

超声—远红外辐射干燥对香蕉片品质的影响

Effects of ultrasound combined far-infrared radiation drying on the quality of banana slices

石晓微¹ 刘云宏^{1,2}

SHI Xiao-wei¹ LIU Yun-hong^{1,2}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 农产品干燥装备河南省工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Henan Engineering Technology Research Center of Agricultural Product Drying Equipment, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:采用超声—远红外辐射干燥技术对香蕉片进行干燥,比较不同辐射温度(150, 210, 270 °C)和超声功率(0, 30, 60 W)对香蕉片质构、复水比、收缩率、色差、感官品质、总酚含量、维生素 C 含量和抗氧化活性的影响。结果表明,辐射温度和超声功率对干燥香蕉片的理化品质均有影响。香蕉片质构、复水比和收缩率等品质以辐射温度 270 °C 和超声功率 60 W 时较优。当辐射温度为 210 °C、超声功率为 60 W 时,香蕉片色差最小($\Delta E = 12.20 \pm 0.33$),总酚含量 $[(27.18 \pm 0.33) \text{ mg}/100 \text{ g}]$ 和维生素 C 含量 $[(20.25 \pm 0.68) \text{ mg}/100 \text{ g}]$ 最高,抗氧化活性最强,感官评分值最高。加权综合评分结果表明,210 °C 的辐射温度和 60 W 的超声功率为超声—远红外辐射干燥香蕉片的最优参数,此条件下香蕉片的综合品质最佳。

关键词:香蕉;超声;远红外辐射;干燥;品质

Abstract: In order to investigate the quality characteristics of banana dried by ultrasound combined with far-infrared radiation drying, the banana slices were dried using ultrasound combined far-infrared radiation drying, and the drying was operated using the radiation temperature of 150, 210, 270 °C under the ultrasound power of 0, 30, 60 W. The effect of drying conditions on structure, rehydration ratio, shrinkage, color difference, total phenol content, V_C content and antioxidant activity of banana slices were compared. The results showed that as the increases of radiation temperature and ultrasound power, the hardness values and

shrinkage rate of banana slices decreased, and the rehydration ratio increased. At radiation temperature of 210 °C, the color difference of banana slices was smaller, the contents of total phenol and V_C were higher, and the antioxidant activity was stronger. The application of ultrasound can improve the physical and chemical quality of banana slices dried by far-infrared radiation. The results of weighted comprehensive score analysis showed that radiation temperature of 210 °C and ultrasonic power of 60 W were the optimal parameters for ultrasound combined far-infrared radiation drying of banana slices.

Keywords: banana; ultrasound; far-infrared radiation; drying; quality

香蕉含丰富的碳水化合物、膳食纤维、维生素、矿物质和酚类化合物,具有较强的抗氧化活性^[1-2]。但其为呼吸跃变型果实且质地柔软,采收后容易腐烂^[3]。干燥对减少香蕉损失,延长贮藏时间和促进产品运输具有重要意义^[4]。传统的干燥方式,如油炸和热风干燥等,由于高温或者较长的干燥时间可能会对产品的风味、颜色、营养成分等品质特性造成严重损害,并降低干制品的复水能力^[5-6]。远红外辐射(Far-infrared radiation, FIR)具有热效应好、节能、温度分布均匀、产品质量好等优点^[7-8],被广泛应用于猕猴桃^[9]、紫薯^[10]、萝卜^[11]等产品的干燥过程中,并且能够大幅缩短干燥时间,提高干燥产品品质。

超声技术由于其机械振动和空化作用,可以扩张物料的内部组织并形成海绵状结构,从而有效地降低物料的内部传质阻力,加速水的扩散并缩短干燥时间^[12-13]。与气介式超声相比,直触超声具有更小的能量衰减,对干燥过程的改善效果更为显著^[14]。孙畅莹等^[15]将直触超声用于梨片的热风干燥过程中,发现干燥时间明显缩短,

