

黑果腺肋花楸干燥过程中水分迁移规律 及抗氧化能力变化

刘 鹏^{1,2} 李昕瑶² 李 明^{1,2}

(1. 通化师范学院长白山食用植物资源开发工程中心, 吉林 通化 134002;

2. 通化师范学院食品科学与工程学院, 吉林 通化 134002)

摘要: [目的] 探究黑果腺肋花楸不同热风干燥温度下的水分迁移规律及品质变化。[方法] 考察热风温度(60, 70, 80, 90 °C)对黑果腺肋花楸热风干燥曲线和干燥特性曲线的影响, 选取常用的适用于果蔬的 8 种干燥模型进行拟合、分析及验证, 筛选出最佳的黑果腺肋花楸热风干燥模型。基于低场核磁共振和成像技术分析干燥过程中水分分布状态及变化规律, 并以总酚含量、总黄酮含量、抗氧化能力和花色苷含量为指标, 评价不同干燥温度对黑果腺肋花楸品质的影响。[结果] 黑果腺肋花楸干燥过程中水分比曲线呈指数衰减, 通过拟合发现 Weibull distribution 模型拟合度最好。当热风温度为 90 °C 时, 黑果腺肋花楸中多酚和黄酮含量最高, 分别为 0.044 6, 0.048 2 mg/g, 此时抗氧化能力最佳, DPPH 自由基清除率为 11.1596%; 当热风温度为 60 °C 时, 黑果腺肋花楸中花色苷含量最高, 为 0.408 8 mg/g。[结论] 黑果腺肋花楸的最佳热风干燥温度为 90 °C, 此条件下的黑果腺肋花楸品质较为突出。

关键词: 黑果腺肋花楸; 热风干燥; 干燥动力学; 低场核磁共振; 品质分析

Moisture migration patters and antioxidant capacity changes during the drying of *Aronia melanocarpa*

LIU Peng^{1,2} LI Xinyao² LI Ming^{1,2}

(1. Changbai Mountain Edible Plant Resources Development Engineering Center, Tonghua Normal

University, Tonghua, Jilin 134002, China; 2. College of Food Science and Engineering,

Tonghua Normal University, Tonghua, Jilin 134002, China)

Abstract: [Objective] To investigate the moisture migration patterns and quality changes of *Aronia melanocarpa* under different hot air drying temperatures. [Methods] The effects of hot air temperatures (60, 70, 80, and 90 °C) on the drying curves and drying characteristic curves of *A. melanocarpa* were investigated. Eight commonly used drying models suitable for fruits and vegetables were selected for fitting, analysis, and validation to identify the optimal hot air drying model for *A. melanocarpa*. Water distribution status and changes during drying were analyzed using low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and imaging techniques. The effects of different drying temperatures on quality were evaluated based on total phenolic content, total flavonoid content, antioxidant capacity, and anthocyanin content. [Results] The moisture ratio curve of *A. melanocarpa* exhibited exponential decay during drying, with the Weibull distribution model showing the best fit. At 90 °C, the polyphenol content and flavonoid content were highest, at 0.044 6 mg/g and 0.0482 mg/g respectively, and antioxidant capacity peaked, with a DPPH radical scavenging rate of 11.159 6%. At 60 °C, anthocyanin content was highest at 0.408 8 mg/g. [Conclusion] The optimal hot air drying temperature for *A. melanocarpa* is 90 °C, under which the quality of *A. melanocarpa* is most prominent.

Keywords: *Aronia melanocarpa*; hot air drying; drying kinetics; low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR); quality analysis

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(编号: JJKH20200486KJ)

通信作者: 李明(1979—), 男, 通化师范学院正高级实验师, 博士。E-mail: lidaoen@163.com

收稿日期: 2025-02-15 改回日期: 2025-07-31

引用格式: 刘鹏, 李昕瑶, 李明. 黑果腺肋花楸干燥过程中水分迁移规律及抗氧化能力变化[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 21-29.

Citation: LIU Peng, LI Xinyao, LI Ming. Moisture migration patters and antioxidant capacity changes during the drying of *Aronia melanocarpa*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 21-29.

