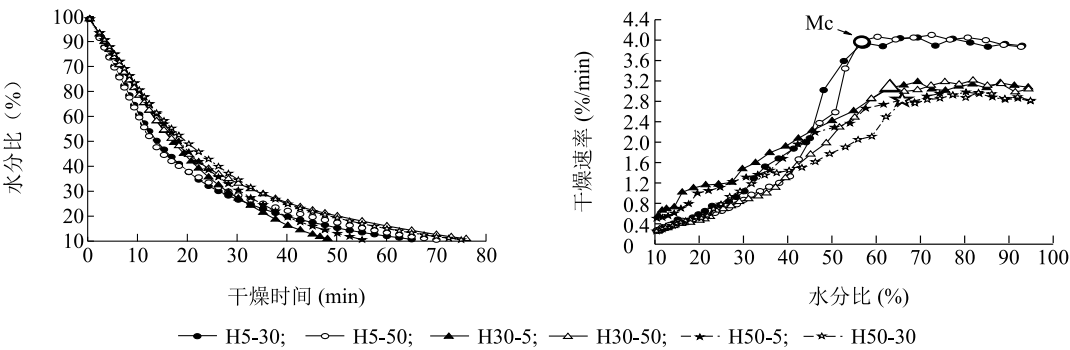
由图 3 可知,以 H30-5 和 H30-50 干燥速率曲线为例,可以看出在 CRP 阶段 2 方案干燥速率无差别,而在 FRP 阶段时差异显著,该阶段虽然较难脱水,但保持相对湿度 5%的低湿条件依然可以保持较高的干燥速率,这与张建文等^[20]研究结果相一致。

2.3 Weibull 函数模拟山楂干燥曲线

2.3.1 山楂干燥过程分析 利用 Weibull 函数拟合不同干燥条件下山楂的干燥曲线。由表 3 可知,决

定系数(R^2)均大于 0.988,均方根误差($RMSE$)均小于 2.98×10^{-2} ,离差平方和(χ^2)均小于 9.71×10^{-4} ,因

此 Weibull 函数能很好地拟合山楂在不同相对湿度条件下的干燥曲线。



H5、H30、H50、H70、Mc 见表 1。
图 3 阶段变湿下山楂的干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.3 Drying curves and drying rate curves under the conditions of phase humidification

参数 α 值约等于完成干燥过程 63% 所用时间^[13]。由表 3 可知,在恒定湿度方案下, α 值的范围为18.050~35.865 min;同时, α 值越小,干燥时间越短。在阶段变湿方案中,CRP 高湿 FRP 低湿(前高后低)下 α 值均大于 CRP 低湿 FRP 高湿(前低后高)方案下 α 值,而前高后低方案下干燥时间均小于前低后高方案下干燥时间。以 H30-5 和 H5-30 为例,前高后低方案下 α 值 23.48 大于前低后高下 α 值 22.413,干燥时间 48 min 小于 65 min。对比图 3

可知,H30-5 和 H5-30 的干燥速率曲线出现交叉。原因可能是不同阶段水蒸气压力差作用效果不同,后期水分更难以脱去^[12],干燥后期低湿可提供更大的驱动力,干燥速率更快,可以有效减少干燥时间,提升干燥效率。因此,干燥后期的环境湿度控制更为重要。同时,在实际干燥过程中,环境湿度变化时应用 Weibull 函数,不能采用参数 α 值直接评估干燥效率,其传质机理还需进一步研究。

表 3 Weibull 函数拟合山楂干燥过程的结果
Table 3 Fitting results of hawthorn drying process with Weibull function

试验编号	α 参数 (min)	形状参数	决定系数 (R^2)	均方根误差 ($RMSE$)	离差平方和 (χ^2)	水分有效扩散系数 ($\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)
H5	18.050	0.968	0.995	1.96×10^{-2}	4.08×10^{-4}	2.240
H30	26.391	0.911	0.989	2.77×10^{-2}	8.13×10^{-4}	1.320
H50	31.957	0.880	0.994	2.16×10^{-2}	5.03×10^{-4}	1.088
H70	35.865	0.879	0.996	1.76×10^{-2}	3.29×10^{-4}	0.988
H5-30	22.413	0.894	0.992	2.30×10^{-2}	5.35×10^{-4}	1.492
H5-50	23.027	0.826	0.988	2.98×10^{-2}	9.71×10^{-4}	1.313
H30-5	23.480	0.842	0.998	1.24×10^{-2}	1.67×10^{-4}	2.011
H30-50	27.924	0.920	0.994	2.18×10^{-2}	5.09×10^{-4}	1.264
H50-5	25.573	0.921	0.993	2.21×10^{-2}	5.16×10^{-4}	1.794
H50-30	29.228	0.977	0.998	1.16×10^{-2}	1.52×10^{-4}	1.126