基金项目:河南省自然科学基金项目(编号:182300410068);河南省高校科技创新人才资助计划(编号:19HASTIT013)

作者简介:石晓微,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:刘云宏(1975—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: beckybin@haust.edu.cn

收稿日期:2020-07-20

产品品质显著提高。Zhao 等^[16]研究表明,超声处理可改善污泥中孔隙结构的连通性,有利于加速污泥对流干燥过程中的水分运输,且随着声能密度的增大,污泥中水分运输得更快。刘云宏等^[17]研究发现,将远红外辐射技术和直触超声相结合可有效改善物料内部结构,显著提高物料的质热传递过程,从而实现更高效、节能的快速干燥。Liu 等^[18]发现,直触超声可以加快猕猴桃远红外辐射干燥中的水迁移并提高干燥速率。但有关直触超声联合远红外辐射干燥对产品品质影响的研究尚未见报道。试验拟以香蕉片为研究对象,进行超声—远红外辐射干燥试验,探讨超声功率和远红外辐射温度对干燥香蕉片的质构、复水比、收缩率、色泽、总酚含量、维生素 C 含量、抗氧化活性等品质指标的影响,以期对香蕉片现代干燥加工技术开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜香蕉:成熟度一致,采用 105 ℃ 烘箱法测得其干基含水率为(5.24±0.12) g/g,市售。

1.2 仪器与设备

超声强化远红外辐射干燥装置:河南科技大学自制,具体结构和参数见文献[17];

紫外—可见分光光度计:T6 新世纪型,北京普析通用仪器有限公司;

高速离心机:TG16-WS 型,湘仪离心机仪器有限公司;

质构仪:TA.XT EXPRESS 型,英国 SMS 公司;

色差仪:Color i5 型,美国 X-Rite 公司;

高效液相色谱仪:Agilent 1260 Infinity 型,安捷伦科技有限公司;

电子天平:Scout SE 型,美国 OHAUS 公司。

1.3 干燥方法

将香蕉去皮后切成厚度为 5 mm 的圆形薄片,并浸入 0.2% 的异抗坏血酸钠溶液中 20 min 以防止干燥过程中的酶促褐变。用滤纸吸干表面水分,并将 65 g 左右的香蕉片平铺于超声振动盘上,然后放入干燥室内。每间隔 20 min 对样品进行称重,直至含水率低于 17% (干基)。设置风速为 1.5 m/s,远红外辐射距离为 10 cm,辐射温度分别为 150,210,270 ℃,超声功率分别为 0,30,60 W。

1.4 指标测定

1.4.1 质构 根据文献[19]修改如下:测前速度 2 mm/s,测试速度 0.5 mm/s,测后速度 5 mm/s,硬度为破坏样品以获得力变形曲线的最大力,脆度为力变形曲线上峰的数量,每组试验重复 10 次,取平均值。

1.4.2 复水比 根据文献[20]。按式(1)计算复水比。

$$R_R = \frac{M_t}{M_0}, \quad (1)$$

式中:

R_R ——样品复水比;

M_t ——复水后样品质量,g;

M_0 ——复水前样品质量,g。

1.4.3 收缩率 参照文献[21]。以小米为介质,通过置换法测定样品体积,每组试验重复 5 次。按式(2)计算样品收缩率。

$$S_R = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

S_R ——样品的收缩率,%;

V_0 、 V ——干燥前、后样品体积,mL。

1.4.4 色差 参照文献[22]。 L^* 为明暗度, a^* 为红绿色, b^* 为黄蓝色。每组试验重复 10 次,取平均值。

1.4.5 感官评价 参照文献[23]。将香蕉片干制品的外观、风味、质地、口感和总体可接受性用于感官评价,选择 20 位不同年龄段的人,从 1~9 进行满意度评价(1 为非常不喜欢,9 为非常喜欢)。并评价外观、风味、质地、口感和总体可接受性在所有评价指标中的重要程度,以频数统计法确定权重分别为 0.203,0.182,0.176,0.209,0.231。

