

超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺优化

Optimization of the infrared drying process for ultrasonic pretreatment of Hami-melon slices

李义臻^{1,2} 郑霞^{1,2} 姚雪东^{1,2} 杨涛庆^{1,2} 张继凯^{1,2}

LI Yi-can^{1,2} ZHENG Xia^{1,2} YAO Xue-dong^{1,2} YANG Tao-qing^{1,2} ZHANG Ji-kai^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000;

2. 农业部西北农业装备重点实验室, 新疆 石河子 832000)

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi,

Xinjiang 832000, China; 2. Ministry of Agriculture in Northwest China Key

Laboratory of Agricultural Equipment, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

摘要:目的:优化哈密瓜片红外干燥工艺,提质增效。方法:利用超声处理作为预处理方式,研究干燥温度、切片厚度和超声处理时间对干燥时间、色差值、维生素 C 含量的影响,并对其产品与未经超声处理产品的干燥时间、品质和微观结构进行对比分析。结果:超声预处理哈密瓜片红外干燥的最佳工艺参数为干燥温度 61 ℃、切片厚度 6 mm、超声处理时间 15 min,此条件下干燥时间为 115 min、色差值为 13.79、维生素 C 含量为 112.1 mg/100 g。相较于未经处理的产品,干燥时间缩短了 45.24%,色差减小了 13.38%,维生素 C 含量提高了 16.71%。微观结构显示超声波引起哈密瓜片内部组织膨胀和收缩,呈多孔道结构。结论:超声处理可作为改善哈密瓜片红外干燥的预处理方式,实现干燥过程的提质增效。

关键词:红外干燥;超声处理;哈密瓜;色差;维生素 C

Abstract: Objective: This study aimed to the optimize infrared drying process of Hami-melon slices and improve quality and efficiency. **Methods:** Using ultrasonic treatment as a pretreatment method, the effects of drying temperature, slice thickness and ultrasonic treatment time on drying time, color difference value and vitamin C content were studied, and the drying time, quality and microstructure of the products were compared with those without ultrasonic treatment. **Results:** The optimal process parameters of ultrasonic pretreatment for infrared drying of

Hami-melon slices were drying temperature 61 ℃, slice thickness 6 mm and ultrasonic treatment time 15 min. Under the control of these conditions, the drying time was 115 min, the color difference value was 13.79, and the vitamin C content was 112.1 mg/100 g. Compared with the untreated products, the drying time was shortened by 45.24%, the color difference was reduced by 13.38%, and the vitamin C content was increased by 16.71%. The microstructure showed that ultrasonic waves caused the expansion and contraction of the internal tissue of Hami-melon slices, and the structure was multi-channel. **Conclusion:** Ultrasonic treatment can be used as a pretreatment method to improve the infrared drying of Hami-melon slices, thereby improve the quality and efficiency of the drying process.

Keywords: infrared drying; ultrasonic processing; Hami-melon; color difference; vitamin C

目前,如何降低干燥过程中物料的营养物质损失、提升产品品质是干燥行业所面临的主要问题,而超声波处理等预处理技术已成为提高干制品品质的主流方法^[1]。Gabriella 等^[2]指出经超声处理的甜瓜水分扩散率增加约 25%,干燥过程缩短了 12.80%。孟繁博等^[3]研究发现,超声处理能有效缩短火龙果干燥时间,同时减少产品的收缩率,降低色差,提升品质。张振亚等^[4]研究发现,经超声处理后的菠萝片干燥时间至少缩短 30%,色泽、形态等品质显著提升。周颀等^[5]研究发现经超声处理后,苹果的真空冷冻干制品 V_C 含量更高,同时色差减少,干燥过程缩短了 22%。陈文敏等^[6]利用红外联合超声处理干制红枣时发现,物料表面产生了大量裂缝,为水分扩散提供大量的通道,从而缩短干燥时间。在果蔬干制加工方面,超声波因其产生的空化效应,获得了越来越多的

基金项目:石河子大学成果转化与技术推广计划项目(编号:CGZH201808);国家自然科学基金项目(编号:31960488)

