

张 波, 姬长英, 徐伟悦, 等. 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): 1144-1152.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.05.025

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

张 波, 姬长英, 徐伟悦, 蒋思杰, 宋 镇, 程 慧

(南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031)

摘要: 为解决无核厚皮葡萄干燥时间长、干制品生产量低、能耗高等问题, 利用热泵干燥技术, 在不同温湿度阶段变化的干燥工艺下, 研究比较了无核厚皮葡萄在不同预处理(切成两半和正常状态)条件下的干燥特性、品质指标及干燥模型。结果表明: 在 45 ℃、55 ℃、60 ℃、65 ℃阶段升温 and 对应相对湿度分别为 60%、40%、20%、10% 工艺下, 半切处理的葡萄干燥产品综合品质指标最优, 其色泽 L^* 值为 39.52, a^* 值 7.22, b^* 值为 9.12, 复水比 0.33, 感官评分 8.4 分, 硬度值 0.42 N, 维生素 C 含量 4.4 mg/kg。利用 8 种常用干燥模型对半切处理的厚皮葡萄干燥过程数据进行拟合比较, 发现 Page 模型最适合描述半切厚皮葡萄干燥的过程。

关键词: 热泵干燥; 分段干燥; 葡萄; 半切; 品质; 干燥模型

中图分类号: S375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)05-1144-09

Heat-pump stage-changed drying characteristics and product quality in comparison for seedless thick-skinned grapes under different pretreatment conditions

ZHANG Bo, JI Chang-ying, XU Wei-yue, JIANG Si-jie, SONG Zhen, CHENG Hui

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: To solve the drying problem of seedless thick-skinned grapes, such as long drying time, low production of dried grapes and high energy consumption, heat pump drying machine was employed in analyzing the drying characteristics, quality index and drying model for seedless thick-skinned grapes by comparing half-cut and normal ones under stage-changed temperature and humidity conditions. Results showed that under the drying process which was heating-up stage of 45 ℃, 55 ℃, 60 ℃, 65 ℃, while the corresponding relative humidity was 60%, 40%, 20% and 10% respectively, comprehensive quality of the dried half-cut seedless thick-skinned grapes was superior to normal dried grapes, and the color value of L^* was 39.52, a^* value was 7.22, b^* value was 9.12, rehydration rate was 0.33, sensory score was 8.4 and hardness

value was 0.42 N, vitamin C content was 4.4 mg/kg. Finally, eight kinds of commonly-used drying model were adopted to fit and compare drying process data for half cut thick-skinned grapes, and it was found that Page model was the most suitable to describe the drying process of half-cut thick-skinned grapes.

Key words: heat pump drying; stage-changed dr-

收稿日期: 2018-06-01

基金项目: 江苏省科技计划项目(SBE2015310266); 江苏省自然科学基金项目(BK20140729)

作者简介: 张 波(1988-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 主要从事现代农业机械设计理论与方法研究。(E-mail) zhangbo-1965.9.13@163.com

通讯作者: 姬长英, (E-mail) chyji@njau.edu.cn

ying; grape; half-cut; quality; drying model

中国是世界葡萄种植面积最广和产量最高的国家,葡萄营养价值丰富、酸甜可口,含有人体所需的十多种氨基酸及多种果酸,是世界四大水果之一。中国厚皮葡萄主要有巨峰、夏黑、早黑宝等品种,其中巨峰为主栽品种之一,果实穗大,粒大,果肉软甜、多汁,皮、肉易分离,产量较其他品种高^[1-2]。目前,市场上葡萄干主要以薄皮品种葡萄干为主,虽然巨峰葡萄干在市场也有销售,但其价格比前者高且市场占有份额极少,主要是因为巨峰葡萄比其他葡萄品种果实皮厚,干制时间较长,导致成本增加。然而巨峰葡萄产量高却极易变质,从缩短干燥时间角度出发,研究其干燥方法对其产业的发展具有重要意义。

传统的葡萄干制方法主要是自然风干和热风干燥。自然风干费时费力,不利于葡萄的大批量干制生产;热风干燥虽然可以大批量生产,但能耗高,热效率均较低(约为30%~60%),烘干温度过高且不易控制,而果蔬干燥工艺往往要求干燥温度不得超过65℃^[3]。热泵干燥作为一项较新的干燥技术,不仅高效节能,成本相对较低,对环境无污染,可实现干燥介质的温度、湿度、气流速度等准确独立的控制^[4],而且能提高干燥后产品的质量,因此,研究葡萄的热泵干燥技术具有一定的应用意义。

