

刘启玲,王庆卫. 中短波红外干燥对桑葚干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 39–45. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090209

LIU Qiling, WANG Qingwei. Effects of Short- and Medium-wave Infrared Radiation Drying on Drying Characteristics, Nutritional Quality and Antioxidant Activity of Mulberry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 39–45. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090209

· 研究与探讨 ·

中短波红外干燥对桑葚干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响

刘启玲,王庆卫

(郑州工业应用技术学院,河南新郑 451100)

摘要:为探究中短波红外干燥对桑葚干燥特性、能耗、营养品质及抗氧化活性的影响,将新鲜桑葚在不同干燥温度条件下(50、60、70℃)进行中短波红外干燥,以相同干燥温度条件下(50、60、70℃)的热风干燥为对照,探究不同干燥条件下桑葚的干燥特性、能耗、单体酚类物质、总酚、总黄酮、维生素C、总花色苷的含量及抗氧化活性,并建立桑果中短波红外干燥数学模型。结果表明,中短波红外干燥能够显著($P<0.05$)提高桑果的干燥效率(50℃下干燥效率提高55.7%,60℃下干燥效率提高46.1%,70℃干燥效率提高33.3%),Weibull分布模型能够较好地模拟桑果在不同干燥温度下的中短波红外干燥过程,且桑果经中短波红外干燥后能耗较低。干燥后桑果共检测出12种酚类物质,其中绿原酸、芦丁、儿茶素为主要的酚类物质。相比传统的热风干燥,中短波红外干燥效率高,且干燥后桑葚的总酚、总黄酮、维生素C、总花色苷含量较高,总酚含量为463.1~568.8 mg/100 g;总黄酮含量为312.6~402.6 mg/100 g;维生素C含量为30.1~37.8 mg/100 g;总花色苷含量为153.6~195.6 mg/100 g。且与热风干燥相比桑果经中短波红外干燥后抗氧化活性显著增强($P<0.05$) (DPPH自由基清除能力较热风干燥提高了32.8%~42.6%;铁离子还原能力较热风干燥提高21.1%~34.1%)。中短波红外干燥桑果干燥效率较高,能耗较低,干制品品质较好,故中短波红外干燥是一种优良的桑果干燥方式,可为桑果干制加工提供理论参考。

关键词:桑葚,中短波红外干燥,干燥特性,桑果品质,抗氧化活性

中图分类号:TS255.36

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2021)12-0039-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090209

Effects of Short- and Medium-wave Infrared Radiation Drying on Drying Characteristics, Nutritional Quality and Antioxidant Activity of Mulberry

LIU Qiling, WANG Qingwei

(Zhengzhou University of Industry Technology, Xinzheng 451100, China)

Abstract: In order to explore the effects of short- and medium-wave infrared radiation drying on the drying characteristics, energy consumption, nutritional quality and antioxidant activity of mulberry, fresh mulberry was dried by short- and medium-wave infrared radiation drying at different drying temperatures (50, 60, 70 °C), and compared with hot air drying under the same drying temperature (50, 60, 70 °C), the drying characteristics, energy consumption, contents of phenolic monomers, total phenols, total flavonoids, vitamin C, total anthocyanin and antioxidant activity of mulberry under different drying conditions were investigated, and the short- and medium-wave infrared drying mathematical model of mulberry fruit was established. The results showed that the short- and medium-wave infrared radiation drying could significantly improve the drying efficiency of mulberry (the drying efficiency increased by 55.7% at 50 °C, 46.1% at 60 °C, and 33.3% at 70 °C), and the Weibull distribution model could well simulate the drying process of short- and medium-wave infrared radiation

收稿日期: 2020-09-21

基金项目: 2019年度河南省社会科学界联合会调研课题(SKL-2019-1259)。

作者简介: 刘启玲(1988-),女,硕士,讲师,研究方向:食品科学与工程,E-mail: liuqiling9785@163.com。

drying at different drying temperatures. In addition, the energy consumption of mulberry dried by medium and short wave infrared was lower. Twelve phenolic substances were detected in dried mulberry fruit, among which chlorogenic acid, rutin and catechin were the main phenolic substances. Compared with the traditional hot air drying, the short-and medium-wave infrared radiation drying had higher drying efficiency, higher contents of total phenols, total flavonoids, vitamin C and total anthocyanins, the total phenol content was 463.1~568.8 mg/100 g. The total flavonoids content was 312.6~402.6 mg/100 g. The contents of vitamin C was 30.1~37.8 mg/100 g. The total anthocyanin content was 153.6~195.6 mg/100 g. In addition, compared with hot air drying, the antioxidant activity of mulberry fruit was significantly enhanced after short- and medium-wave infrared radiation drying (DPPH free radical scavenging ability was improved by 32.8% to 42.6% compared with hot air drying). Compared with hot air drying, iron ion reduction ability was improved by 21.1%~34.1%), short- and medium-wave infrared radiation drying of mulberry fruit had higher drying efficiency, lower energy consumption and better quality of dried products. Therefore, short- and medium-wave infrared radiation drying was an excellent drying way of mulberry fruit, which could provide theoretical reference for the dried processing of mulberry fruit.