作者简介:李义臻,男,石河子大学在读硕士研究生。

通信作者:郑霞(1969—),女,石河子大学教授,硕士生导师。

E-mail: 124899256@qq.com

收稿日期:2022-07-22 **改回日期:**2022-10-13

应用^[7-8]。

哈密瓜采收期集中,采摘、储运等环节易受机械损伤导致微生物感染,并且新鲜哈密瓜水分含量高,很容易腐烂变质。哈密瓜干制是解决上述问题的重要手段之一,而红外干燥技术,干燥速率快、污染小、设备的建造相对简便,非常适合用于以薄片形式进行干燥的物料^[9]。但目前国内外对于超声预处理联合红外干燥干制哈密瓜片的研究较少,尚缺乏相关报道。研究拟利用超声处理作为哈密瓜片红外干燥的预处理方式,运用响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计试验优化工艺参数,研究干燥温度、切片厚度、超声处理时间对产品干燥时间、色差值、维生素 C 含量的影响,并对其干制品与未经超声处理的干制品的干燥特性、品质和微观结构进行对比研究,为哈密瓜干燥过程的提质增效提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

哈密瓜:西州蜜 17 号,初始含水率为 (90.81 ± 0.85)% ,市售。

1.2 仪器与设备

中短波红外干燥箱(图 1):SAK-ZG-W0700 型,功率 0~2 kW,江苏圣泰科有限公司;

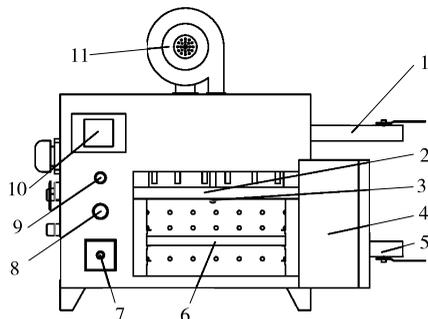
电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9070A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

电子天平:BSM-4200.2 型,上海卓精电子科技有限公司;

色差仪:SMY-2000SF 型,北京盛名扬科技发展有限公司;

场发射扫描电子显微镜:SU8010 型,日立 Hitachi 公司;

超声波清洗机:KQ2200DA 型,昆山市超声仪器有限公司。



1. 排湿口 2. 红外管 3. 温度传感器 4. 门 5. 排湿口 6. 物料网盘 7. 调风旋钮 8. 风机开关 9. 加热开关 10. 显示屏 11. 风机

图 1 红外干燥箱

Figure 1 Infrared dryer

1.3 方法

1.3.1 工艺流程

哈密瓜→拣选→冷藏(4 ℃冰柜,使水分分布均匀)→去皮、瓢→切片→超声处理→红外干燥→封装→检测

操作要点:选择大小适中、无病虫害、表皮完好的哈密瓜,清洗去皮、瓢、头尾,从内向外切成长 6 cm、宽 3 cm、厚度均匀的薄片。取(200±2) g 样品,于 25 ℃去离子水中进行超声处理(200 W,40 kHz),用厨房纸去除切片表面多余的水,备用^[3,10]。

1.3.2 单因素试验

(1) 干燥温度:固定切片厚度 7 mm,超声处理时间 15 min,考察干燥温度(50,55,60,65,70 ℃)对哈密瓜片干燥特性和品质的影响。

(2) 切片厚度:固定干燥温度 60 ℃,超声处理时间 15 min,考察切片厚度(4,7,10 mm)对哈密瓜片干燥特性和品质的影响。

(3) 超声处理时间:固定干燥温度 60 ℃,切片厚度 7 mm,考察超声处理时间(5,10,15,20,25 min)对哈密瓜片干燥特性和品质的影响。

1.3.3 响应面优化设计 在单因素试验基础上,运用 Box-Behnken 中心组合设计原理,以干燥温度、切片厚度、超声处理时间为自变量,考察其与干燥时间、色差值、维生素 C 含量的关系^[11]。

1.3.4 含水率测定 按式(1)、式(2)计算哈密瓜片含水率^[12]。

$$W_t = \frac{m_t - m_d}{m_t} \times 100\%, \quad (1)$$

$$w_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

W_t, w_t ——干燥 t 时刻的湿基含水率和干基含水率,%;

m_t ——干燥 t 时刻哈密瓜片的质量,g;

m_d ——哈密瓜片的绝干质量,g。

1.3.5 水分比测定 干燥过程中,物料中的水含量用水分比(MR)来表示,并按式(3)计算^[12]。

$$M_R = \frac{w_t - w_e}{w_0 - w_e}, \quad (3)$$

式中:

M_R ——哈密瓜片的水分比;

w_0, w_e, w_t ——哈密瓜片初始、平衡时和干燥 t 时刻的干基含水率,%。

由于哈密瓜片的平衡含水率 w_e 远小于 w_0 和 w_t ,所以式(3)可简化为^[12]

$$M_R = \frac{w_t}{w_0}. \quad (4)$$

1.3.6 色泽测定 根据文献^[13],按式(5)计算色泽差异值 ΔE 。

$$\Delta E = \sqrt{(L-L_0)^2 + (a-a_0)^2 + (b-b_0)^2}, \quad (5)$$

式中:

L, a, b ——干制品明亮度、红绿值、蓝黄值;

L_0, a_0, b_0 ——鲜样样品明亮度、红绿值、蓝黄值。

1.3.7 维生素 C 含量测定 根据文献[14]并修改,维生素 C 含量(湿基)以每 100 g 哈密瓜干制品中维生素 C 的毫克数表示。

1.3.8 微观组织结构扫描电镜观察 根据文献[14]。

1.4 统计分析

采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(ANOVA)方法进行差异显著性分析。采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 干燥温度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响 由图 2 可知,干燥时间随干燥温度的升高而减少。干燥温度为 70 °C 时的干燥时间比 50 °C 的缩短了 63.64%。干燥温度升高,物料表面温度也随之迅速升高,传热传质动

力增强,加速了物料内水分的迁移、扩散与蒸发^[15]。哈密瓜片在有氧环境下进行加热干燥时,会导致热敏性的维生素 C 损失,同时会产生酶促、非酶促反应,导致褐变^[16]。不同产品的色差值为 13.98~21.95,维生素 C 含量为 93.15~119.46 mg/100 g。当干燥温度为 50~60 °C 时,随着干燥温度的升高,色差值逐渐减小,维生素 C 含量逐渐增加。干燥时间越短,色泽保持越好,维生素 C 保留率越高。当干燥温度 >60 °C 时,随着干燥温度的升高,色差值逐渐增大,维生素 C 含量逐渐减少。干燥温度过高或长时间低温干燥,均会导致物料的色差增大、维生素 C 损失严重^[17]。当干燥温度为 60 °C 时,色差值较小,为 13.98;维生素 C 含量较高,为 119.46 mg/100 g。

2.1.2 切片厚度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响 由图 3 可知,干燥时间受切片厚度的影响较大,切片厚度越大,干燥时间越长。切片厚度增加,物料内水分向表面扩散的阻力也随之增加,从而延长了干燥时间^[18]。不同产品的色差值为 13.98~19.45。切片厚度较薄,预处理可能会导致哈密瓜片中色素物质损失,不利于干燥过程中色泽的保持^[10]。切片厚度较厚,干燥时间延长,使哈密瓜片

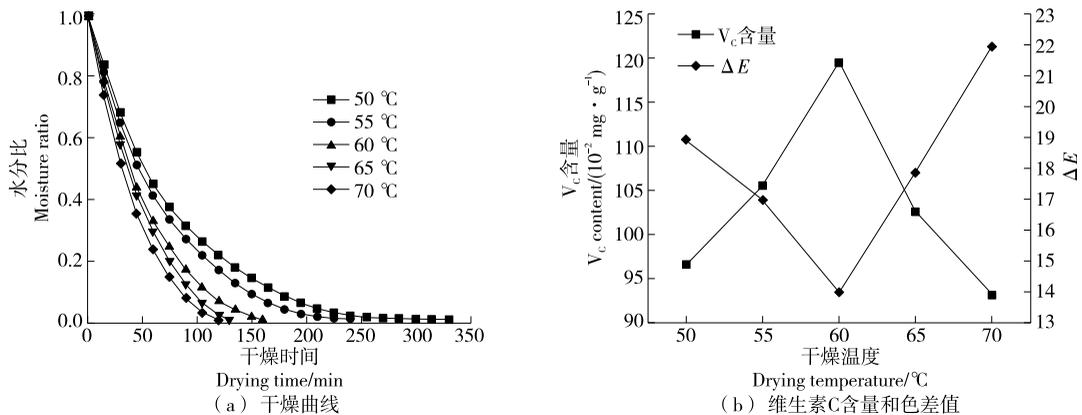


图 2 干燥温度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

Figure 2 Effects of drying temperature on drying characteristics and quality of Hami-melon slices