王强等^[5]采用自然晾晒、烘箱干燥和热风对流3种干燥方法对新鲜无核紫葡萄进行干燥,研究了不同干燥方式和温度下的干燥特性和动力学模型。康彦等^[6]发现Parabolic模型更适合描述无核白葡萄的热风干燥特性。Thakur等^[7]对波尔莱特葡萄进行自然风干,采取3种预处理方式,即正常葡萄、切成两半、磨损表皮,发现切成两半的葡萄干燥耗时最短。Doymaz^[8]用苏丹无核小葡萄在烘箱中进行55℃、65℃、75℃的干燥试验,发现预处理液和温度是影响干燥速率的重要因素。前人对葡萄干燥的研究大多是在恒温条件下寻求最适工艺,并没有进行分段工艺的探索研究。而分段控制干燥过程中的试验因素,如温度、湿度等,能加快干燥速度,提高干燥品质,降低能耗^[9]。分段干燥技术在荸荠片^[10]、金银花^[11]、榴莲蜜^[12]等果蔬干燥中已取得成功应用。因此进行葡萄的分段干燥工艺研究十分必要。

本研究将无核厚皮葡萄进行不同的预处理,即切成两半和正常状态,进行分阶段变温变湿干燥工艺的比较试验,研究不同试验条件下两组葡萄的干燥特性和干燥后样品的品质变化,确定较优的工艺参数,为工厂化葡萄干制提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设备及仪器

热泵式果蔬烘干机由徐州市海涛制冷设备有限公司生产,型号LAD-060,尺寸5.0 m×2.3 m×2.5 m,循环风温度范围15~65℃,精度为±2℃,具有2套电加热辅助系统,相对湿度控制精度为±3%,循环风流量4 000 m³/h。恒温水浴箱,常州市金坛文华仪器有限公司产品。电子分析天平,精度0.000 1 g,上海菁海仪器有限公司产品。101-A电热恒温鼓风干燥箱,上海锦昱科学仪器有限公司产品。DZ-320D智能真空保鲜机,东莞市益健包装有限公司产品。JFSD-100粉碎机,上海嘉定粮油仪器有限公司产品。HP-200精密色差仪,上海汉谱光电科技有限公司产品。TMS-PRO食品物性分析仪,北京福德泰和科技有限公司产品。

1.2 试验材料

试验葡萄原料为无核厚皮葡萄,品种巨峰,购买于南京市浦口区向阳桥农贸批发市场,平均直径24.5 mm,置于6~8℃冰箱中冷藏保鲜。采用103℃直接干燥法^[13]测定的葡萄含水率为83.7%(湿基)。

1.3 试验方法

选取大小均匀、成熟度和色泽相近、颗粒饱满的葡萄,去除杂质和茎柄,清水洗净,沥干后进行半切预处理。取一部分葡萄单层均匀地铺在网状托盘上,作为正常葡萄进行试验;另取一部分葡萄进行半切处理,挑选组织完好、无破损的半切葡萄,单层均匀地铺在网状托盘上进行试验。启动热泵干燥机,待干燥室温度、湿度达到设定值时,通过触屏控制面板设定分阶段干燥的温度、湿度值和相应时间。为保证相对湿度能达到初始预设值,事先在干燥室里放置盛有蒸馏水的托盘。葡萄样品称质量后立即放入干燥室,每隔2 h测量1次质量,当葡萄的湿基含水率降到15%^[14-15]时,停

止试验。试验重复 3 次。

根据前期试验结果以及参考文献[16]、[17],选择干燥温度为 45℃、55℃和 65℃。再根据无核厚皮葡萄初始含水率及葡萄干制品含水率要求,将干燥室内的相对湿度划分为 60%、40%、20%和 10%。

在 45℃、55℃和 65℃的单因素预试验中,分析各温度下的干燥特性曲线,发现半切处理葡萄水分比急剧下降区间主要在前 6~8 h 内,其后由于已接近平衡含水率,水分比变化极为缓慢。因此半切处理中选择在前 6 h 内划分相对湿度 60%、40%、20%的分段区间,6 h 后为使葡萄尽快干燥,相对湿度设置为最低值 10%。正常葡萄表皮较厚,水分蒸发缓慢,水分比持续下降的周期较长,主要分布在前 30~35 h 内,在干燥速率曲线的前 14~16 h 内水分比变化斜率明显大于其他区间,因此对于正常葡萄选择在前 14 h 内划分相对湿度 60%、40%、20%的分段区间,其他区间将相对湿度设置成最低值 10%。