1.4.6 总酚含量 根据文献[24]。

1.4.7 维生素 C 含量 按 GB 5009.86—2016 执行。

1.4.8 抗氧化活性

(1) DPPH 自由基清除活性:根据文献[25]。按式(3)计算 DPPH 自由基清除率。

$$I = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

I ——清除率,%;

A_i ——样品组吸光度;

A_j ——空白组吸光度;

A_c ——对照组吸光度。

(2) ABTS 自由基清除活性:根据文献[26]。按式(3)计算 ABTS 自由基清除率。

1.4.9 加权综合评分 综合评价指标为硬度、脆度、复水比、收缩率、色差、感官评价、总酚含量、维生素 C 含量和抗氧化活性。参照文献[27],评分值分别为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 、 Y_6 、 Y_7 、 Y_8 、 Y_9 ,其对应的权重系数(λ)分别为 0.10,0.10,0.05,0.05,0.20,0.20,0.10,0.10,0.10。脆度、复水比、感官评价、总酚含量、维生素 C 含量为正效应,隶属函数为:

$$Y = \frac{C_1 - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}. \quad (4)$$

硬度、收缩率、色差和抗氧化活性为负效应,隶属函数为:

$$Y = 1 - \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (5)$$

$$y = (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8 + Y_9)\lambda, \quad (6)$$

式中:

C_i 、 $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$ ——实际指标值、最小指标值和最大指标值。

1.4.10 统计分析 使用 Origin 8.5 软件对数据进行统计分析,使用 Duncan 方法进行显著性分析,数据表示为均值±标准差。小写字母不同表示相同温度不同功率之间差异显著($P<0.05$);大写字母不同表示相同功率不同温度之间差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 质构

由图 1 可知,硬度与香蕉片内部的组织结构密切相关。硬度随远红外辐射温度的增加而显著减小($P<0.05$),当远红外辐射温度为 150、210、270 °C 时,干燥香蕉片的硬度值分别为 $(1\,028.471 \pm 45.424)$ 、 (788.203 ± 27.410) 、 (600.574 ± 30.029) g。这可能是由于远红外辐射温度的升高破坏了样品的分子骨架,扩张了内部组织结构,硬度值降低。Léonard 等^[28]研究发现,远红外辐射可以改善香蕉片的内部组织结构,并且最终孔隙度随温度的增加而增加。干燥香蕉片的硬度值随超声功率的增加而减小。以 210 °C 为例,当超声功率从 0 W 增加到 30 W 时,硬度值从 (788.203 ± 27.410) g 减小至 (672.131 ± 34.607) g,减少了 14.73%。这是由于超声的机械效应和空化效应扩张了样品的组织结构,增大超声

功率能够增强机械效应和空化效应,从而形成更加疏松的内部结构,硬度值减小^[17]。

由图 2 可知,辐射温度和超声功率对于干制香蕉片的脆度影响显著($P<0.05$),脆度值随辐射温度和超声功率的升高而增大。当辐射温度为 270 °C,超声功率为 60 W 时,香蕉片脆度显著高于其他干燥条件下的,可能是由于辐射温度和超声功率的升高促使内部疏松结构的形成,更有利于提高香蕉片的酥脆性。

2.2 复水比

由图 3 可知,干燥前 50 min,复水比快速增长。香蕉片的复水比随远红外辐射温度和超声功率的升高逐渐增大,未施加超声时,辐射温度从 150 °C 上升至 270 °C,复水比从 2.088 ± 0.044 增大至 2.737 ± 0.074 。当辐射温度为 210 °C 时,施加 0、30、60 W 的超声,香蕉片的最终复水比分别为 2.435 ± 0.039 、 2.477 ± 0.043 、 2.583 ± 0.047 。这可能是由于香蕉片在较低的辐射温度下干燥时间长,使得细胞严重收缩,组织结构致密,不利于水分的吸收。辐射温度和超声功率的增加加速了水分湍动与迁移扩散,干燥时间缩短。此外,辐射温度的升高也会产生更大的热流密度,加速水分相变,形成更大的蒸汽压和更高的体积膨胀度,扩张香蕉片的微细孔道。超声功率的增加也会加速空化气泡的形成与破裂,使得香蕉片内部组织较为疏松,有利于水分吸收^[29]。