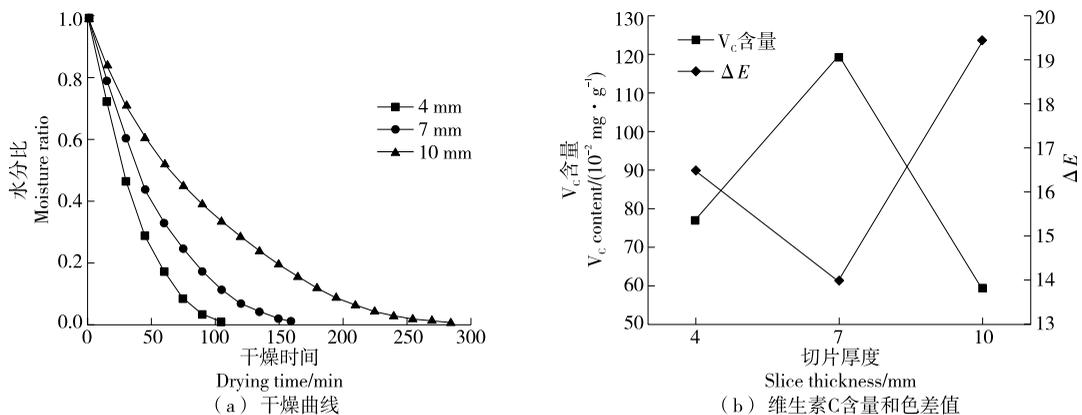
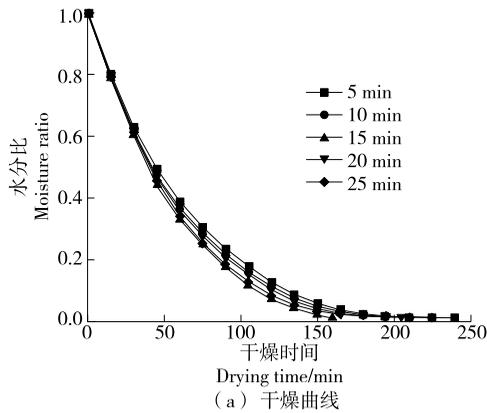


图 3 切片厚度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

Figure 3 Effects of slice thickness on drying characteristics and quality of Hami-melon slices

褐变严重,色差增大。当切片厚度为 7 mm 时,色差值较小,为 13.98。维生素 C 含量随切片厚度的增大先增加后减少。当切片厚度为 4 mm 时,干燥时间虽短,但会造成维生素 C 损失较多,含量较少(77.41 mg/100 g)^[19]。之后随着切片厚度的增大,维生素 C 含量增加,当切片厚度为 7 mm 时,维生素 C 含量较高,为 119.46 mg/100 g。当切片厚度 > 7 mm 时,干燥时间延长,影响了维生素 C 的保留,当切片厚度为 10 mm 时,维生素 C 含量最少,为 59.22 mg/100 g。



2.1.3 超声处理时间对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

由图 4 可知,超声波的空化效应可引起哈密瓜片内部组织膨胀和收缩,形成细胞微通道,使其结构疏松多孔,有利于内部水分的扩散与蒸发^[20]。超声处理时间过长则会破坏哈密瓜片本身的组织结构及营养成分。适当时间的超声处理可以加快干燥过程中内部水分的扩散与蒸发,加速干燥过程,提升产品质量^[21]。当超声处理时间为 15 min 时,干燥时间为 160 min,色差值较小为 13.98,维生素 C 含量较高为 119.46 mg/100 g。

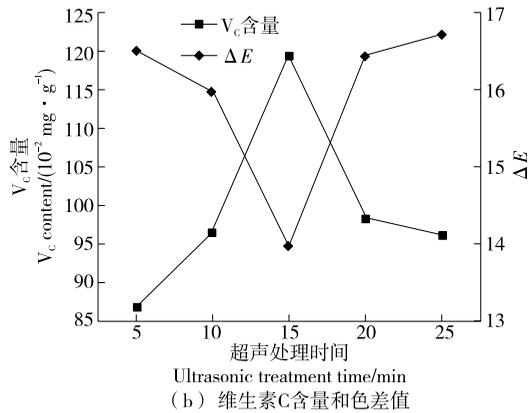


图 4 超声处理时间对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

Figure 4 Effects of ultrasonic treatment time on drying characteristics and quality of Hami-melon slices