在固定相对湿度的预试验中,发现干燥过程中高湿条件下时间不宜持续过长,否则会导致葡萄表皮开裂,影响产品外观品质。综合考虑干燥特性曲线和葡萄表皮开裂因素,半切处理的葡萄干燥过程中相对湿度 60%设定时长为 2 h,相对湿度 40%设定时长 2 h,相对湿度 10%~40%设置一个时长为 2 h 的相对湿度 20%的降湿缓冲区;正常处理的葡萄干燥过程中相对湿度 60%设定时长为 6 h,相对湿度 40%设定时长 6 h,相对湿度 10%~40%设置一个时长为 2 h 的相对湿度 20%的降湿缓冲区。具体试验方案见表 1。表 1 中,试验 1、2、3 均是使干燥室内温度保持不变,降低干燥室内的相对湿度。在温度不变的条件下,增加干燥室内相对湿度,可使干燥介质中的焓值增加,使葡萄快速升温^[18]。因此在干燥前期,选用较大的相对湿度,有利于能耗的降低,但较大的相对湿度会使葡萄内部水分扩散变得缓慢,且物料温度容易过高,从而影响葡萄干制品的最终品质,所以高湿阶段时间不宜设置太长。随着干燥的进行,逐渐降低干燥室内的相对湿度,使得葡萄与干燥介质间存在湿度梯度,有利于葡萄内部水分蒸发,缩短干燥时间。同时葡萄内部水分逐渐蒸发,可减少葡萄内部营养物质损失。

表 1 无核厚皮葡萄热泵式分段干燥试验方案

Table 1 Testing program of heat-pump stage-changed drying of seedless thick-skinned grapes

试验序号	温度 (℃)	相对湿度 (%)	分段干燥时间 (h)	
			半切组	正常组
1	45	60	2	6
		40	2	6
		20	2	2
		10	至结束	至结束
2	55	60	2	6
		40	2	6
		20	2	2
		10	至结束	至结束
3	65	60	2	6
		40	2	6
		20	2	2
		10	至结束	至结束
4	45	60	2	6
	55	40	2	6
	60	20	2	2
	65	10	至结束	至结束

1.4 干燥参数的计算

无核厚皮葡萄的水分比 (Moisture ratio, MR) 的计算公式^[19-21]如下:

$$MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e) \quad (1)$$

式中,MR 为水分比(%), M_t 为葡萄在任意 t 时刻的干基含水率, M_0 为葡萄的初始干基含水率, M_e 为葡萄干燥到平衡时的干基含水率。

干燥速率 (Drying rate, DR) 的计算公式:

$$DR = (M_{t1} - M_{t2}) / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中,DR 为干燥过程中在 t_1 时刻和 t_2 时刻之间的干燥速率 $[g/(g \cdot h)]$, M_{t1} 和 M_{t2} 分别为干燥过程中时间为 t_1 和 t_2 时葡萄的干基含水率。

干基含水率计算公式:

$$M_t = (W_t - W) / W \quad (3)$$

式中, M_t 为干基含水率, W_t 为葡萄在任意 t 时刻的总质量, W 为干物质质量。

1.5 理化指标的测定

1.5.1 色泽 用 HP-200 精密色差仪测量 5 组干燥后葡萄样品表面的 L^* 、 a^* 、 b^* 值^[22-23],每组测量 5 次。

1.5.2 复水比 取 5 组真空包装的干燥葡萄样品,

称取 10 g,放入盛有 100 ml 70 ℃ 蒸馏水的烧杯中,在恒温水浴锅中放置 20 min 后取出,放在干净滤纸上,用吸水纸除去表面水分,称质量^[24-25],测量 5 次。计算公式如下:

$$\text{复水比} = (M_2 - M_1) / M_1 \quad (4)$$

式中, M_1 为复水前葡萄样品质量, M_2 为复水后质量。

1.5.3 硬度 取 5 组干燥后葡萄样品,用 TMS-PRO 食品物性分析仪测定硬度,重复测定 5 次。测定参数设定:探头为 P/2 针状探头,穿透距离 15 mm,测定前探头下降速度 2.0 mm/s,测定中速度 0.5 mm/s,测定后速度 5.0 mm/s。以第 1 次穿透样品时所需最大力表示硬度,单位为 N^[26]。

1.5.4 感官指标 参照葡萄干评价标准^[14-15],对葡萄干口感、气味、组织形态和色泽 4 个指标进行评价,满分 10 分。

1.5.5 维生素 C 含量 采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[27]测定葡萄干燥样品维生素 C 含量。

1.6 干燥模型的拟合比较

选用 8 种常用农产品干燥模型(表 2),对厚皮葡萄干燥试验数据进行拟合,通过比较分析确定最适合描述无核厚皮葡萄烘干过程中水分变化的干燥模型方程。

表 2 常用的农产品干燥模型

Table 2 Common drying models for agricultural products

序号	模型名称	模型方程
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$
4	Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$
5	Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
6	Two-term	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt)$
7	Midilli and Kucuk	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$
8	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

MR 为水分比(%), t 为干燥时间(h), a, b, c, n, k, g 为模型参数。

1.7 数据分析

试验测得的数据主要采用 Excel 和 Matlab 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 温湿度变化对无核厚皮葡萄干燥速率的影响