黑果腺肋花楸(*Aronia melanocarpa*)又称不老莓,属于蔷薇科植物,原产于北美,目前在欧洲和亚洲被广泛种植^[1]。新鲜的黑果腺肋花楸由于味道苦涩,很少直接食用,其可食用部分大多是黑色的小樱桃状浆果,在食品工业中被用于生产果汁、酱汁、果酱、果茶和膳食补充剂^[2-3]。有研究^[4-6]显示,黑果腺肋花楸富含多种有益健康成分,如多酚、花青素和类黄酮等。与许多果蔬一样,黑果腺肋花楸的水分含量较高,不利于保存和运输。

干燥是新鲜果蔬最重要的保鲜技术之一^[7],可降低产品水分活度,保护产品免受微生物和酶活性的影响,从而延长果蔬保质期^[8-10]。同时,干燥还有助于降低贮藏和运输成本^[11]。热风干燥具有成本相对低廉、方便使用和广泛适用等优势,被广泛应用于果蔬干燥^[12]。

低场核磁共振技术(LF-NMR)已成为监测和评估水分含量、水分迁移和分布的有力工具,被广泛应用于食品科学、化学和医学等领域^[13]。水分含量和分布可通过弛豫时间(T_2)来确定^[14]。NMR 信号和 T_2 弛豫曲线的峰面积可以检测产品中的 ^1H 含量^[15-16]。Zhu 等^[17]发现,LF-NMR 可以使用总信号振幅和 MRI 图像便捷地预测干燥过程中李子水分含量。谭宏渊等^[18]利用 LF-NMR 探究了不同预处理方式对热风干燥山药片干燥特性的影响。然而,LF-NMR 尚未被应用于表征干燥过程中黑果腺肋花楸的水分迁移变化。

试验拟采用 60, 70, 80, 90 °C 的干燥温度对黑果腺肋花楸进行热风干燥,分析干燥温度对其干燥特性的影响,采用常用干燥模型进行数据拟合并采用 LF-NMR 方法探究内部水分变化规律。同时,分析干燥产品的总酚、总黄酮、花青素含量及抗氧化能力,旨在为黑果腺肋花楸的加工利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜黑果腺肋花楸:市售;

2,2-二苯基-1-苦基肼、福林酚试剂:上海麦克林生化科技股份有限公司;

没食子酸碳酸钠、乙醇、芦丁、硝酸铝、氢氧化钠、氯化钾、无水醋酸钠、亚硝酸钠:分析纯,中国医药集团有限公司。

1.2 仪器与设备

电热鼓风干燥箱:GZX-9030MBE 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;

离心机:TDL-80-2B 型,上海安亭科学仪器厂;

电热恒温水浴锅:HHS 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;

电子天平:FA1204 型,上海市安亭电子仪器;

pH 计:PHS-3G 型,上海雷磁仪器有限公司;

可见分光光度计:722N 型,上海仪电分析仪器有限公司;

中尺寸核磁共振成像分析仪:MesoMR23-060H-I 型,苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 干燥试验 将黑果腺肋花楸均匀平铺在玻璃平皿中,置于恒温干燥箱内进行干燥(风速 1.0 m/s),当物料含水量到达安全水分(14%,以湿基计)时停止干燥。干燥温度分别为 60, 70, 80, 90 °C,每隔 1 h 记录一次质量变化。

1.3.2 黑果腺肋花楸干基含水率、干燥速率和水分比测定 分别按式(1)~式(3)计算黑果腺肋花楸干基含水率^[19-20]、干燥速率^[21]和水分比^[22]。

$$W = \frac{M_t - M_d}{M_d} \times 100\%, \quad (1)$$

$$D_R = \frac{W_{t_1} - W_{t_2}}{t_1 - t_2}, \quad (2)$$

$$M_R = \frac{M_t - M_g}{M_0 - M_g}, \quad (3)$$

式中:

W ——黑果腺肋花楸干基含水率,%;

M_t ——黑果腺肋花楸 t 时刻的质量,g;

M_d ——绝干黑果腺肋花楸的质量,g;

D_R ——干燥速率,%/h;

W_{t_1} —— t_1 时刻的干基含水率,%;

W_{t_2} —— t_2 时刻的干基含水率,%;

t_1 ——某时刻时间,h;

t_2 ——另一时刻时间,h;

M_R ——水分比;

M_0 ——样品的初始质量,g;