2.2 响应面实验

2.2.1 响应面实验设计和回归方程分析 以干燥温度、切片厚度和超声处理时间为影响因素,以干燥时间、色差值和维生素 C 含量为响应指标,根据 Box-Behnken 中心组合原理设计三因素三水平的响应面实验优化超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺,试验因素与水平见表 1,试验设计与结果见表 2。

通过 Box-Behnken 试验拟合得出超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺的回归方程为:

$$Y_1 = 160.8 - 39.63X_1 + 106.88X_2 - 8.75X_3 - 4.25X_1X_2 - X_1X_3 - 4.5X_2X_3 + 21.47X_1^2 + 23.97X_2^2 + 54.23X_3^2, \quad (6)$$

$$Y_2 = 13.92 + 0.44X_1 + 1.5X_2 + 0.15X_3 - 0.018X_1X_2 - 0.053X_1X_3 - 0.027X_2X_3 + 4X_1^2 + 3.57X_2^2 + 2.07X_3^2, \quad (7)$$

$$Y_3 = 119.36 - 1.24X_1 - 7.86X_2 + 1.09X_3 - 0.18X_1X_2 - 0.21X_1X_3 - 0.3X_2X_3 - 22.1X_1^2 - 47.36X_2^2 - 22.32X_3^2. \quad (8)$$

表 1 试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of the test

水平	X ₁ 干燥温度/°C	X ₂ 切片厚度/mm	X ₃ 超声处理时间/min
-1	55	4	10
0	60	7	15
1	65	10	20

表 2 响应面实验设计与结果

Table 2 Design and results of response surface test

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	干燥时间 Y ₁ /min	色差值 Y ₂	维生素 C 含量 Y ₃ / (10 ⁻² mg · g ⁻¹)
1	-1	-1	0	134	19.53	58.85
2	1	-1	0	65	20.46	56.65
3	-1	1	0	356	22.57	43.51
4	1	1	0	270	23.43	40.59
5	-1	0	-1	284	19.25	75.12
6	1	0	-1	205	20.23	73.14
7	-1	0	1	270	19.86	77.16
8	1	0	1	187	20.63	74.35
9	0	-1	-1	137	17.98	55.87
10	0	1	-1	360	21.03	40.75
11	0	-1	1	127	18.15	59.21
12	0	1	1	332	21.09	42.88
13	0	0	0	161	14.01	119.49
14	0	0	0	160	13.84	118.97
15	0	0	0	160	13.98	119.46
16	0	0	0	164	13.97	119.45
17	0	0	0	159	13.82	119.44

由表 3 可知,回归模型 P 值 $<0.000 1$,极显著;失拟项 P 值为 0.49,不显著,说明试验误差小;干燥时间回归方程的 R^2 为 0.999 8,代表拟合度达到 99.98%,能较好地预测干燥时间;色差值、维生素 C 含量回归方程的 R^2 均高达 0.999 以上,均能较好地预测色差值和维生素 C 含量^[11,22]。各因素对干燥时间的影响程度从大到小为切片厚度、干燥温度、超声处理时间且 $X_3^2 > X_2^2 > X_1^2$;对色差值的影响程度从大到小为切片厚度、干燥温度、超声处理时间且 $X_1^2 > X_2^2 > X_3^2$;对维生素 C 含量的影响程度从大到小为切片厚度、干燥温度、超声处理时间且 $X_2^2 > X_3^2 > X_1^2$ 。

表 3 各指标回归模型方程分析

Table 3 Analysis of regression model equation of each index

指标	F 值	P 值	失拟项		校正决定系数 R^2
			F_{Li} 值	P_{Li} 值	
干燥时间 Y_1	3 742.83	$<0.000 1$	0.97	0.490	0.999 8
色差值 Y_2	1 265.56	$<0.000 1$	3.33	0.138	0.999 4
维生素 C 含量 Y_3	1 4562.62	$<0.000 1$	4.34	0.095	0.999 9

2.2.2 工艺参数优化与验证 利用 Design-Expert 软件中的优化程序设定参数,根据表 1 试验因素设定取值范围,维生素 C 含量目标参数要求为 maximize,干燥时间、色差值目标参数要求为 minimize,以干燥时间、色差值和维生素 C 含量为响应指标,得到优化工艺参数:超声处理时间 15.13 min、干燥温度 60.56 °C、切片厚度 5.75 mm。为进一步验证回归方程的准确性和有效性,在最佳工艺条件下进行 3 次平行验证实验,为便于操作,对各工艺参数取整,即超声处理时间为 15 min、干燥温度为 61 °C、切片厚度为 6 mm,该条件下的干燥时间为 115 min,与预测值相对误差为 1.11%;色差值为 13.79,与预测值相对误差为 1.74%;维生素 C 含量为 112.1 mg/100 g,与预测值相对误差为 1.69%,表明试验所得模型优化出的工艺参数可靠。