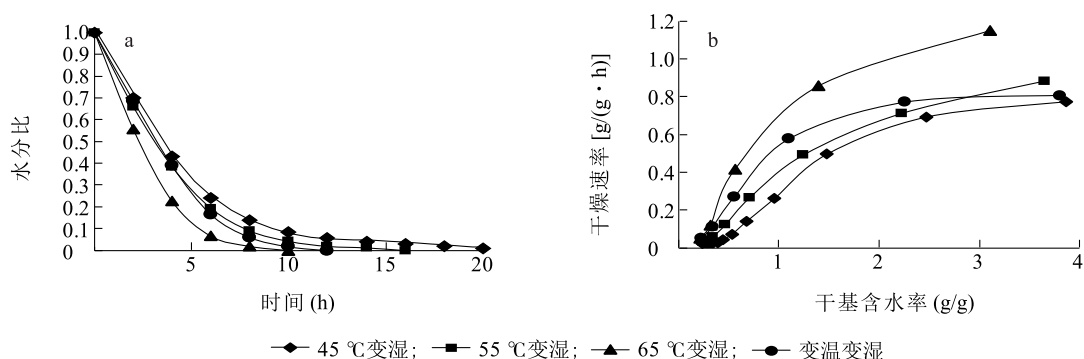
半切厚皮葡萄的干燥特性曲线(图 1)显示,

在前 6~8 h 内水分比急剧下降,干燥至 10 h 时水分比已接近平衡含水量,之后变化极为缓慢。比较 45 ℃、55 ℃、65 ℃ 3 条水分比曲线发现,因湿度变化相同,温度的升高加快了水分比的变化,显著缩短整个干燥过程的时间。在变温变湿条件下干燥时间和水分比变化皆优于 45 ℃、55 ℃ 工艺下的参数,但并不优于 65 ℃ 干燥条件下的参数。

当葡萄干基含水率降到约 1.5 g/g 后,4 种工艺的干燥速率均陡然下降,曲线斜率最大(图 1)。可见从干燥中期至干燥结束,干燥速率随干基含水率变化明显。当干基含水率从初始值降到 1.5 g/g,干燥速率下降缓慢。比较 4 条干燥速率曲线发现,45 ℃、55 ℃、65 ℃ 3 条干燥速率曲线有着共同的特点,即干燥前期干燥速率缓慢下降,后期干燥速率急剧下降。在果蔬干燥前期,由于果蔬本身初始含水率较大而干燥速率高且变化不稳定,即果蔬内部水分向外蒸发扩散速度不断变化,易使干燥后产品的内部结构不均匀和受到破坏^[28-30],严重影响干制产品的品质。而在变温变湿工艺下前期干燥过程中干燥速率下降十分缓慢,这对葡萄内部结构的破坏作用较小,因此变温变湿工艺比其他 3 种恒温变湿工艺更具有优势。

正常无核厚皮葡萄干燥时间要比半切处理的葡萄长数倍(图 2)。在相同温度条件下,45 ℃、55 ℃、65 ℃ 变湿干燥及变温变湿干燥时间分别是半切处理的 3.73、4.25、5.60 和 5.00 倍。干燥时间过长的原因,一方面是由于果皮太厚,葡萄内部水分向外扩散阻力大,另一方面是随着干燥时间推移,葡萄表皮变干变硬,使得水分向外扩散变得更加困难。由此可见,从表皮角度考虑解决无核厚皮葡萄的产品干制问题,是解决市场上一些厚皮葡萄干制品价格高、产量低的根本办法之一。在正常葡萄干燥试验中,随着温度的升高,水分比下降越明显。

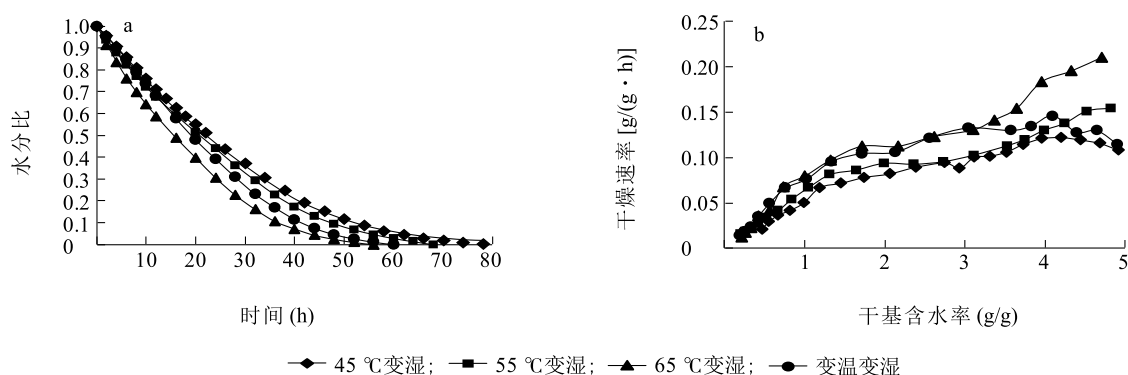
从总体看,随着葡萄干基含水率的减少,正常葡萄的 4 种工艺干燥速率都是以干燥特性曲线斜率增大的趋势缓慢下降,且干燥速率普遍较低(图 2)。干燥速率低、水分蒸发慢,虽然能使葡萄内部营养物质损失减少,但增加了干燥时间和能耗,降低了干燥设备的使用寿命。