Key words: mulberry; short- and medium-wave infrared radiation drying; drying characteristics; mulberry quality; antioxidant activity

桑葚又称桑果,是桑科落叶乔木桑树(*Morus alba* L)的成熟果实,其口味酸甜,富含营养,含有多 种矿物质,维生素,酚酸类,多糖等活性成分^[1],桑葚 在我国分布广泛,有着数千年的栽培历史,在我国具 有重要的食用价值与药用价值,现代医学研究证明桑 葚具有治疗发热、保肝护肝、利尿、降血压及降血糖 血脂等诸多功效^[2-4]。因为桑果水分含量较高,收获 期较短,采摘后不易保存易腐烂,因此将新鲜桑果干 制成为干果以防止微生物的快速繁殖,延长其贮藏 期,便于后续加工利用则变成了其重要的加工方式。

热风干燥是常用于果蔬干燥的传统干燥方 式^[5-6],其操作简单,设备成本较低,但干制效率较低, 干制品品质较差。近年来,新型果蔬干燥技术飞速发 展,其中真空冷冻干燥是目前国际上公认的较为优良 的果蔬干制技术,众多研究表明,真空冷冻干燥相对 于热风干燥能显著提高果蔬干制品品质^[7-8],但其干 燥时间较长,仪器设备投入较大、维护成本较高,很 难应用于实际生产^[9]。中短波红外干燥是一种新型 的效率较高的干燥技术,其干燥物料的原理为利用 1~4 μm 的红外线,基于物料中水分吸收红外辐射的 特性,使其快速干燥,短波穿透性比长波有较大优势, 因此厚一点的物料用于中短波加热干燥效果更好^[10], 相关研究表明,中短波红外干燥是一种优良的干燥技 术,与热风干燥相比能够显著提高物料的干燥效率和 品质^[11]。

目前桑葚干燥的相关研究多集中于冷冻干燥与 热风干燥品质对比^[12-13],李斌等^[13]对桑葚粉进行中 短波红外干燥与热风干燥进行对比,结果表明相较于 热风干燥,中短波红外干燥桑葚粉品质更佳,较少报 道中短波红外干燥与热风干燥两种干燥方式下桑果 的干燥特性、品质及抗氧化能力的变化,因此本研究 比较两种干燥方式下桑果的干燥特性、单体酚类物 质、总酚、总黄酮、维生素 C、总花色苷含量及抗氧 化能力,以期桑果的干制加工提供理论依据和技术 参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黑桑 采自河南省南阳市桑葚采摘园,挑选成 熟均匀桑果(果实全紫,品种为红果 2 号),采摘后及 时预冷并带回实验室储存于温度(0 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 85%~90% 的冰箱中贮藏。

甲醇、甲酸、乙腈、乙醇、磷酸二氢钾、三氯化 铝 天津市科密欧化学试剂有限公司;维生素 C、没 食子酸、咖啡酸、儿茶素、原儿茶素、香草酸、阿魏 酸、绿原酸、芦丁、槲皮素、丁香酸、表儿茶素、对香 豆酸、柠檬酸、苹果酸、草酸、富马酸、酒石酸 上海 源叶生物科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)、水溶性维 生素 E(6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-car- boxylic acid, Trolox) Sigma 公司。

CPA-12 电子天平 德国 Sartorius 公司;TC 型 中短波红外干燥设备 秦州圣泰科红外科技有限 公司;DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海精 宏实验设备有限公司;UV-1800 紫外-可见分光光度 计 日本岛津公司;600E 型高压液相色谱仪器 美国 Waters 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 干燥条件 低温冰箱中取出桑葚洗净擦干,挑 选均匀果实 2 kg 放入特定托盘中,初始干基含水率 为 367.3%,分别放入热风干燥及中短波红外干燥机 中将其干燥至水分比为 0.15 左右^[14]。不同干燥条件 见表 1。

1.2.2 干燥参数计算 桑葚干燥过程干基含水率 M_t 为:

$$M_t(\%) = \frac{W_t - G}{G} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: M_t 为桑果干制至 t 时刻的干基含水 率,%; W_t 为其干燥至 t 时刻的总质量,kg; G 为其试 样干物质质量,kg。

干制桑果水分变化用水分比(MR)表示,计算公

表 1 不同干燥方法试验条件
Table 1 Experimental conditions of different drying methods

干燥方法	序号	干燥温度(℃)	风速(m/s)	功率(W)	辐射距离(cm)	辐射波长(μm)
热风干燥	I	50	2	1125	—	—
	II	60	2	1125	—	—
	III	70	2	1125	—	—
	IV	50	2	1125	12	1~4
中短波红外干燥	V	60	2	1125	12	1~4
	VI	70	2	1125	12	1~4

式如下:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$
式 (2)

式中: MR 为桑果干燥过程中的水分比, 无量纲; M_e 为桑果干制平衡时的干基含水率, %; M_0 为桑果初始干基含水率, %;