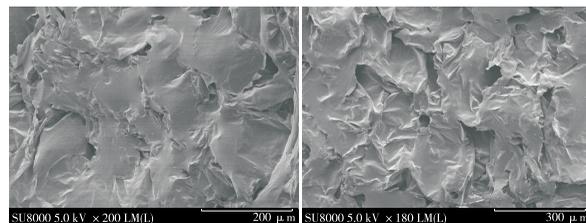
2.2.3 干燥时间及品质对比 对经工艺优化后得到的超声处理产品与未经超声处理产品(干燥温度 61 °C、切片厚度 6 mm)的干燥时间和品质进行对比,结果见表 4。由表 4 可知,超声处理产品相较于未处理的产品,干燥时间缩短了 45.24%,色差减小了 13.38%,维生素 C 含量提高了 16.71%。

表 4 不同产品的干燥时间和品质对比

Table 4 Drying time and quality comparison of different products

预处理方式	干燥时间/ min	色差值	维生素 C 含量/ (10^{-2} mg · g ⁻¹)
对照组	210	15.92	96.05
超声处理	115	13.79	112.10

由图 5 可知,未经超声处理的产品组织结构致密,孔道结构较少。超声处理产品的结构疏松、细胞塌陷,出现多孔道结构。这是由于预处理时,超声波的空化效应引起了哈密瓜片内部组织膨胀和收缩,形成了细胞微通道,有利于干燥时内部水分的扩散与蒸发^[23-26]。



(a) 对照组 (b) 超声处理

图 5 超声处理对哈密瓜片微观结构的影响

Figure 5 Effects of ultrasonic treatment on microstructure of Hami-melon slices

3 结论

以干燥时间、色差值、维生素 C 含量为指标研究了干燥温度、切片厚度、超声处理时间对哈密瓜片红外干燥的影响。结果表明,各因素对哈密瓜片红外干燥过程影响显著,超声处理作为一种预处理方式可有效改善干燥过程、提高品质;超声波可引起哈密瓜片内部组织膨胀和收缩,形成细胞微通道,出现多孔道结构,有助于干燥时哈密瓜片内部水分的扩散与蒸发。超声预处理哈密瓜片红外干燥的最优工艺参数为干燥温度 61 °C、切片厚度 6 mm、超声处理时间 15 min,该条件下干燥时间为 115 min,色差值为 13.79,维生素 C 含量为 112.1 mg/100 g,与模型预测值接近,表明试验所得模型优化出的工艺参数可靠。对于超声处理红外干燥工艺的能耗及成本等问题还需进一步研究探讨。

参考文献

[1] 石晓微,刘云宏.超声—远红外辐射干燥对香蕉片品质的影响[J].食品与机械,2021,37(1):204-209.
SHI X W, LIU Y H. Effect of ultrasonic-far infrared radiation drying on the quality of banana slices[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 204-209.

[2] GABRIELLA D D S, BARROS Z M P, DE MEDEIROS R A B, et al. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 74: 114-119.

[3] 孟繁博,黄道梅,郑秀艳,等.超声波预处理对热风干燥火龙果片品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(13):205-209.
MENG F B, HUANG D M, ZHENG X Y, et al. Ultrasound pretreatment on quality of pitaya before hot air drying[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 205-209.

[4] 张振亚,韩球丛,金听祥,等.超声预处理对热泵干燥菠萝品质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(12):111-116.
ZHANG Z Y, HAN L C, JIN T X, et al. Experimental study on the