a:水分比变化曲线;b:干燥速率变化曲线。

图1 半切无核厚皮葡萄干燥特性曲线

Fig.1 Drying characteristic curves of half-cut seedless thick-skinned grapes



a:水分比变化曲线;b:干燥速率变化曲线。

图2 正常无核厚皮葡萄干燥特性曲线

Fig.2 Drying characteristic curves of seedless thick-skinned grapes

2.2 干燥工艺对厚皮葡萄干燥产品理化指标的影响

不同干燥工艺条件下无核厚皮葡萄干燥产品的品质指标测定结果(表3)表明,正常葡萄干燥样品的感官评分随干燥温度的升高而降低,这是因为随着温度的增加,葡萄表面褐变逐渐明显,表皮硬化现象逐渐严重,使干燥产品的口感和组织形态变差;变温变湿工艺下葡萄干燥样品感官评分最高,这是因为在前期采用较短时间的低温高湿条件,增加干燥介质的焓值,再逐渐升高温度,降低湿度,这样有利于葡萄内水分的快速蒸发,减少了葡萄干物质损失和内部结构的破坏,因此口感、气味和组织形态等品质指标较高。正常厚皮葡萄干燥样品的 L^* 值在 45 °C 变湿、55 °C 变湿、65 °C 变湿 3 种工艺下

变化不大,可见温度的升高对厚皮葡萄干燥产品的 L^* 值影响较小,变温变湿工艺下的 L^* 值优于其他 3 种工艺;45 °C 变湿工艺下 a^* 值较理想,变温变湿工艺次之;4 种工艺的 b^* 值接近。干燥温度越高, V_c 损失越大。变温变湿工艺下 V_c 含量仅次于 45 °C 变湿工艺下 V_c 含量,这是因为 V_c 稳定性差,在高温环境中易降解。正常葡萄干燥样品的复水比都非常小,这可能是因为干燥时间过长,使得葡萄内部组织结构发生了不可逆的破坏,在 4 种工艺中变温变湿和 65 °C 变湿较优。硬度值随着温度的增加而增大,变温变湿工艺下硬度值较小,优于其他 3 种工艺。综合考虑各种品质指标参数,4 种工艺干燥的正常厚皮葡萄中,变温变湿工艺干燥的样品品质最好。

表 3 不同干燥工艺条件下无核厚皮葡萄干燥样品品质

Table 3 Quality of dried seedless thick-skinned grapes under different drying processes

干燥工艺	处理	色泽指标			复水比	感官指标	硬度 (N)	V _C 含量 (mg/kg)
		L* 值	a* 值	b* 值				
45 ℃ 变湿	半切	34.91±0.62	7.00±0.44	6.07±0.35	0.33±0.02	8.1±0.3	0.36±0.07	5.3±0.9
	正常	34.03±0.57	5.05±0.33	-1.64±0.36	0.01±0.01	7.6±0.2	0.56±0.09	3.9±0.5
55 ℃ 变湿	半切	34.04±0.89	7.33±0.63	6.31±0.27	0.29±0.04	7.5±0.2	0.54±0.08	4.1±0.7
	正常	33.39±0.97	6.25±0.59	-1.69±0.31	0.01±0.01	7.1±0.1	0.64±0.11	2.8±1.0
65 ℃ 变湿	半切	33.65±1.07	8.64±0.83	6.62±0.67	0.30±0.05	7.1±0.4	0.66±0.09	3.4±1.1
	正常	32.97±1.22	6.81±0.94	-1.84±0.52	0.02±0.01	6.7±0.5	0.70±0.13	2.1±0.9
变温变湿	半切	35.32±0.67	7.22±0.48	6.12±0.42	0.33±0.03	8.4±0.4	0.42±0.07	4.4±0.8
	正常	34.98±0.59	5.37±0.41	-1.68±0.31	0.02±0.01	8.1±0.3	0.52±0.06	3.2±1.2