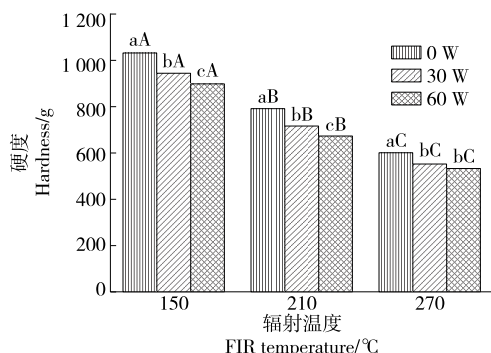


图 1 不同干燥条件下香蕉片的硬度

Figure 1 The hardness values of banana slices under different drying conditions

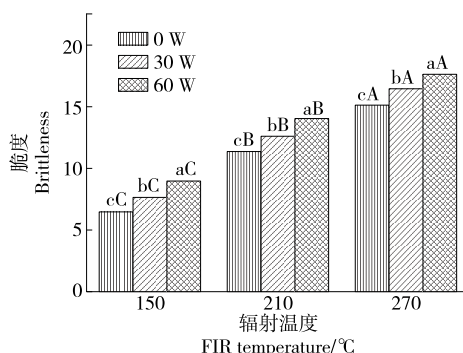


图 2 不同干燥条件下香蕉片的脆度

Figure 2 The brittleness values of banana slices under different drying conditions

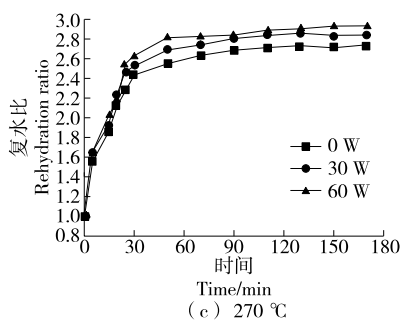
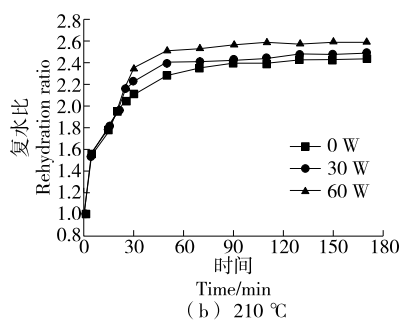
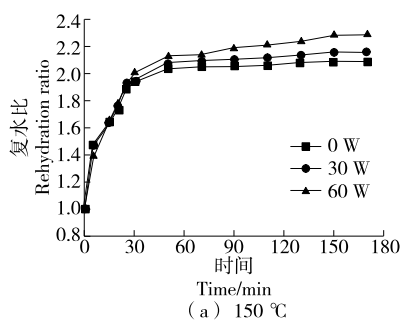


图 3 不同干燥条件下香蕉片的复水比

Figure 3 The rehydration ratio of banana slices under different drying conditions

2.3 收缩率

由图 4 可知,香蕉片的收缩率随辐射温度和超声功率的增加而降低。与单一远红外辐射干燥相比,施加超声后香蕉片的收缩率明显降低。当辐射温度为 150 ℃,未施加超声时,香蕉片收缩率最大 $[(45.32 \pm 1.36)\%]$ 。当辐射温度为 270 ℃,超声功率为 60 W 时,香蕉片的收缩率最小 $[(20.31 \pm 0.42)\%]$ 。辐射温度和超声功率的升