M_g ——干燥至安全水分的黑果腺肋花楸质量,g。

1.3.3 数学模型建立 将黑果腺肋花楸干燥过程中水分比的变化与常用于食品干燥的 8 个经典动力学模型进行拟合,干燥动力学模型表达式见表 1^[21-23]。

为了评估数学模型的效果,借助决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)以及卡方值(χ^2)作为衡量标准。

1.3.4 核磁共振分析 将待测样品放入低场核磁共振分析仪中,利用多脉冲回波序列(CPMG)采集样品的横向弛豫时间(T_2),利用反演软件对所得数据进行反演,得到黑果腺肋花楸样品的 T_2 反演谱图。其主要参数设置:偏移频率 171 736.83 Hz, 90°脉冲时间 6.8 μs , 180°脉冲时间 11.6 μs , 采样点数 400 008, 前放档位 2, 采样等待时间 2 000 ms, 回波时间 0.16 ms, 累加次数 8, 回波个数 10 000。

利用核磁共振成像(MRI)检测样品中的内部水分分布。采用自旋回波(SE)序列获得 T_2 加权图像。所有图像的视场(FOV)为 50 mm × 50 mm, 切片厚度为 2.0 mm, 切片间隙为 2.0 mm, 回波时间(TE)为 20.00 ms, 重复时间(TR)为 2 360.00 ms。

1.3.5 活性成分及抗氧化能力测定

(1) 样液制备:采用乙醇溶剂浸提法^[24]。

表1 干燥动力学模型表达式[†]

Table 1 Drying kinetics model expression

模型名称	表达式	模型名称	表达式
Newton	$M_R = \exp(-At)$	Logaritlunic	$M_R = A \exp(-Bt) + C$
Page	$M_R = \exp(-At^B)$	Midilli	$M_R = A \exp(-Bt^C) + Dt$
Henderson and Pabis	$M_R = A \exp(-Bt)$	Weibull distribution	$M_R = A - B \exp[-(Ct^D)]$
Modified page	$M_R = \exp[-(At)^B]$	Wang and Singh	$M_R = At^2 + Bt + 1$

[†] A、B、C、D为模型参数。

(2) 总酚含量测定:采用福林酚法^[25]。

(3) 总黄酮含量测定:采用NaNO₂-Al(NO₃)₃-NaOH法,以芦丁溶液作为标准品绘制标准曲线^[25]。

(4) DPPH自由基清除能力测定:取1 mL稀释后的提取液,与2 mL 2×10⁻⁴ mol/L的DPPH乙醇溶液混匀,避光静置30 min,测定517 nm处吸光度。取1 mL无水乙醇与2 mL DPPH乙醇溶液混匀,测定517 nm处吸光度。取1 mL稀释后的样液与2 mL无水乙醇混匀,测定吸光度。以无水乙醇调零^[26]。以0.2 g/L的维生素C水溶液作为试验对照。按式(4)计算DPPH自由基清除率。

$$P = \frac{1 - A_1 - A_2}{A_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

P——DPPH自由基清除率,%;

A₀——样液与2 mL无水乙醇在517 nm处吸光度;

A₁——稀释后的提取液与2 mL 2×10⁻⁴ mol/L的DPPH乙醇溶液在517 nm处吸光度;

A₂——无水乙醇与2 mL DPPH乙醇溶液在517 nm处吸光度。

(5) 花色苷含量测定:采用pH示差法^[27]。按式(5)计算花色苷含量。

$$Q = \frac{A \times M \times D_F}{\epsilon \times L}, \quad (5)$$

式中:

Q——花色苷含量,mg/g;

A——吸光度, $A = (A_{510} - A_{700})_{pH 1.0} - (A_{510} - A_{700})_{pH 4.5}$;

M——矢车菊素-3-葡萄糖苷相对分子质量,449.2;

ε——矢车菊素-3-葡萄糖苷的消光系数,26 900;

D_F——稀释倍数,25;

L——比色皿的光路长,1 cm。

1.4 数据分析

使用Origin 2021软件绘图并进行干燥动力学模型拟合;使用IBM SPSS Statistics 26软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 黑果腺肋花楸的热风干燥特性

由图1(a)可知,随着干燥温度从60℃升高到90℃,干燥时间从34 h缩短到7 h。在一定的温度范围内(60~90℃),由于干燥温度升高,干燥过程明显加快,从而缩短了干燥时间,与Vega-Gálvez等^[28]的研究结果相似,可能是因为随着空气温度的升高,热能密度和传热速率也随之增加,从而导致水分蒸发更快^[29]。黑果腺肋花楸的干燥时间从60℃升至70℃、70℃升至80℃、80℃升至90℃分别缩短了1.12,0.23,0.86倍,表明干燥时间的缩短与温度的升高并不具有相同的梯度区间。