半切处理的葡萄干燥样品感官评分同样随温度的升高而降低,变温变湿工艺的干燥样品感官评分最高。 L^* 值在 45 ℃ 变湿、55 ℃ 变湿、65 ℃ 变湿 3 种工艺下差异不明显,变温变湿工艺下 L^* 值优于其他 3 种工艺。 a^* 值除 65 ℃ 变湿工艺下略高外,其他 3 种工艺下数值都很接近。4 种工艺的 b^* 值皆为负值,且数值相近,说明半切处理的葡萄干燥后产品略偏蓝色。4 种工艺干燥样品的复水比差异较小,其中变温变湿和 45 ℃ 变湿工艺的复水比略优。半切葡萄干燥样品的硬度同样随着温度的升高而变大,45 ℃ 变湿和变温变湿工艺下硬度值较小。45 ℃ 变湿工艺下 V_C 含量最高,变温变湿工艺干燥样品的 V_C 含量次之。综合考虑各种品质指标参数,变温变湿工艺得到的半切厚皮葡萄干燥样品品质最好。

在变温变湿工艺条件下,半切葡萄干燥样品的感官评分高于正常葡萄干燥样品,复水比半切处理组葡萄干燥样品远高于正常组,硬度、 V_C 含量及色泽 L^* 、 a^* 、 b^* 值皆是半切处理组干燥样品较优。由此可见,将无核厚皮葡萄切半后再进行干燥,不仅能提高产品的综合品质指标,缩短干燥时间,降低生产成本,同时还可以解决厚皮葡萄的长期贮存问题。

2.3 无核厚皮葡萄干燥模型的确定与验证

厚皮葡萄半切干燥样品的干燥参数和综合品质指标优于正常组,因此这里仅对半切试验组按

照表 2 的干燥模型进行拟合。通过比较分析各模型拟合方程的决定系数(R^2)、残差平方和(SSE)及均方根误差($RMSE$)值,确定最适合半切厚皮葡萄干燥过程的数学模型(表 4)。 R^2 值越大、残差平方和(SSE)及均方根误差($RMSE$)值越小,则干燥模型越优。对各个温湿度试验条件下的 8 个干燥模型(表 4)进行比较分析,发现在 4 组试验条件下,Page 模型 R^2 最大、 SSE 和 $RMSE$ 最小,说明 Page 模型拟合度优于其他 7 个干燥模型,更适用于描述半切厚皮葡萄在热泵干燥过程中的水分变化规律,其 R^2 范围为 0.971 1~0.989 0, SSE 范围为 0.010 09~0.010 97, $RMSE$ 范围为 0.010 63~0.019 98,这表明半切厚皮葡萄的干燥特性与 Page 模型最符合,与 Doymaz^[31] 的研究结果一致。

为验证所选干燥模型的准确性,选取模型拟合外的试验数据与模型预测值进行比较。选择 55 ℃ 变湿、65 ℃ 变湿和变温变湿 3 组工艺进行半切葡萄干燥试验,测量 30 min、60 min、90 min、150 min 时样品的水分比(MR),与模型预测值对比验证。结果(表 5)表明,模型预测值和试验值几乎一致。在所选验证试验中,55 ℃ 变湿工艺的试验值和模型预测值最大相对误差为 4.29%,65 ℃ 变湿工艺的试验值和模型预测值最大相对误差为 4.28%,变温变湿工艺的试验值和模型预测值最大相对误差为 3.04%。说明试验值和模型预测值有较高的拟合度,Page 模型能准确地描述半切厚皮葡萄的干燥规律。