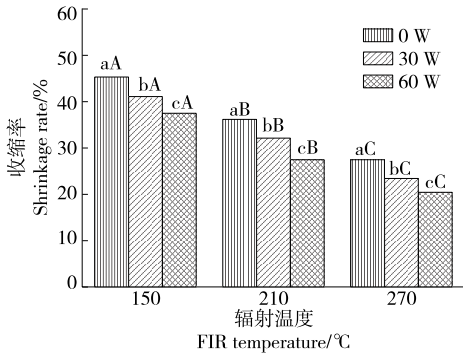


图 4 不同干燥条件下香蕉片的收缩率

Figure 4 The shrinkage of banana slices under different drying conditions

高加速了水分扩散,更好地保护了产品结构。

2.4 色差

由表 1 可知,与新鲜样品相比,干燥后的香蕉片表面 L^* 值明显降低, a^* 值和 b^* 值普遍上升。当超声功率一定时,在 210 ℃ 的辐射温度下,干燥香蕉片表面 L^* 值最高, a^* 值、 b^* 值和 ΔE 值最小。这可能是由于 150 ℃ 下干燥时间较长,多酚与氧化酶接触时间长,产生更多的黑色素。而 270 ℃ 的辐射温度较高,更易造成非酶褐变,样品表面颜色变暗,亮度降低^[30]。此外,各辐射温度下,施加超声功率后, ΔE 值均显著减小($P<0.05$),且随超声功率的升高而明显降低。这可能是由于超声可以在不提高样品温度下缩短干燥进程,更有利于产品外观色泽的保护。

2.5 感官品质

由表 2 可知,当辐射温度为 210 ℃,超声功率为 60 W 时,感官评分最高,香蕉片的感官品质最好。

2.6 总酚含量

由图 5 可知,辐射温度和超声功率对香蕉片总酚含量有显著影响($P<0.05$)。当辐射温度为 210 ℃ 时,香蕉片总酚含量普遍较高。未施加超声时,辐射温度 150,

表 1 不同干燥条件下香蕉片的色泽

Table 1 The color of banana slices under different drying conditions

辐射温度/℃	超声功率/W	L^*	a^*	b^*	ΔE
150	0	47.72 ± 0.89^{cB}	13.96 ± 0.14^{aA}	37.65 ± 0.85^{aB}	29.57 ± 1.15^{aB}
	30	50.61 ± 1.54^{bB}	11.83 ± 0.27^{bA}	35.61 ± 0.77^{bB}	25.58 ± 0.59^{bB}
	60	53.07 ± 0.94^{aB}	9.58 ± 0.15^{cB}	33.82 ± 1.05^{bB}	22.04 ± 0.37^{cB}
210	0	54.10 ± 1.26^{cA}	9.35 ± 0.08^{aB}	32.98 ± 1.24^{aC}	20.72 ± 0.76^{aC}
	30	57.63 ± 1.19^{bA}	7.16 ± 0.13^{bB}	30.06 ± 0.96^{bC}	15.80 ± 0.59^{bC}
	60	60.20 ± 0.73^{aA}	5.03 ± 0.10^{cC}	27.94 ± 0.53^{cC}	12.20 ± 0.33^{cC}
270	0	39.88 ± 0.57^{cC}	15.21 ± 0.29^{aA}	41.26 ± 0.61^{aA}	37.69 ± 1.11^{aA}
	30	43.51 ± 1.42^{bC}	13.34 ± 0.16^{abA}	39.08 ± 1.35^{bA}	33.15 ± 1.45^{bA}
	60	45.79 ± 1.08^{aC}	12.64 ± 0.27^{bA}	37.48 ± 1.47^{bA}	30.31 ± 0.90^{cA}
新鲜样品		66.86 ± 1.41	3.07 ± 0.06	17.91 ± 0.12	—