- effect of ultrasonic pretreatment on quality of pineapple dried by heat pump[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(12): 111-116.
- [5] 周嶂, 孙艳辉, 蔡华珍, 等. 超声波预处理对苹果片真空冷冻干燥过程的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(22): 282-286.
ZHOU D, SUN Y H, CAI H Z, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on vacuum freeze drying process of apple slices[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(22): 282-286.
- [6] 陈文敏, 彭星星, 马婷, 等. 超声处理对中短波红外干燥红枣时间及品质的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(8): 74-80.
CHEN W M, PENG X X, MA T, et al. Impact of ultrasonic treatment on drying time and quality of red jujubes dried by medium- and short-wavelength infrared radiation[J]. *Food Science*, 2015, 36(8): 74-80.
- [7] SANTACATALINA J V, CONTRERAS M, SIMAL S, et al. Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 28: 100-109.
- [8] RODRIGUEZ O, GOMES W, RODRIGUES S, et al. Effect of acoustically assisted treatments on vitamins, antioxidant activity, organic acids and drying kinetics of pineapple [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 35: 92-102.
- [9] 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 262-269.
ZHENG X, XIAO H W, WANG L H, et al. Shorting drying time of Hami-melon slice using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(1): 262-269.
- [10] 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. Effects of ultrasound pretreatment on water state and hot-air drying characteristics of kiwifruit[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(13): 263-272.
- [11] 段续, 徐一铭, 任广跃, 等. 香菇分段变温红外喷动床干燥工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 293-302.
DUAN X, XU Y M, REN G Y, et al. Optimization of the drying process parameters for lentinus edodes in segment variable temperature infrared assisted spouted bed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 293-302.
- [12] 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊): 382-388.
ZHANG Q, XIAO H W, DAI J W, et al. Air impingement drying characteristics and drying model of Hami melon flake [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(S1): 382-388.
- [13] XIAO H W, LAW C L, SUN D W, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying[J]. *Drying Technology*, 2014, 32(4): 418-427.
- [14] 巨浩羽, 赵海燕, 张卫鹏, 等. 相对湿度对胡萝卜热风干燥过程中热质传递特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 295-302.
JU H Y, ZHAO H Y, ZHANG W P, et al. Effects of relative humidity on heat and mass transfer characteristics of carrot during hot air drying[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(5): 295-302.
- [15] WU X F, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energy consumption and keep the quality of *Cordyceps militaris* [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 54: 34-42.
- [16] 汤诗琪. 哈密瓜风干片贮藏过程中品质变化及褐变机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 3-5.
TANG S Q. Study on quality changes and browning mechanism of Hami melon air-dried sheets during storage [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 3-5.
- [17] WANG X Y, GAO Y N, LI X H, et al. Effect of different drying methods on the quality and microstructure of fresh jujube crisp slices[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45: e15162.
- [18] 巨浩羽, 赵海燕, 张菊, 等. 基于 Dincer 模型不同干燥方式下光皮木瓜干燥特性研究[J]. *中草药*, 2020, 51(15): 3 911-3 921.
JU H Y, ZHAO H Y, ZHANG J, et al. Drying characteristics of *Chaenomeles sinensis* with different drying methods based on Dincer model[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2020, 51(15): 3 911-3 921.
- [19] 白俊文, 周存山, 蔡健荣, 等. 南瓜片真空脉动干燥特性及含水率预测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 290-297.
BAI J W, ZHOU C S, CAI J R, et al. Vacuum pulse drying characteristics and moisture content prediction of pumpkin slices [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(17): 290-297.
- [20] 郝启栋, 乔旭光, 郑振佳, 等. 超高压和超声波预处理对蒜片热风干燥过程及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 278-286.
HAO Q D, QIAO X G, ZHENG Z J, et al. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on hot-air drying process and quality of garlic slices[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(3): 278-286.
- [21] 张迎敏, 任广跃, 屈展平, 等. 超声和烫漂预处理对红薯叶热风干燥的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(12): 194-201.
ZHANG Y M, REN G Y, QU Z P, et al. Effect of ultrasonic and blanching pretreatment on hot air drying of sweet potato leaves[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(12): 194-201.
- [22] 许丹妮, 苏秀芳, 黄丽娟. 细叶黄皮根总黄酮提取工艺优化及抑菌活性研究[J]. *食品与机械*, 2022, 38(6): 156-160.
XU D N, SU X F, HUANG L J. Study on optimization of extraction technology and antibacterial activity of total flavonoids from the root of *Clausena anisum-olens*[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(6): 156-160.
- [23] 宋悦, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助渗透处理对热风干燥及真空冷冻干燥黄桃片品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(15): 177-185.
SONG Y, JIN X, BI J F, et al. Effect of ultrasonic-assisted osmotic dehydration on the quality characteristics of hot air dried and vacuum freeze dried yellow peach chips[J]. *Food Science*, 2020, 41(15): 177-185.