表 4 半切厚皮葡萄干燥模型拟合结果

Table 4 Drying models fitting results for half-cut thick-skinned grapes

试验条件	模型	模型参数值	决定系数 (R^2)	残差平方和 (SSE)	均方根误差 ($RMSE$)
45 °C 变湿	Lewis	$k=0.225\ 6$	0.916 1	0.041 38	0.119 96
	Page	$k=0.175\ 4, n=1.149\ 0$	0.971 1	0.013 10	0.019 98
	Logarithmic	$k=0.224\ 2, a=1.028\ 0, c=-0.008\ 7$	0.956 9	0.021 50	0.059 72
	Parabolic	无法拟合			
	Henderson and Pabis	$k=0.230\ 1, a=1.022\ 0$	0.936 6	0.033 78	0.079 44
	Two-term	$k=0.230\ 1, a=0.200\ 7, b=0.821\ 4, g=0.230\ 0$	0.906 6	0.043 78	0.121 73
	Midilli and Kucuk	无法拟合			
	Wang and Singh	$a=-0.133\ 9, b=0.004\ 2$	0.943 7	0.023 04	0.079 40
55 °C 变湿	Lewis	$k=0.243\ 3$	0.945 9	0.024 38	0.042 40
	Page	$k=0.141\ 9, n=1.331\ 0$	0.987 0	0.010 97	0.011 76
	Logarithmic	$k=0.214\ 9, a=1.083\ 0, c=-0.060\ 4$	0.963 2	0.016 95	0.034 04
	Parabolic	$a=0.977\ 1, b=-0.158\ 3, c=0.006\ 2$	0.952 5	0.017 64	0.035 68
	Henderson and Pabis	$k=0.250\ 6, a=1.036\ 0$	0.927 4	0.042 83	0.092 82
	Two-term	$k=0.236\ 3, a=-12.610\ 0, b=13.640\ 0, g=0.237\ 4$	0.927 6	0.042 66	0.090 31
	Midilli and Kucuk	无法拟合			
	Wang and Singh	$a=-0.163\ 7, b=0.006\ 5$	0.911 7	0.048 43	0.104 71
65 °C 变湿	Lewis	$k=0.360\ 2$	0.908 0	0.059 44	0.113 45
	Page	$k=0.224\ 5, n=1.376\ 0$	0.989 0	0.010 09	0.010 63
	Logarithmic	$k=0.304\ 2, a=1.088\ 0, c=-0.076\ 2$	0.935 1	0.033 84	0.085 78
	Parabolic	$a=0.988\ 7, b=-0.242\ 1, c=0.014\ 5$	0.956 4	0.022 79	0.060 51
	Henderson and Pabis	$k=0.366\ 1, a=1.021\ 0$	0.918 6	0.048 95	0.107 30
	Two-term	$k=0.179\ 5, a=-2.146\ 0, b=3.158\ 0, g=0.223\ 8$	0.955 3	0.022 93	0.068 25
	Midilli and Kucuk	$k=0.227\ 0, a=0.999\ 8, n=1.359\ 0, b=-0.000\ 6$	0.977 9	0.016 05	0.015 04
	Wang and Singh	$a=-0.246\ 1, b=0.014\ 8$	0.906 2	0.060 95	0.117 15
变温变湿	Lewis	$k=0.285\ 9$	0.927 3	0.042 38	0.098 42
	Page	$k=0.232\ 9, n=1.138\ 0$	0.980 1	0.010 14	0.010 83
	Logarithmic	$k=0.266\ 9, a=1.036\ 0, c=-0.029\ 0$	0.949 0	0.020 87	0.073 22
	Parabolic	$a=0.949\ 8, b=-0.174\ 2, c=0.007\ 9$	0.914 6	0.048 42	0.101 81
	Henderson and Pabis	$k=0.289\ 2, a=1.013\ 0$	0.947 5	0.022 17	0.079 03
	Two-term	$k=0.228\ 7, a=-6.617\ 0, b=7.631\ 0, g=0.235\ 8$	0.938 5	0.031 29	0.087 92
	Midilli and Kucuk	$k=0.235\ 4, a=1.000\ 0, n=1.125\ 0, b=-0.000\ 3$	0.930 9	0.035 11	0.085 34
	Wang and Singh	$a=-0.187\ 5, b=0.008\ 6$	0.900 6	0.056 98	0.123 20

表 5 Page 模型拟合方程参数及验证结果

Table 5 Parameters of equations and validation results of Page model

工艺条件	模型参数	干燥时间 (min)	水分比试验值	水分比理论值	绝对误差 (%)	相对误差 (%)
55 ℃ 变湿	$k=0.141\ 9, n=1.331$	30	0.924 1	0.945 2	2.11	2.56
		60	0.885 1	0.867 7	1.74	1.97
		90	0.819 1	0.783 9	3.52	4.29
		150	0.634 8	0.618 5	1.63	2.57
65 ℃ 变湿	$k=0.224\ 5, n=1.376$	30	0.905 8	0.917 1	1.13	1.25
		60	0.770 3	0.798 9	2.86	3.71
		90	0.705 8	0.675 6	3.02	4.28
		150	0.471 0	0.452 9	1.81	3.84
变温变湿	$k=0.232\ 9, n=1.138$	30	0.967 2	0.949 6	1.76	1.82
		60	0.885 2	0.862 2	2.30	2.60
		90	0.782 7	0.771 1	1.16	1.48
		150	0.569 2	0.586 5	1.73	3.04

3 结 论

分析比较半切无核厚皮葡萄和正常无核厚皮葡萄的干燥特性曲线,发现在同样温湿度干燥工艺条件下,半切组比正常组节省数倍干燥时间。因此,从表皮处理角度考虑无核厚皮葡萄的产品干制问题,可解决市场上一些厚皮品种葡萄干制品价格高、生产量低的问题。

对无核厚皮葡萄半切组和正常组的干燥产品品质指标进行比较分析,结果表明各组葡萄干燥样品在变温变湿工艺条件下的综合品质指标最好,且半切厚皮葡萄干燥样品的品质优于正常厚皮葡萄干燥样品的品质,其色泽 L^* 值为 35.32, a^* 值 7.22, b^* 值为 6.12,复水比 0.33,感官评分 8.4 分,硬度值 0.42 N,维生素 C 含量 4.4 mg/kg。因此,在厚皮葡萄的干燥生产中,若采用切半处理,可得到品质更优的产品,同时能耗更低,干燥时间更短。

通过分析 8 种干燥模型的 R^2 、 SSE 和 $RMSE$ 值,发现 Page 模型最符合半切厚皮葡萄的干燥特性,可较准确地预测无核厚皮葡萄干燥生产中含水率的变化,为干燥过程的优化和控制提供理论依据。

参考文献:

[1] 尹克林. 葡萄品种分类及命名[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2000(4):63-65.