2.3.2 不同干燥条件下山楂水分有效扩散系数的比较 不同干燥条件下山楂的有效水分扩散系数(D_{eff})计算结果见表 3。恒定湿度下, D_{eff} 随

相对湿度的下降而增大,验证了降低相对湿度可增强干燥过程的水分扩散速率。在阶段变湿下,以 H30-5、H5-30 和 H30 为例, D_{eff} 值分别为

$2.011 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1.492 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1.320 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。可以看出在 CRP 阶段和 FRP 阶段保持低湿均有助于增大 D_{eff} , 但 FRP 阶段保持低湿对 D_{eff} 提升更为明显, 这与在 FRP 阶段保持低湿可显著缩短干燥时间, 提高干燥速率的结果具有一致性。

2.4 山楂干制品品质分析

由表 4 可知, 各湿度条件下山楂干制品复水性并无明显差异, 但干制品色差有明显差异。FRP 阶段保持 5% 相对湿度 (H5、H30-5、H50-5) 时, 干制品的色差普遍较差, 这可能是由于物料所处环境相对湿度低, 介电常数减小^[21], 诱发美拉德反应, 导致色差变大; FRP 阶段保持 30% 相对湿度 (H30、H5-30、H50-30) 时, 干制品的色差普遍较好, 因为 FRP 阶段保持 30% 相对湿度时, 物料表面形成高湿保护层^[8], 减少了表面美拉德反应, 改善了色差。不同湿度条件下山楂干制品 V_c 含量有明显差异, H30-5、H30、H30-50 V_c 含量分别为 485.5 mg/kg、413.3 mg/kg、400.2 mg/kg, V_c 保留量高。CRP 阶段湿度保持 30% 有利于 V_c 保留。H30-50 V_c 含量稍有降低, 可能是由于干燥时间延长造成的。H50-30 下 V_c 含量高的原因有待探讨。

表 4 不同干燥条件下山楂复水性、色差和 V_c 含量

Table 4 Rehydration ratio, color difference and V_c content of hawthorn under different drying conditions

样品编号	复水率 (R_f)	色差 (ΔE)	V_c 含量 (mg/kg)
H5	1.95±0.05a	25.82±1.02a	281.2±6.9h
H30	1.88±0.03d	16.01±0.51df	413.3±9.3c
H50	1.88±0.09cd	15.03±0.08f	362.2±7.0ef
H70	1.87±0.03d	18.60±0.21c	298.5±4.3h
H5-30	1.90±0.06c	16.17±0.79df	369.7±6.7e
H5-50	1.87±0.01df	20.82±0.29b	356.5±3.7f
H30-5	1.89±0.09cd	24.48±0.88a	485.5±5.8a
H30-50	1.93±0.07a	17.12±0.72cd	400.2±10.7d
H50-5	1.93±0.14ab	23.92±1.15a	342.5±2.8g
H50-30	1.89±0.03c	14.16±0.23f	452.6±5.8b

同一列不同小写字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)。

不同湿度条件下山楂干制品感官品质有明显差异 (表 5)。H5 山楂干制品出现比较明显的焦糊、皱缩、硬化, 且气味损失严重。H30、H30-50 和 H50-30

山楂干制品组织形态、色泽、香气及口感等方面表现好, 焦糊少, 干制品松脆, 感官品质得分最高。

因此, 在 H50-30 和 H30 条件下山楂干制品的复水性、色差、 V_c 含量和感官品质均较好, H50-30、H30 是为较优的干燥条件。

表 5 不同干燥方案下干燥的山楂感官品质得分

Table 5 Sensory scores of dried hawthorn under different drying schemes

样品编号	色泽	组织状态	气味
H5	1.84±0.12e	2.15±0.04f	2.57±0.13f
H30	3.75±0.05ab	3.27±0.29ab	3.11±0.24cd
H50	3.41±0.43ab	2.94±0.15d	3.04±0.11d
H70	3.14±0.22bc	2.90±0.08de	2.92±0.14e
H5-30	3.32±0.19b	2.87±0.04e	3.36±0.05b
H5-50	3.27±0.31bc	3.04±0.13c	3.05±0.06d
H30-5	2.19±0.11d	3.02±0.15c	3.14±0.13c
H30-50	3.73±0.24ab	3.24±0.19ab	3.56±0.14a
H50-5	2.23±0.09d	2.86±0.14e	3.34±0.08b
H50-30	3.84±0.13a	3.41±0.23a	3.62±0.05a