由于 M_e 的值相对于 M_t 和 M_0 来说非常小, 可以忽略不计, 因此式(2)可以简化为式(3)。

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$
式 (3)

桑果干燥速率 D_r 为:

$$D_r = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t}$$
式 (4)

式中 D_r 为干燥速率, (g/(g·h)); $M_{t+\Delta t}$ 为桑果 $t+\Delta t$ 时刻的干基含水率, %; Δt 为干制间隔时间, h。

1.2.3 桑葚干燥薄层数学模型 探究桑葚在干制过程中的干燥数学模型对于研究其干燥特性至关重要, 选择常用的六种干燥模型^[15], 利用非线性回归法对所得数据进行拟合, 建立桑果的中短波红外干燥模型, 常见干燥模型见表 2。

所得干燥数据与模型拟合程度由相关系数 R^2 , 均方根误差(RMSE)和卡方值(χ^2)来衡量, R^2 值越大, RMSE 与 χ^2 值越小表明其拟合程度越好。均方根误差与卡方值公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}$$
式 (5)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - Z}$$
式 (6)

式中: $MR_{exp,i}$ 为任意时刻桑果的水分比; $MR_{pre,i}$

为任意时刻桑果水分比的预测值; N 为取样点的个数; Z 为模型中待定常数的个数。

1.2.4 酚类含量测定 桑葚中总酚含量的测定采用福林酚比色法; 总黄酮含量的测定采用 $AlCl_3$ 比色法, 其提取与测定参考文献 [16], 总酚结果以每 100 g 桑葚样品中没食子酸含量表示(mg/GAE 100 g DW), 总黄酮结果以每 100 g 桑葚样品中芦丁含量表示(mg RE/100 g DW)。

单体酚含量的测定: 利用高效液相色谱法测定桑葚中单体酚类物质的含量^[17], 桑葚中单体酚类物质提取方法与总酚、总黄酮提取方法一致, 流动相由溶剂 A(1% 甲酸)和溶剂 B(100% 乙腈)组成。梯度洗脱程序见表 3。

1.2.5 总花色苷含量测定 采用 pH 示差法测定桑葚中总花色苷的含量^[18]: 准确称取适量桑葚样品并将其充分研磨, 称取 0.5 g 组织匀浆溶解于 20 mL 体积分数 45% 的乙醇溶液中, 蒸馏水定容至 100 mL 备用, 后用紫外分光光度计分别测定在 521 和 700 nm 波长下的吸光度来计算桑葚中总花色苷含量。

$$TAC = A \times MW \times DF \times 1000 / (\epsilon \times l)$$
式 (7)

$$A = (A_{510} - A_{700})_{pH1.0} - (A_{510} - A_{700})_{pH4.5}$$
式 (8)

其中 TAC 为桑葚中花色苷含量, $MW=449.2$ (矢车菊-3-葡萄糖苷的分子量); DF =样液稀释的倍数; ϵ 为矢车菊-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数=26900; l 为比色皿厚度(cm); A 为公式(8)计算的吸光度。

1.2.6 维生素 C 测定 抗坏血酸的测定方法参考文献 [19] 方法, 稍作修改: 准确称取桑葚 10 g, 充分研磨后用 5% 偏磷酸和 10% 乙酸在 25 ℃ 下提取 30 min。后将提取液抽滤后与 3% 溴水和 10% 硫脲混合, 混合物中加入 2,4-二硝基苯肼溶液。样品 37 ℃ 水浴 3 h, 然后加入 85% 冷冻硫酸。混合物于 521 nm 下

表 2 常用的薄层干燥数学模型

Table 2 Frequently-used mathematical models of thin-layer drying

序号	模型名称	数学表达式
1	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
2	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
3	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
4	Weibull distribution	$MR = \exp[-(t/\beta)^\alpha]$
5	Two-term model	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
6	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$

注: 式中 t 为桑果干燥时间, h; $k, k_0, k_1, n, a, b, c, \alpha, \beta$ 为常数。

表 3 梯度洗脱程序

Table 3 Gradient elution procedure

T(min)	A(%)	B(%)
0.0~5.0	95	5
5.0~25.0	88	12
25.0~40.0	70	30
40.0~50.0	55	45
50.0~60.0	95	5

测定其吸光度。所得结果以每 100 g 桑葚样品中 L-抗坏血酸的含量表示(mg AA/100 g)。

1.2.7 抗氧化能力测定 取 5 g 桑葚果肉,充分研磨后用 20 mL 80% 甲醇溶液超声提取 30 min(功率为 1500 W),抽滤后收集滤液,重复提取 3 次,合并滤液并用 80% 甲醇定容至 100 mL,用于抗氧化能力测定。

桑葚抗氧化能力的测定采用 DPPH 自由基清除法(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼, DPPH)及铁离子还原法(Ferric ion reducing antioxidant power, FRAP), DPPH 自由基清除能力测定使用 Trolox 作为标准对照品,结果以 mgTE/g 表示,FRAP 铁还原能力的测定使用维生素 C 作为标准对照品,结果以 mgAAE/100 g 表示^[20]。