表 2 不同干燥条件下香蕉片的感官评分

Table 2 Sensory scores of banana slices under different drying conditions

辐射温度/℃	超声功率/W	感官评分
150	0	6.036
	30	6.299
	60	6.727
210	0	7.613
	30	7.951
	60	8.550
270	0	5.270
	30	5.272
	60	5.756

210,270 ℃ 下,香蕉片总酚含量分别为 (16.98 ± 0.50) , (22.65 ± 0.73) , (14.21 ± 0.56) mg/100 g。较低温度下,香蕉片长时间受热,内部的酚类化合物易与氧气接触并反应,导致严重的氧化和大量的酚损失。而较高温度下,可能是由于多酚类物质发生了分解或聚合反应而造成含量降低^[22]。此外,辐射的应用和超声功率的增加都提高了香蕉片内的总酚含量,当辐射温度为 210 ℃ 时,施加 30,60 W 的超声功率后,总酚含量分别提高了 10.46%,20.00%,表明提高超声功率有利于香蕉片内酚类物质的保留。

2.7 维生素 C 含量

由图 6 可知,辐射温度对香蕉片的维生素 C 含量有显著影响($P<0.05$),在 270℃ 的辐射温度下施加 30,

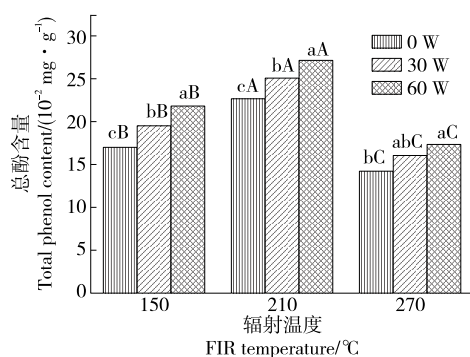


图 5 不同干燥条件下香蕉片的总酚含量

Figure 5 The total phenol content of banana slices under different drying conditions

60 W 的超声对维生素 C 含量影响不显著 ($P>0.05$)。当超声功率为 0 W 时, 150, 210, 270 °C 下香蕉片的维生素 C 含量分别为 (9.86 ± 0.47) , (15.69 ± 0.75) , (8.09 ± 0.39) mg/100 g。干燥过程中辐射温度的提高会在一定程度上加快维生素 C 的氧化和降解速率, 但同时辐射能量的增强也会导致香蕉片内水分快速迁移扩散, 减少了加热和氧化时间, 从而提高了维生素 C 的保存率。而温

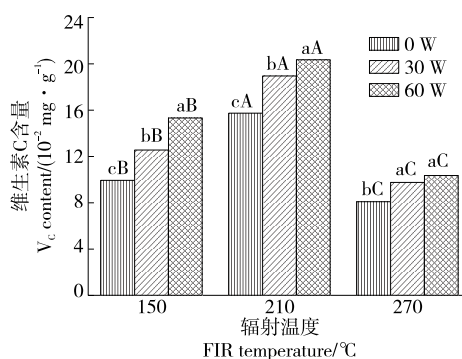


图 6 不同干燥条件下香蕉片的维生素 C 含量

Figure 6 The V_C content of banana slices under different drying conditions

度过高, 维生素 C 快速降解而造成大量损失。此外, 维生素 C 含量随超声功率的增大而增加, 可能是由于超声的机械和空化效应能在不提高物料温度的情况下加快干燥过程、缩短干燥时间。