由图1(b)可知,黑果花楸热风干燥过程分为升速、恒速、降速3个阶段。干燥速率随干燥温度的升高而增加,在90℃时干燥速率最大。因此,将物料含水量降至所需

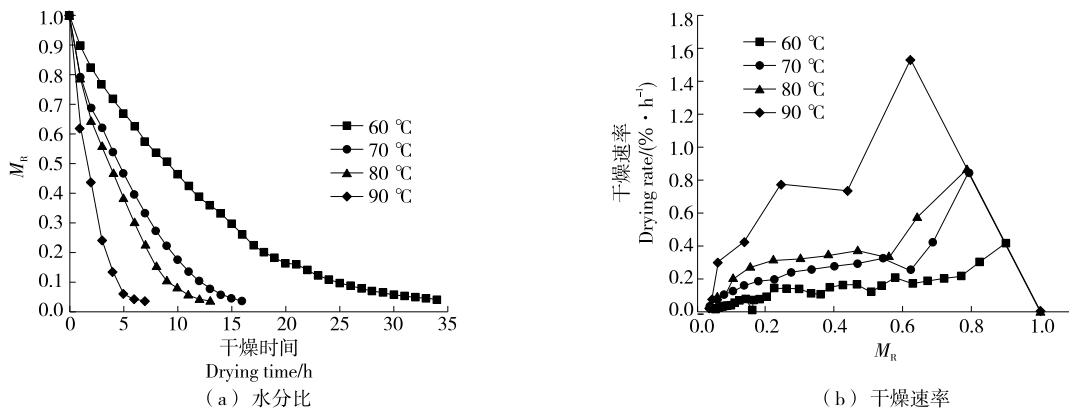


图1 不同热风干燥温度下黑果腺肋花楸干燥特性及干燥速率曲线

Figure 1 Drying characteristics and drying rate curves of *Aronia melanocarpa* under different hot air drying temperatures

水平的干燥持续时间直接取决于干燥温度,与 Botrel 等^[30-31]的研究结论类似。

2.2 黑果腺肋花楸的热风干燥动力学模型拟合

将 8 个经典干燥模型与试验数据进行拟合,并计算决定系数值,以评估拟合的好坏, R^2 越大, χ^2 和 RMSE 越小,表明拟合方程越好。由表 2 可知,所有拟合模型的 R^2 均较高,为 0.986 60~0.997 98,说明试验中应用的所有模型均能描述干燥特性。此外,在所有温度下,Weibull distribution 模型的 R^2 最高, RMSE 最低, χ^2 也处于较低水平。因此, Weibull distribution 模型被认为是描述和预测

黑果腺肋花楸干燥过程的最佳模型。由图 2 可知, Weibull 模型与试验值十分吻合,表明 Weibull distribution 模型可以预测黑果腺肋花楸的热风干燥过程。

2.3 不同温度下干燥的黑果腺肋花楸的低场核磁共振分析

干燥过程会降低食品材料中的游离 ^1H 含量,进而影响其水分状态和分布。较少的 ^1H 可缩短横向弛豫时间 (T_2),从而表明水与环境中的大分子之间存在密切联系^[32]。由图 3 可知, T_2 曲线可分为 3 个区域: T_{21} (0.01~10 ms)、 T_{22} (10~100 ms) 和 T_{23} (100~1 000 ms)^[33-34]。弛豫

表 2 不同模型的干燥模型常数和统计参数
Table 2 Drying model constants and statistical parameters of different models