1.2.8 总能耗测定 干燥过程中的能耗是衡量干燥工艺的一个重要指标,桑果不同干燥过程中总能耗计算公式如下^[21]:

$$Q = pt \quad \text{式 (9)}$$

式中, Q 为干燥过程的总能耗, kW/h; P 为干燥机功率, kW; t 为桑果干燥时间, h。

1.3 数据处理

数据结果以三次独立实验的平均值±标准差表示。数据分析使用 SPSS 18.0 软件进行统计处理和差异显著性分析。所得数据之间的相关性使用标准皮尔逊相关, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 桑葚的热风及中短波红外干燥特性分析

2.1.1 桑果的干燥时间曲线及速率曲线 不同干燥方法及干燥温度下桑果的水分比随干燥时间的变化如图 1 所示,随着干燥时间的延长,六组不同干燥条件下桑果干燥水分比皆显示出前期快速下降、后期逐渐变慢的趋势。由图 1 所示,随着干燥温度的提升,无论是热风干燥还是中短波红外干燥,桑果的干燥时间显著($P < 0.05$)缩短(50 °C 热风干燥时间为 28.5 h, 60 °C 热风干燥时间为 22.2 h, 70 °C 热风干燥时间为 16.8 h; 50 °C 中短波红外干燥时间为 18.3 h, 60 °C 中短波红外干燥时间为 15.2 h, 70 °C 中短波红外干燥时间为 12.6 h),相同干燥温度下中短波红外干燥条件下干燥速率明显提高。

不同干燥条件下桑果的干燥速率随时间的变化如图 1 示,桑果的热风及中短波红外干燥过程中皆无明显的干燥速率上升阶段,整个干燥过程皆为降速干燥。随着干燥过程的进行,无论是热风干燥还是中

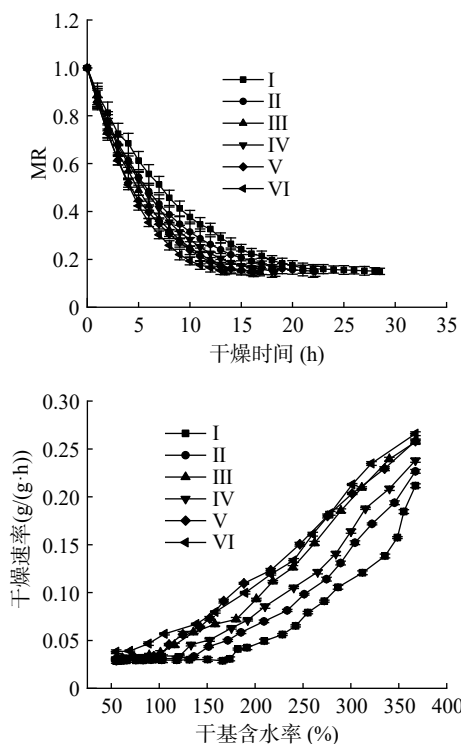


图 1 不同干燥方法及干燥温度下的干燥曲线

Fig.1 Drying curve under different drying methods and drying temperatures

短波红外干燥其干燥速率皆快速下降,水分脱去速率变慢,主要原因为干燥初期桑果细胞中自由水快速脱去,随着干燥时间的延长水分与桑果组织内蛋白质及多糖等亲水性大分子物质结合越发紧密;且细胞在逐渐失水的过程中形成巨大的渗透压差阻止水分继续迁移^[22],这导致干燥速率逐渐变慢。随着干燥温度的上升,相同干燥时间下两种干燥方式干燥桑果的干燥速率皆明显提高,且相同干燥温度下中短波红外干燥速率明显高于热风干燥,主要原因为红外射线穿透力较强,热辐射能量直接穿透物料而不加热周围空气,物料的温度梯度会在短时间内减少,而热风干燥是通过热空气逐渐带走物料表面的水分^[23],因此中短波红外干燥相较于热风干燥能够显著提升其干燥效率。

2.1.2 桑葚中短波红外干燥数学模型的建立及验证

不同干燥方法及干燥温度下桑果的干燥数据与干燥模型拟合结果如表 4 所示,利用 R^2 、 χ^2 和 RMSE 来评价干燥薄层模型的优劣,综合三个参数可以得到: Weibull 分布模型在各干燥温度下的 R^2 值最大, χ^2 和 RMSE 值最小,拟合效果较高,因此桑果的中短波红外干燥最佳干燥数学模型为 Weibull 分布模型。

将三组不同温度(50, 60, 70 °C)中短波红外干燥桑果干燥数据与将所选 Weibull 分布模型的拟合效果进行验证,由图 2 所示,桑果中短波红外干燥模型 MR 预测值与试验值进行对比,可看出所有数据点皆落在 $y=x$ 附近,且误差较小,因此 Weibull 分布模型的预测效果较好,适用于不同干燥温度下桑果的中短波红外干燥。