2.8 抗氧化活性

由图 7 可知, 辐射温度和超声功率对香蕉片的抗氧化活性均有显著影响 ($P<0.05$)。当辐射温度为 210 °C,

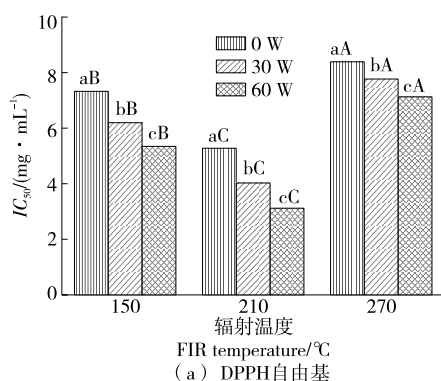


图 7 不同干燥条件下香蕉片的抗氧化活性

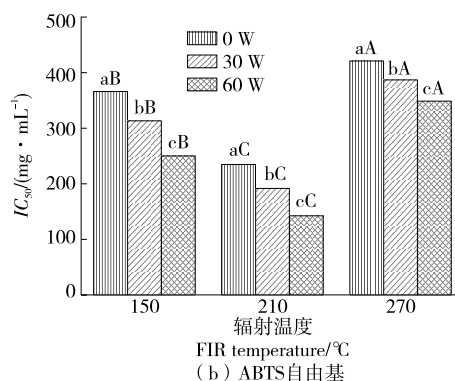


Figure 7 Antioxidant activity of banana slices under different drying conditions

超声功率为 60 W 时, 干燥香蕉片的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS 自由基清除能力最强, 当辐射温度为 270 °C, 超声功率为 0 W 时, 干燥香蕉片的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS 自由基清除能力最弱, 表明在香蕉远红外辐射干燥中施加超声, 能够在保护营养成分的同时显著提高干制香蕉片的抗氧化能力。

2.9 加权综合评分优化

由表 3 可知, 提高超声功率可以提高产品品质, 但温度过高, 产品品质较差。当辐射温度为 210 °C、超声功率为 60 W 时, 综合评分最高。因此, 超声—远红外辐射干燥香蕉片的最优参数为 210 °C 的远红外辐射温度和 60 W 的超声功率。

表 3 不同干燥条件下的加权综合评分

Table 3 Weighted comprehensive scoring results under different drying conditions

辐射温度/°C	超声功率/W	综合评分
150	0	0.166 5 ± 0.006 ^{cC}
	30	0.316 6 ± 0.008 ^{bC}
	60	0.463 8 ± 0.013 ^{aB}
210	0	0.594 0 ± 0.015 ^{cA}
	30	0.757 6 ± 0.021 ^{bA}
	60	0.905 0 ± 0.027 ^{aA}
270	0	0.238 3 ± 0.005 ^{cB}
	30	0.349 1 ± 0.007 ^{bB}
	60	0.453 3 ± 0.016 ^{aB}

3 结论

与未施加超声的远红外辐射干燥相比,超声联合远红外辐射干燥技术能有效提高产品品质。超声功率的增加能明显提高干制香蕉片的理化品质,辐射温度过高时不利于香蕉片表面色泽的形成和营养成分的保留。通过加权综合评分法确定了香蕉片超声—远红外辐射干燥的最优工艺参数为辐射温度 210 ℃,超声功率 60 W。后续还需对超声—远红外辐射干燥过程的协同作用进行更微观、更系统的研究与探索。