(下转第 240 页)

- 125: 109216.
- [58] JIN G, WANG Y G, LI M H, et al. Rapid and real-time detection of black tea fermentation quality by using an inexpensive data fusion system[J]. *Food Chemistry*, 2021, 358: 129815.
- [59] AN T, HUANG W Q, TIAN X, et al. Hyperspectral imaging technology coupled with human sensory information to evaluate the fermentation degree of black tea[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 366: 131994.
- [60] JANDRIC Z, TCHAIKOVSKY A, ZITEK A, et al. Multivariate modelling techniques applied to metabolomic, elemental and isotopic fingerprints for the verification of regional geographical origin of Austrian carrots[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127924.
- [61] ZHOU L, ZHANG C, QIU Z G, et al. Information fusion of emerging non-destructive analytical techniques for food quality authentication: A survey[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 127: 115901.
- [62] LI L Q, JIN S S, WANG Y J, et al. Potential of smartphone-coupled micro NIR spectroscopy for quality control of green tea [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 247: 119096.
- [63] WANG Y J, LI T H, LI L Q, et al. Evaluating taste-related attributes of black tea by micro-NIRS [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 290: 110181.
- [64] TOZLU B H, OKUMUS H I. A new approach to automation of black tea fermentation process with electronic nose[J]. *Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing & Communications*, 2018, 59(3/4): 373-381.
- [65] 李杨, 董春旺, 陈建能, 等. 茶叶智能采摘技术研究进展与展望[J]. *中国茶叶*, 2022, 44(7): 1-9.
- LI Y, DONG C W, CHEN J N, et al. Research progress and prospect of intelligent tea picking technology[J]. *China Tea*, 2022, 44(7): 1-9.
- [66] 沈帅, 袁海波, 朱宏凯, 等. 茶叶数字化加工技术研究进展[J]. *中国茶叶*, 2022, 44(8): 1-8.
- SHEN S, YUAN H B, ZHU H K, et al. Research progress of tea digital processing technology[J]. *China Tea*, 2022, 44(8): 1-8.
- [67] 宁井铭, 颜玲, 张正竹, 等. 祁门红茶加工中氨基酸和儿茶素快速检测模型建立[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(12): 3422-3426.
- NING J M, YAN L, ZHANG Z Z, et al. Establishment of a rapid detection model for amino acids and catechins in Qimen black tea processing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(12): 3422-3426.
- [68] 宁井铭, 孙京京, 朱小元, 等. 基于图像和光谱信息融合的红茶萎凋程度量化判别[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 303-308.
- NING J M, SUN J J, ZHU X Y, et al. Quantitative discrimination of black tea withering degree based on fusion of image and spectral information [J]. *Chinese Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 303-308.
- [69] WANG Y W, LIU Y, CUI Q Q, et al. Monitoring the withering condition of leaves during black tea processing via the fusion of electronic eye (e-eye), colorimetric sensing array (CSA), and micro-near-infrared spectroscopy (NIRS) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 300: 110534.

(上接第 95 页)

- [10] 包晓敏, 王思琪. 基于深度学习的目标检测算法综述[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(4): 5-9.
- BAO X M, WANG S Q. Survey of object detection algorithm based on deep learning [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(4): 5-9.
- [11] HAN K, WANG Y, TIAN Q, et al. Ghostnet: More features from cheap operations[C]// *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Seattle: IEEE, 2020: 1580-1589.
- [12] ZHANG Y F, REN W, ZHANG Z, et al. Focal and efficient IOU loss for accurate bounding box regression [J/OL]. *Computer Science*. (2021-01-20) [2022-07-18]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.08158>.
- [13] HOU Q, ZHOU D, FENG J. Coordinate attention for efficient mobile network design[J/OL]. *Computer Science*. (2021-03-04) [2022-07-20]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.02907>.
- [14] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City: Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2018: 7132-7141.

(上接第 206 页)

- [24] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 277-286.
- LIU Y H, LI X F, MIAO S, et al. Drying characteristics and microstructures of pumpkin slices with ultrasound combined far-infrared radiation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(10): 277-286.
- [25] FERNANDES F A N, GALLO M I, RODRIGUES S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(4): 604-611.
- [26] 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 X, DUAN X, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on water migration of apricot slices during microwave freeze-drying[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(8): 15-21, 81.