[2] 周晓芳,张福庆,刘建福,等. 我国玫瑰香葡萄品种栽培技术研究进展[J]. 天津农业科学,2014,20(6):97-102.

[3] 宗文雷,于沛沛,姜启兴,等. 热泵干燥生产脱水蔬菜的技术优势分析[J]. 江西农业学报,2010,22(5):133-134,158.

[4] 王益强. 热泵干燥技术在脱水蔬菜加工中的应用[J]. 现代制造技术与装备,2016(9):114-115.

[5] 王 强,邓朝芳,任彦荣,等. 无核紫葡萄干燥特性及其总酚含量变化研究[J]. 食品科学,2016(5):62-66.

[6] 康 彦,关志强,李 敏,等. 预处理对无核白葡萄热风干燥特性的影响[J]. 食品科学,2014(5):119-123.

[7] THAKUR A K, SAHARAN V K, GUPTA R K. Drying of 'Perlette' grape under different physical treatment for raisin making [J]. Journal of Food Science and Technology,2010,47(6):626-631.

[8] DOYMAZ I. Effect of pretreatment solution on drying and color characteristics of seedless grapes[J]. Food Science & Biotechnology, 2012, 21(1):43-49.

[9] 王庆惠,李忠新,杨劲松,等. 圣女果分段式变温变湿热风干燥特性[J]. 农业工程学报,2014,30(3):271-276.

[10] 胡晓浩,余顺火,王泽南,等. 荸荠片分段变温干燥加工工艺[J]. 食品研究与开发,2007,28(9):85-87.

[11] 肖宏儒,王立富,吴家兵. 微波干燥技术在金银花烘干中的应用研究[J]. 食品科学,2001,1(5):41-43.

[12] CHONG C H, LAW C L. 榴莲蜜变温间歇干燥[J]. 干燥技术与设备,2013(1):23-42.

[13] 北京农工大食品工程系. 食品中水分的测定:GB 5009.3-2010[S]. 北京,中华人民共和国卫生部,2010.

[14] 农业部食品质量监督检验测试中心(湛江). 绿色食品干果:NYT1041-2010[S]. 北京,中华人民共和国农业部,2010.

[15] 农业部食品质量监督检验测试中心(石河子). 无核葡萄干:

- NYT705-2003[S]. 北京, 中华人民共和国农业部, 2003.
- [16] 张利娟, 师俊玲. 无核白葡萄热风干燥过程中总酚与抗氧化活性的变化[J]. 食品科学, 2013(5): 55-59.
- [17] 张英丽. 无核紫葡萄太阳能干燥技术的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2009.
- [18] 堵劲松, 王宏生, 王 兵, 等. 温湿度对白肋烟处理质量的影响[J]. 中国烟草学报, 2001, 7(3): 1-5.
- [19] 杨文侠, 高振江, 谭红梅, 等. 气体射流冲击干燥无核紫葡萄及品质分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 237-242.
- [20] PAHLAVANZADEH H, BASIRI A, ZARRABI M. Determination of parameters and pretreatment solution for grape drying[J]. Drying Technology, 2001, 19(1): 217-226.
- [21] 白峻文. 无核白葡萄干燥动力学及防褐变机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [22] 曾绍校, 梁 静, 郑宝东, 等. 不同干燥工艺对莲子品质的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 227-231.
- [23] 何学连. 白对虾干燥工艺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [24] 关志强, 郑立静, 李 敏, 等. 罗非鱼片热泵-微波联合干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2012, 1(28): 270-274.
- [25] NANTAWAN T. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen)[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(3): 482-489.
- [26] 毕金峰, 方 蕾, 丁媛媛. 菠萝变温压差膨化干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 334-339.
- [27] 江苏省农科院综合实验室. 水果、蔬菜维生素 C 含量测定法(2,6-二氯酚滴定法): GB/T 6195-1986[S]. 北京, 国家标准局, 1986.
- [28] 郭玲玲, 周林燕, 毕金峰. 香菇中短波红外干燥工艺优化[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 44-51.
- [29] 吕 健. 响应面法优化桃变温压差膨化干燥工艺[J]. 中国食品学报, 2014, 14(6): 110-119.
- [30] 李兆路, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 桑椹脆果热风-变温压差膨化联合干燥工艺[J]. 中国食品学报, 2016, 16(2): 173-180.
- [31] DOYMAZ I. Drying kinetics of black grapes treated with different solutions [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(2): 212-217.

(责任编辑: 张震林)