参考文献

- [1] 杨佳琪,袁越锦,王栋,等.不同干燥方式对香蕉切片干燥品质的影响试验[J].食品科技,2019,44(3):79-84.
- [2] 毕家钰,代曜伊,郑炯.褐变抑制剂对干制香蕉片护色效果的影响[J].食品与机械,2016,32(11):194-197.
- [3] GUINE R P, BARROCA M J, GONCALVES F J, et al. Artificial neural network modelling of the antioxidant activity and phenolic compounds of bananas submitted to different drying treatments[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 454-459.
- [4] XU Feng-ying, LI Chang-you, CHEN Zhen, et al. The transformation properties of aroma components in banana drying process[J]. Advanced Materials Research, 2012, 482/483/484: 1 461-1 465.
- [5] 巩桂芬,李阳.香蕉片热风—微波真空联合干燥研究[J].食品与发酵工业,2016,42(11):138-141.
- [6] 李宝玉.不同干燥方式对香蕉产品品质的影响[J].食品科学,2016,37(15):100-106.
- [7] SALEHI F, KASHANINEJAD M, JAFARIANLARI A. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices[J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 53(5): 1 751-1 759.
- [8] SAENGRAYAP R, TANSAKUL A, MITTAL G S. Effect of far-infrared radiation assisted microwave-vacuum drying on drying characteristics and quality of redchilli[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 52(5): 2 610-2 621.
- [9] 曾雅,刘云宏,张嘉怡,等.远红外辐射温度对猕猴桃干燥水分迁移的影响[J].食品与机械,2019,35(8):143-147,188.
- [10] 易婕,刘云宏,李海登,等.紫薯远红外辐射干燥及品质特性[J].食品科学,2018,39(7):160-167.
- [11] 丁莹.萝卜远红外干燥的试验研究[D].淄博:山东理工大学,2009:51-53.
- [12] 刘云宏,孙畅莹,曾雅.直触式超声功率对梨片超声强化热风干燥水分迁移的影响[J].农业工程学报,2018,34(19):284-292.
- [13] RODRIGUEZ O, EIM V, ROSSELLO C, et al. Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: Effects on quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(2): 966-966.
- [14] MUSIELAK G, MIERZWA D, KROEHNKE J. Food drying enhancement by ultrasound: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 56: 126-141.
- [15] 孙畅莹,刘云宏,曾雅,等.直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性[J].食品与机械,2018,34(9):37-42.
- [16] ZHAO Fang, CHEN Zhen-qian. Numerical study on moisture transfer in ultrasound-assisted convective drying process of sludge[J]. Drying Technology, 2011, 29(12): 1 404-1 415.
- [17] 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.
- [18] LIU Yun-hong, ZENG Ya, HU Run-run, et al. Effect of contact ultrasonic power on moisture migration during far-infrared radiation drying of kiwifruit[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(6): e13224.
- [19] 彭健,王蔚婕,唐道邦,等.分段式远红外—热泵干燥对龙眼品质的影响[J].食品科学,2020,41(19):118-123.
- [20] 赵圆圆,易建勇,毕金峰,等.干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J].食品科学,2019,40(3):101-108.
- [21] 谢小雷,李侠,张春晖,等.牛肉干中红外—热风组合干燥工艺中水分迁移规律[J].农业工程学报,2014,30(14):322-330.
- [22] ZENG Ya, LIU Yun-hong, ZHANG Jia-yi, et al. Effects of far-infrared radiation temperature on drying characteristics, water status, microstructure and quality of kiwifruit slices[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 3 086-3 096.
- [23] KUMAR P S, NAMBI E, SHIVA K N, et al. Thin layer drying kinetics of Banana var. Monthan (ABB): Influence of convective drying on nutritional quality, microstructure, thermal properties, color, and sensory characteristics[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(4): e13020.
- [24] 王玉婷,陈奕,李雨波.干燥方式对香蕉片总多酚含量及其抗氧化性的影响[J].食品科学,2013,34(23):113-117.
- [25] 康志敏,郭东旭,何梦影,等.不同干燥工艺对鲜玉米粉品质及风味的影响[J].食品工业科技,2020,41(18):58-63,69.
- [26] 余欣珂,明建,支玲,等.真空冷冻干燥对菊花多酚含量及其抗氧化活性的影响[J].食品与机械,2020,36(6):138-144.
- [27] 张良清,邱佳容,康彬彬,等.基于综合加权评分法研究不同干燥方法对龙眼肉品质特性的影响[J].包装与食品机械,2015,33(4):11-14,20.
- [28] LÉONARD A, BLACHER S, NIMMOL C, et al. Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure of banana slices: An illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 154-162.
- [29] 李晓芳,刘云宏,马丽婷,等.远红外辐射温度对金银花干燥特性及品质的影响[J].食品科学,2017,38(15):69-76.
- [30] 任亚敏,张明玉.玛咖真空远红外干燥特性及品质特征研究[J].食品科技,2019,44(1):133-138.