模型名称	干燥温度/℃	模型参数				统计参数		
		A	B	C	D	R^2	χ^2	RMSE
Newton	60	0.084 40				0.994 22	0.000 45	0.002 61
	70	0.169 13				0.989 47	0.000 90	0.003 47
	80	0.216 01				0.989 80	0.000 96	0.003 34
	90	0.470 73				0.995 28	0.000 56	0.001 39
Page	60	0.068 50	1.079 06			0.996 22	0.000 31	0.001 70
	70	0.154 48	1.046 47			0.990 16	0.000 89	0.003 26
	80	0.183 32	1.095 55			0.992 23	0.000 79	0.002 54
	90	0.434 90	1.080 99			0.996 48	0.000 49	0.001 04
Henderson and Pabis	60	1.008 55	0.085 13			0.994 31	0.000 46	0.002 56
	70	0.990 74	0.167 53			0.989 60	0.000 94	0.003 44
	80	1.008 02	0.217 73			0.989 89	0.001 03	0.003 31
	90	1.006 65	0.473 61			0.995 34	0.000 64	0.001 37
Modified page	60	0.083 55	0.019 52			0.996 22	0.000 31	0.001 70
	70	0.167 78	1.047 93			0.990 16	0.000 89	0.003 26
	80	0.212 52	1.096 67			0.992 23	0.000 79	0.002 54
	90	0.462 87	1.081 29			0.996 48	0.000 49	0.001 04
Logaritlunic	60	1.053 97	0.071 40	-0.070 34		0.997 84	0.000 18	0.000 97
	70	1.075 97	0.128 74	-0.114 75		0.995 88	0.000 40	0.001 36
	80	1.085 13	0.171 10	-0.103 72		0.996 07	0.000 43	0.001 29
	90	1.034 09	0.432 03	-0.035 17		0.996 72	0.000 54	0.000 96
Midilli	60	0.968 26	0.062 73	1.080 04	-0.000 87	0.997 89	0.000 18	0.000 95
	70	0.986 73	0.174 47	0.863 41	-0.008 49	0.996 73	0.000 34	0.001 08
	80	0.988 97	0.195 75	0.966 27	-0.006 69	0.995 95	0.000 50	0.001 33
	90	0.996 01	0.434 61	1.050 17	-0.002 25	0.996 70	0.000 69	0.000 97
Weibull distribution	60	-0.044 22	-1.014 81	0.063 10	1.060 50	0.997 98	0.000 17	0.000 91
	70	-0.283 03	-1.271 27	0.143 57	0.837 59	0.997 06	0.000 31	0.000 98
	80	-0.145 35	-1.135 64	0.178 65	0.940 60	0.996 25	0.000 46	0.001 23
	90	-0.023 80	-1.020 19	0.427 55	1.034 57	0.996 79	0.000 67	0.000 94
Wang and Singh	60	-0.063 78	0.001 08			0.993 00	0.000 57	0.003 16
	70	-0.127 10	0.004 28			0.986 60	0.001 22	0.004 43
	80	-0.160 76	0.006 77			0.992 03	0.000 81	0.002 61
	90	-0.337 48	0.029 11			0.991 23	0.001 21	0.002 57

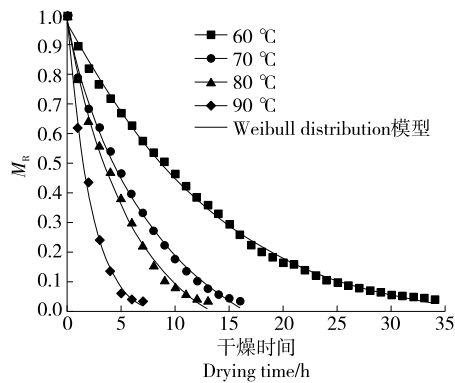


图2 Weibull distribution 模型验证

Figure 2 Weibull distribution model validation

时间最短的 T_{21} 代表与大分子紧密结合的结合水; T_{22} 代表夹带在高度组织化的结构中的不流动水; 弛豫时间最长的 T_{23} 代表存在细胞结构的液泡、原生质体和细胞外基质中的自由水^[33-35]。随着干燥时间的延长, T_2 明显下降。 T_{22} 和 T_{23} 变化较大, T_{21} 变化较小, 表明失水主要来自黑果腺肋花楸中的自由水和不流动水。 T_2 曲线向左移动, 表明随着干燥时间的延长, 水的流动性降低。

峰面积 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 和 A_{Total} 分别表示各组水分含量及其总量^[36]。干燥过程中, 水分含量和水分状态发生了明显变化。干燥初期, A_{23} 、 A_{22} 较大, 表明黑果腺肋花楸内部水分主要为游离水和不流动水。随着干燥时间的延长, A_{23} 迅速下降, 表明在所有试验干燥温度下, 液泡和细胞间