同一列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 结 论

通过基于相对湿度可控的微波干燥系统, 试验证明微波干燥过程中环境相对湿度对山楂干燥速率、色差、 V_c 含量和感官品质有显著影响, 对复水性基本无影响。在恒定相对湿度下 (5%~70%), 降低相对湿度可以缩短干燥时间; 阶段变湿条件下, FRP 阶段降湿能显著缩短干燥时间, H30-5、H5-30 干燥时间比 H30 干燥时间分别缩短 31.42% 和 7.14%。

利用 Weibull 模型对山楂干燥曲线进行拟合, 结果表明 R^2 均大于 0.988, 说明 Weibull 模型可较好地拟合不同湿度条件下山楂干燥过程。有效水分扩散系数 (D_{eff}) 随相对湿度的下降而增大, 验证了降低相对湿度可增加干燥过程的水分扩散速率, 同时在 FRP 阶段降湿对水分有效扩散系数的提升更为明显。

不同湿度条件下山楂干制品复水性无明显差异, 但干制品色差、 V_c 含量和感官品质有明显差异。H30、H50-30 条件下山楂干制品色差、 V_c 含量和感官品质均较优, 该干燥条件为较优的干燥条件。

参考文献:

- [1] 姚园,崔丽贤,刘素稳,等. 山楂功能成分及加工研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(15): 211-215.
- [2] 宁苓. 浅谈山楂发展现状及前景[J]. 新农业, 2018(11): 30-32.
- [3] HUANG J, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Effect of microwave air spouted drying arranged in two and three-stages on the drying uniformity and quality of dehydrated carrot cubes[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 177: 80-89.
- [4] RAGHAVAN G S V, ZHEN F L, NING W, et al. Control of microwave drying process through aroma monitoring[J]. Drying Technology, 2010, 28(5): 591-599.
- [5] GIRI S, PRASAD S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 512-521.
- [6] CHEN H C, CHUNG L L. Colour phenolic content and antioxidant capacity of some fruits dehydrated by a combination of different methods[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3889-3896.
- [7] 李丽丽,李臻峰,李静,等. 基于气味在线检测的苦瓜微波干燥过程[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 179-185.
- [8] 惠菊,李臻峰,李静. 排湿风速对微波干燥过程湿度及其干燥特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(6): 1061-1068.
- [9] XIN Y N, ZHANG J W, LI B. Drying kinetics of tobacco strips at different air temperatures and relative humidities[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 47(1): 32-38.
- [10] ZLATANOVIC I, KOMATINA M, ANTONIJEVIC D. Low-temperature convective drying of apple cubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(1): 114-123.
- [11] 张波,姬长英,徐伟悦. 不同预处理下无核厚皮葡萄热泵式分段干燥特性及品质比较[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 190-198.
- [12] 夏文水. 食品工艺学[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2008: 25-39.
- [13] 巨浩羽,肖红伟,郑霞. 干燥环境相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296-304.
- [14] 宋镇,姬长英,张波. 基于 Weibull 分布函数的杏鲍菇干燥过程模拟及理化性质分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(8): 71-78.
- [15] PU H J, LI Z F, HUI J, et al. Effect of relative humidity on microwave drying of carrot[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 190: 167-175.
- [16] JU H Y, ZHAO S H, MUJUMDAR A S, et al. Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models[J]. Food and Bioprocess Processing, 2018, 111: 20-29.
- [17] 李波,王明伟,强正泽,等. 基于低温与回潮条件的当归干燥 Weibull 函数模拟及其干燥特性研究[J]. 中草药, 2019, 50(13): 3052-3057.
- [18] BIAOBRZEWSKI I, MAGDALENA Z, MUJUMDAR A S, et al. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles-Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(19/20): 4704-4716.
- [19] RAMÍREZ C, NU H. Anomalous diffusion based on fractional calculus approach applied to drying analysis of apple slices: The effects of relative humidity and temperature[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(5): e12549.
- [20] 张建文,辛亚男,李斌. 干燥介质温湿度条件对片烟干燥动力学特性的影响[J]. 烟草科技, 2014(10): 15-19.
- [21] LUO G Y, SONG C F, HONGJIE P, et al. Optimization of the microwave drying process for potato chips based on the measurement of dielectric properties[J]. Drying Technology, 2019, 37(11): 1329-1339.

(责任编辑:张震林)