2.2 不同干燥条件下桑葚的酚类物质含量

相关研究表明桑果中酚类物质含量丰富^[24-25],

表 4 干燥数学模型的拟合结果
Table 4 Fitting results of drying models

模型序号	温度	R^2	$\chi^2(\times 10^{-4})$	RMSE
1	50	0.9901	0.06452	0.05147
	60	0.9915	0.02145	0.01934
	70	0.9912	0.03612	0.02169
2	50	0.9908	0.05135	0.01998
	60	0.9915	0.03128	0.02361
	70	0.9911	0.03612	0.02895
3	50	0.9921	0.02113	0.04598
	60	0.9924	0.02516	0.03522
	70	0.9927	0.02072	0.02784
4	50	0.9993	0.00353	0.00456
	60	0.9997	0.01011	0.00218
	70	0.9991	0.01037	0.00365
5	50	0.9975	0.04226	0.01918
	60	0.9979	0.03479	0.02132
	70	0.9982	0.05214	0.01985
6	50	0.9983	0.03673	0.05698
	60	0.9991	0.02283	0.03258
	70	0.9967	0.03568	0.02887

其具有良好的抗氧化能力而被广泛研究,本文利用高效液相色谱法测定了鲜桑果及不同干燥条件下酚类物质的含量,由表 5 可知,鲜果与不同条件下所制干果中共检测出 12 种单体酚类物质,其中绿原酸、芦丁、儿茶素含量最高,为桑果中最主要的酚酸类物质,鲜果的三种主要酚类物质含量最高,绿原酸含量为 46.8 mg/100 g DW,芦丁的含量为 44.5 mg/100 g DW,儿茶素的含量为 42.9 mg/100 g DW。Jin 等^[26] 研究结果表明绿原酸为黑桑中最主要的酚酸类物质,占其他酚类物质含量的 90% 以上;Memon 等^[27] 研究结果表明绿原酸,原儿茶酸是黑桑中最主要的酚酸类物质,出现这一现象的原因为不同品种及地理条件所致^[25]。

鲜桑果经不同干燥方式干燥后三种主要酚类物质(绿原酸,芦丁,儿茶素)含量明显降低,桑果干制后其绿原酸含量为鲜果的 43.8%~82.9%,芦丁含量为鲜果的 50.6%~92.6%,儿茶素含量为鲜果的 49.7%~85.1%。鲜果经中短波红外与热风干燥后三种主要

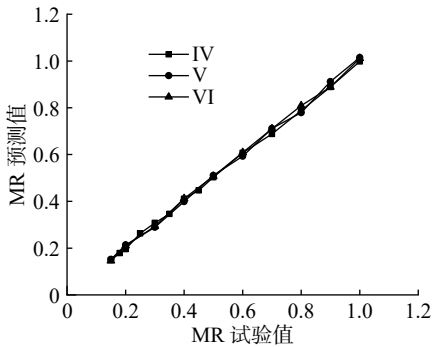


图 2 桑果中短波红外干制 Weibull 分布模型
预测值与实验值

Fig.2 Experimental values and predicted values of short- and medium-wave infrared Weibull distribution model for mulberry

酚类物质含量显著降低($P<0.05$),无论是中短波红外干燥还是热风干燥其三种主要酚类物质含量随着干燥温度的升高而降低,50 ℃ 干燥条件下桑果的三种主要酚酸类物质含量最高,70 ℃ 干燥条件下三种主要酚类物质含量最低。在相同干燥温度下桑果经中短波红外干燥后三种主要酚类物质含量高于热风干燥,Chen 等^[11] 对于红枣的中短波、热风干燥的酚类物质的相关研究也得出类似结论,主要原因为中短波红外干燥干燥时间较短,氧气与酚类物质接触时间较短,酚类物质保留率较高。与三种主要酚类物质变化趋势不同,没食子酸及对香豆酸经中短波红外及热风干燥后其含量显著提高,且干燥温度越高含量越高,出现这一现象的原因可能为温度升高提高了相关酶类的活性,结合态的酚类物质加速分解转化^[28],没食子酸及对香豆酸含量提高。

2.3 总酚、总黄酮、维生素 C、总花色苷含量及抗氧化活性测定

酚类物质的含量是评价桑果品质的一个重要指标,如表 6 所示,鲜桑果具有最高的总酚含量及总黄酮含量(总酚含量为 682.1 mg/100 g,总黄酮含量为 452.2 mg/100 g),鲜桑果经中短波红外及热风干燥后

表 5 不同干燥条件下桑葚酚类物质含量(mg/100 g DW)
Table 5 Contents of phenolics in mulberry fruit under different drying conditions (mg/100 g DW)