隙的含水量都有所下降。然而, A_{21} 、 A_{22} 均呈先上升后下降趋势, 总体上逐渐下降。由此可以推断, 在干燥的早期阶段, 热风会破坏细胞膜, 游离水通过与大分子相互作用变为流动性较差的水, 导致不可流动的结合水量增加。在热风的持续作用下, 样品中的水分不断向外扩散, 因此总量减少。在黑果腺肋花楸干燥过程的初始, A_{23} 明显降低, 表明其主要损失的是游离水, 因此损失速度较快。这与图1的研究结果相吻合, 分别对应于 60, 70, 80, 90 °C 干燥温度下的 28, 12, 8, 5 h 后, A_{23} 无明显差异, 表明在干燥的后期阶段, 水分主要以结合水的形式存在, 直到干燥过程结束^[37]。

MRI 分析可以直观地揭示黑果腺肋花楸干燥过程中水分布的变化。选择在 90 °C 下干燥的样品进行成像分析。在伪彩色成像中, 较红的成像颜色表示较高的弛豫信号, 较蓝的颜色表示较低的弛豫信息^[37-38]。由图4可知, 黑果腺肋花楸的水分主要分布在果肉部分, 信号较强。在表皮中由于纤维素和果胶类物质含量高, 含水量低, 信号弱。果实内部存在 5 个小腔室, 随着干燥时间的延长, 样品直径减小, 内部水分减少。果肉部分的红色较深, 表明 1H 密度和水分含量较高。这可能是由于温度梯度, 水在干燥过程中向外和向内扩散, 但总含水量继续降低, 直到干燥至安全水分。干燥 4 h 后, 水分趋于均匀分布。干燥 5 h 后, 成像信号变弱, 自由水趋于消失。

2.4 干燥温度对黑果腺肋花楸品质的影响

由图5可知, 随着干燥温度的升高, 样品中多酚、黄酮

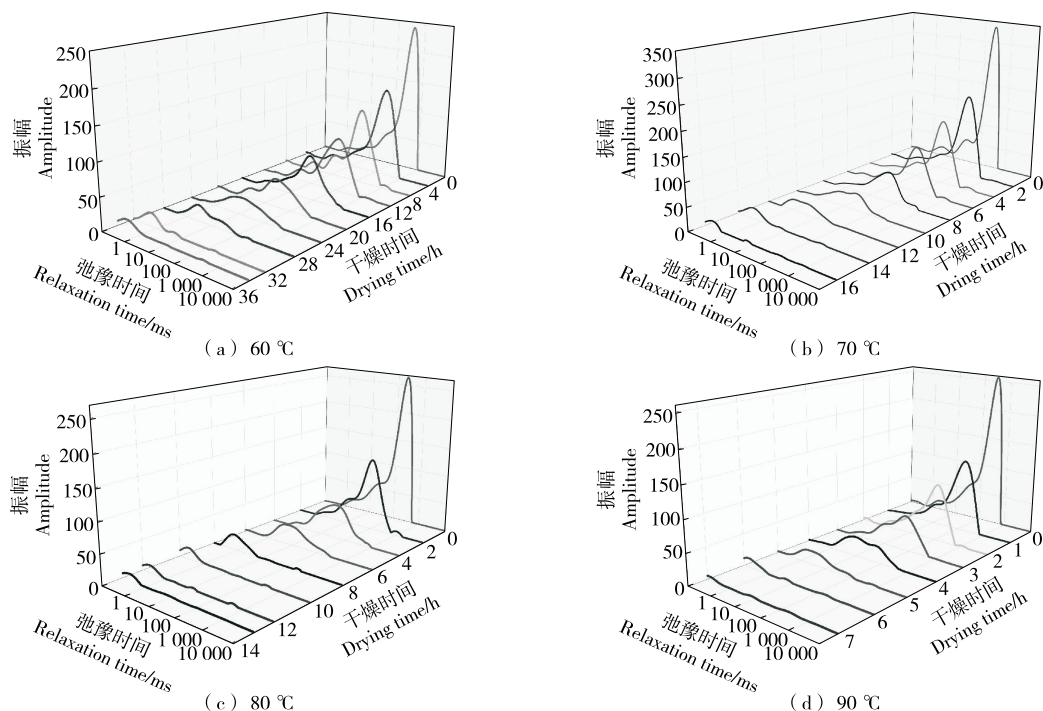
图3 黑果腺肋花楸在 60, 70, 80, 90 °C 干燥过程中的 T_2 谱图Figure 3 T_2 relaxation spectra of *Aronia melanocarpa* during drying at 60, 70, 80, and 90 °C