酚类	鲜果	I	II	III	IV	V	VI
咖啡酸	11.5±0.2 ^b	9.23±0.4 ^d	8.1±0.2 ^e	11.1±0.1 ^b	11.3±0.4 ^b	10.3±0.3 ^c	13.7±0.3 ^a
儿茶素	42.9±0.6 ^a	36.5±1.0 ^e	33.7±0.4 ^d	28.5±1.1 ^f	31.9±0.5 ^e	27.6±1.4 ^f	21.3±0.8 ^g
阿魏酸	12.8±0.4 ^a	10.4±0.3 ^e	8.4±0.2 ^e	9.4±0.2 ^d	10.1±0.4 ^c	11.2±0.7 ^b	11.3±1.2 ^b
绿原酸	46.8±1.1 ^a	38.8±0.8 ^e	32.3±0.8 ^d	29.6±0.4 ^c	32.4±1.2 ^d	28.3±0.3 ^f	20.5±1.0 ^g
没食子酸	2.9±0.2 ^e	3.5±0.2 ^d	4.7±0.4 ^c	8.5±0.3 ^a	3.9±0.5 ^d	5.6±0.4 ^b	8.3±0.5 ^a
原儿茶酸	13.8±0.3 ^b	10.6±0.3 ^d	10.4±0.3 ^d	11.4±0.8 ^{cd}	12.1±1.1 ^c	12.2±0.7 ^c	15.3±1.1 ^a
香草酸	5.8±0.3 ^a	4.8±0.2 ^b	2.3±0.8 ^e	4.6±0.2 ^b	3.4±1.2 ^d	4.3±0.5 ^e	3.5±0.4 ^d
槲皮素	10.2±1.6 ^a	7.3±0.4 ^c	6.2±0.3 ^d	8.6±0.4 ^b	8.4±0.5 ^b	6.4±0.5 ^d	7.7±0.4 ^c
芦丁	44.5±2.3 ^a	41.2±0.9 ^e	37.6±0.4 ^d	32.2±1.4 ^f	35.1±0.5 ^e	28.5±1.4 ^g	22.5±0.5 ^h
丁香酸	9.2±0.5 ^a	6.5±0.4 ^d	6.0±0.2 ^d	7.5±0.5 ^{bc}	8.5±0.9 ^b	7.2±0.5 ^c	7.7±0.4 ^{bc}
表儿茶素	12.7±0.3 ^a	10.5±0.4 ^c	8.5±0.3 ^c	7.6±0.3 ^d	10.5±0.4 ^c	11.5±0.4 ^b	11.8±0.4 ^b
对香豆酸	4.9±0.2 ^e	5.4±0.3 ^d	6.6±0.3 ^c	8.3±0.6 ^b	6.5±0.6 ^c	7.8±0.7 ^b	10.2±0.5 ^a

注: 同行肩标不同小写字母间有显著性差异($P<0.05$)。

表 6 不同干燥条件下桑葚的营养成分及抗氧化活性

Table 6 Nutrient composition and antioxidant activity of mulberry at different drying conditions

样品	总酚 (mg/100 g DW)	总黄酮 (mg/100 g DW)	维生素C (mg/100 g DW)	总花色苷 (mg/100 g DW)	DPPH (mgTE/g DW)	FRAP (mgAAE/g DW)	总能耗 (kW/h)
鲜果	682.1±18.7 ^a	452.2±7.4 ^a	45.1±1.2 ^a	242.1±9.5 ^a	7.4±0.3 ^a	11.3±0.2 ^a	-
I	568.8±11.2 ^c	402.6±8.8 ^b	37.8±0.7 ^c	195.6±5.7 ^b	6.7±0.2 ^a	9.5±0.2 ^c	20.6±0.3 ^c
II	512.4±9.3 ^d	359.3±5.7 ^c	32.2±0.4 ^d	172.5±4.8 ^c	6.1±0.2 ^b	8.7±0.1 ^d	17.1±0.2 ^c
III	463.1±10.1 ^e	312.6±7.2 ^d	30.1±0.1 ^e	153.6±5.2 ^d	5.4±0.1 ^c	8.2±0.2 ^e	14.2±0.2 ^f
IV	503.4±8.3 ^d	368.3±6.7 ^c	31.2±0.4 ^d	179.5±3.8 ^c	4.5±0.2 ^d	7.5±0.2 ^f	32.1±0.1 ^a
V	453.1±8.1 ^e	322.6±7.2 ^d	26.1±0.3 ^f	151.6±4.2 ^d	4.1±0.1 ^d	6.5±0.2 ^g	25.0±0.2 ^b
VI	401.2±7.5 ^f	289.8±9.5 ^e	21.8±0.3 ^g	126.3±2.4 ^e	3.1±0.2 ^e	5.4±0.2 ^h	18.9±0.1 ^d

注: 同列肩标不同小写字母间有显著性差异($P<0.05$)。

其总酚、总黄酮含量显著下降($P<0.05$), 其总酚含量为鲜果的 58.8%~83.4%, 总黄酮含量为鲜果的 64.1%~89.0%, 同一干燥方式下温度较低的干燥条件桑果的总酚及总黄酮的保留率较高, 可能的原因为干燥温度较低的情况下多酚氧化酶类活性较低, 酚类物质降解速度变慢, 虽然温度较低干燥时间较长, 但在相同干燥方法下所选温度下干燥时间差距并不巨大, 酶活性对于酚类物质的影响占主导地位^[29]。相同干燥温度下中短波红外干燥较热风干燥桑果总酚及总黄酮含量皆显著提高, 这也与 Horszwald 等^[30]对野樱梅的研究结果一致, 主要原因为中短波红外干燥时间较短, 酚类物质与氧气接触时间较短, 保留率较高, 这表明与热风干燥相比中短波红外干燥更有利于总酚及总黄酮的保留。

果蔬中的维生素 C 是一种高效抗氧化剂, 较长时间的干制过程会造成维生素 C 的损失^[31], 因此探究其在干燥过程中的保留率具有重要意义, 如表 6 所示, 桑果经中短波红外干燥和热风干燥后维生素 C 含量显著下降, 中短波红外干燥桑果中维生素 C 含量下降 16.2%~33.3%, 热风干燥桑果其维生素 C 含量下降更为明显, 其含量下降了 30.8%~51.7%, 相同干燥方式下桑果中维生素 C 含量随着干燥温度的升高而逐渐降低, 50 ℃ 条件下干燥桑果的维生素 C 含量最高(中短波红外干燥条件下为 37.8 mg/100 g, 热风干燥条件下为 31.2 mg/100 g), 相同干燥温度下中短波红外干燥桑果的维生素 C 保留率最高, 主要原因中短波红外干燥效率较高, 维生素 C 降解较少, 因此中短波红外干燥与热风干燥相比是保留桑果维生素 C 的较好的干燥方式。

不同干燥条件下桑果的 DPPH 自由基清除能力如表 6 所示, 桑果鲜果的 DPPH 自由基清除能力最强, 鲜果经中短波红外干燥和热风干燥后 DPPH 自由基清除能力有所下降, 且变化趋势与总酚、总黄酮含量的变化趋势一致, 这也与前人的研究结果一致^[32], 表明桑果的抗氧化能力与酚类物质含量具有明显的相关性。相同干燥温度下, 桑果经中短波红外干燥后其 DPPH 自由基清除能力高于热风干燥桑果, 50 ℃ 中短波红外干燥条件下桑果的 DPPH 自由基清除能力最强(6.7 mgTE/g)。不同干燥条件下桑果的铁离子还原能力如表 6 所示, 在不同干燥条件下

桑果的铁离子还原能力与 DPPH 自由基清除能力变化趋势类似, 50 ℃ 中短波红外干燥条件下桑果的铁离子还原能力最强(9.5 mgAAE/g), 相同干燥温度下中短波红外干制桑果的铁离子还原能力最强, 这表明中短波红外干燥桑果具有更强的抗氧化能力。

2.4 桑果干燥过程中总能耗

果蔬干燥过程中的总能耗是评价干燥技术的一项重要手段, 由表 6 可知不同干燥条件下桑果的干燥总能耗具有显著性差异($P<0.05$), 桑果经不同干燥温度(50、60、70 ℃)热风干燥其总能耗分别为: 32.1、25.0、18.9 kW/h; 而经不同干燥温度(50、60、70 ℃)中短波红外干燥其总能耗分别为 20.6、17.1、14.2 kW/h。相同干燥温度条件下中短波红外干燥所需能耗显著降低($P<0.05$), 50 ℃ 干燥条件下能耗降低 35.8%, 60 ℃ 干燥条件下能耗降低 31.5%, 70 ℃ 干燥条件下能耗降低 25%。因此相较于热风干燥, 中短波红外干燥所需能耗较低。

3 结论

相较于热风干燥, 中短波红外干燥能够显著提高干燥效率($P<0.05$), 且 Weibull 分布模型能够较好的模拟桑果在不同干燥温度下的中短波红外干燥过程。不同干燥条件干燥桑果共检测出 12 种单体酚酸类物质, 其中绿原酸、芦丁、儿茶素为主要的酚酸类物质, 相同干燥温度下, 桑果经中短波红外干燥后其总酚、总黄酮、维生素 C、总花色苷含量较高。且与热风干燥相比桑果经中短波红外干燥后抗氧化活性显著增强($P<0.05$), 干燥能耗显著降低($P<0.05$)。中短波红外干燥桑果干燥速率较高, 干燥营养品质较好, 干果抗氧化能力较强, 干燥能耗较低, 本文可为桑果的干制加工提供一种优良的干燥方式参考, 对提高桑果干制品品质, 增加桑果行业经济效益提供理论依据, 后续研究可将干燥过程中相关酶类的活性进行进一步深入研究, 进一步探究酚类物质含量与多酚氧化酶活性、干燥温度及干燥时间的关系。

参考文献

- [1] 孙乐, 张小东, 郭迎迎. 桑葚的化学成分和药理作用研究进展[J]. 人参研究, 2016, 28(2): 49-54.
- [2] Chen C C, Liu L K, Hsu J D, et al. Mulberry extract inhibits the development of atherosclerosis in cholesterol-fed rabbits[J].

Food Chemistry, 2005, 91(4): 601–607.

- [3] Wasim M, Daud M, Arif M, et al. Characterisation of some exotic fruits (*Morus nigra*, *Morus alba*, *Salvadora persica* and *Carissa opaca*) used as herbal medicines by neutron activation analysis and estimation of their nutritional value[J]. Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry, 2012, 292(2): 653–659.
- [4] Chen Q Q, Li Z L, Bi J F, et al. Effect of hybrid drying methods on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of dried black mulberry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 178–184.
- [5] 郭婷, 吴燕, 陈益能, 等. 热风干燥温度对大果山楂干燥产品品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 184–188.
- [6] Wang J M, Wu G X, Wang Z N, et al. The influence of processing conditions on kinetics, anthocyanin profile and antioxidant activity of purple sweet potato subjected to hot air drying[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(9): e13472.
- [7] 高静静, 冯作山, 白羽嘉. 真空冷冻和热风干燥对哈密瓜片品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 36(3): 78–84.
- [8] Aneta W, Adam F, Pilar L, et al. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method[J]. Food Chemistry, 2016, 207(15): 170–179.
- [9] Huang L L, Zhang M, Yan W Q, et al. Effect of coating on post-drying of freeze-dried strawberry pieces[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(1): 107–111.
- [10] Swasdisevi T, Devahastin S, Sa-Adchom P, et al. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(1): 100–106.
- [11] Chen Q, Bi J, Wu X, et al. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 64(2): 759–766.
- [12] 游庭活, 温露, 刘凡, 等. 不同干燥方式及温度条件对桑椹干营养保健品质的影响[J]. 蚕业科学, 2015, 41(5): 921–927.
- [13] 李斌, 王夷秀, 毕金峰, 等. 热风与中短波红外泡沫干燥对桑葚粉品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 47–52.
- [14] Kipcak A S, Doymaz I. Mathematical modeling and drying characteristics investigation of black mulberry dried by microwave method[J]. International Journal of Fruit hence, 2020, 4: 1–12.
- [15] Zhu B M, Wu X S, Wang G D. Effect of pre-treatments on drying characteristics of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller)[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2014, 7(1): 94–102.
- [16] Kwaw E, Ma Y, Tchabo W, et al. Impact of ultrasonication and pulsed light treatments on phenolics concentration and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 92: 61–66.
- [17] Suênia G, Goncalves M, Borgess G, et al. Effects of probiotics on the content and bioaccessibility of phenolic compounds in red pitaya pulp[J]. Food Research International, 2019, 126: 108681.
- [18] Natic M M, Dabic D C, Papetti A, et al. Analysis and

characterisation of phytochemicals in mulberry (*Morus alba* L.) fruits grown in Vojvodina, North Serbia[J]. Food Chemistry, 2015, 171: 128–136.

- [19] Rahman M M, Khan M R, Hosain M M. Analysis of vitamin C (ascorbic acid) contents in various fruits and vegetables by UV-spectrophotometry[J]. Bangladesh Journal of Scientific & Industrial Research, 2008, 42(4): 417–424.
- [20] Kou X H, Chen Q, Li X H, et al. Quantitative assessment of bioactive compounds and the antioxidant activity of 15 jujube cultivars[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 1037–1044.
- [21] 王招招, 路风银, 朱广成, 等. 花生果微波-热风耦合干燥特性及能耗分析[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(1): 140–146.
- [22] Sarsavadia P N. Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion[J]. Renewable Energy, 2007, 32(15): 2529–2547.
- [23] 李聪, 周沫, 毕金峰, 等. 热风和中短波红外干燥对桃渣干燥特性及多酚含量的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(12): 137–144.
- [24] 李妍, 刘学铭, 刘吉平, 等. 不同果桑品种桑椹成熟过程中非花青素酚类物质的含量变化[J]. 蚕业科学, 2008, 34(4): 711–717.
- [25] Ibrahim K, Wei Z, Li K K, et al. Polyphenols of mulberry fruits as multifaceted compounds: Compositions, metabolism, health benefits, and stability-A structural review[J]. Journal of Function Food, 2018, 40: 28–43.
- [26] Jin Q, Yang J, Ma L, et al. Comparison of polyphenol profile and inhibitory activities against oxidation and α -glucosidase in mulberry (genus *Morus*) cultivars from China[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(11): C2440–C2451.
- [27] Memon A A, Memon N, Luthria D L, et al. Phenolic acids profiling and antioxidant potential of mulberry (*Morus laevigata* W., *Morus nigra* L., *Morus alba* L.) leaves and fruits grown in Pakistan[J]. Polish Journal of Food and Nutrition ences, 2010, 60(1): 25–32.
- [28] Mahmood T, Anwar F, Afzal N, et al. Influence of ripening stages and drying methods on polyphenolic content and antioxidant activities of mulberry fruits[J]. Journal of Food Measurement & Characterization, 2017(1): 1–9.
- [29] Wu C, Gao Q H, Guo X D, et al. Effect of ripening stage on physicochemical properties and antioxidant profiles of a promising table fruit ‘pear-jujube’ (*Zizyphus jujuba* Mill.)[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 148: 177–184.
- [30] Horszwald A, Ulien H, Andlauer, W, et al. Characterisation of Aronia powders obtained by different drying processes[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2858–2863.
- [31] Wojdyło A, Figiel A, Oszmianski J, et al. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(4): 1337–1343.
- [32] Xie P J, You F, Huang L X, et al. Comprehensive assessment of phenolic compounds and antioxidant performance in the developmental process of jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.)[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 36: 233–242.