表 3 干燥时间对不同热风干燥温度下黑果腺肋花楸 LF-NMR 参数的影响[†]

Table 3 Effect of drying time on LF-NMR parameters of *Aronia melanocarpa* under different hot air drying temperatures

干燥温度/℃	干燥时间/h	A_{21}/g	A_{22}/g	A_{23}/g	A_{Total}/g
60	0	134.76±25.46 ^b	4 169.60±285.34 ^c	109 284.86±1 356.89 ^a	113 589.22±1 777.19 ^a
	4	120.47±16.27 ^c	4 927.22±312.62 ^b	63 249.37±1 334.15 ^b	68 297.06±1 217.00 ^b
	8	125.54±40.16 ^{bc}	5 310.85±71.24 ^a	40 726.43±1 686.37 ^c	46 162.82±456.57 ^c
	12	135.23±25.91 ^b	5 392.89±220.65 ^a	24 963.98±365.10 ^d	30 492.10±1 089.00 ^d
	16	146.77±16.97 ^b	4 959.98±553.28 ^b	14 828.10±398.75 ^e	19 934.85±222.14 ^e
	20	146.44±30.23 ^b	3 303.71±325.36 ^d	6 429.51±52.40 ^f	9 879.66±465.27 ^f
	24	179.09±17.62 ^a	1 771.82±136.37 ^e	2 098.90±184.65 ^g	4 049.81±165.75 ^g
	28	162.24±25.14 ^{ab}	623.05±160.24 ^f	422.31±85.16 ^h	1 207.59±100.20 ^h
	32	47.17±9.12 ^d	210.06±79.37 ^g	487.38±134.32 ^h	744.61±76.34 ⁱ
	34	15.57±12.32 ^e	85.46±47.52 ^h	468.11±90.32 ^h	569.13±32.18 ^j
70	0	132.73±7.28 ^c	5 739.86±663.25 ^c	96 495.63±1 026.13 ^a	102 368.22±886.54 ^a
	2	158.02±25.37 ^{bc}	7 223.55±356.87 ^a	51 491.02±253.64 ^b	58 872.59±506.32 ^b
	4	176.61±16.54 ^b	7 586.20±445.69 ^a	30 098.67±324.12 ^c	37 861.48±498.14 ^c
	6	184.53±37.68 ^b	6 839.79±616.32 ^b	15 884.33±523.16 ^d	22 908.65±1 334.56 ^d
	8	180.92±24.36 ^b	5 012.06±156.43 ^c	7 425.86±826.31 ^c	12 618.84±465.20 ^e
	10	223.51±36.84 ^a	2 382.43±236.69 ^d	1 533.66±179.64 ^f	4 139.60±652.49 ^f
	12	204.42±31.16 ^a	235.55±154.32 ^e	558.38±113.52 ^g	998.35±103.85 ^g
	14	40.23±20.10 ^d	28.18±25.43 ^f	436.50±46.80 ^g	504.91±49.73 ^h
	16	17.83±5.34 ^e	51.10±36.72 ^f	453.72±17.53 ^g	522.65±52.62 ^h
	18	17.83±5.34 ^e	51.10±36.72 ^f	453.72±17.53 ^g	522.65±52.62 ^h
80	0	223.10±16.53 ^a	7 289.84±787.65 ^a	96 610.06±1 324.56 ^a	104 123.00±1 455.63 ^a
	2	221.36±54.31 ^a	7 710.26±126.35 ^a	46 631.33±763.12 ^b	54 562.95±1 159.64 ^b
	4	231.72±69.70 ^a	4 809.60±264.72 ^b	19 587.19±684.52 ^c	24 628.51±1 532.17 ^c
	6	257.10±23.61 ^a	1 501.97±46.75 ^c	1 155.11±541.20 ^d	2 914.18±726.21 ^d
	8	76.85±17.34 ^b	721.87±1.62 ^d	1 071.92±76.54 ^d	1 870.64±191.72 ^e
	10	19.40±6.51 ^c	420.50±9.64 ^d	481.21±82.64 ^e	921.11±105.24 ^f
	12	18.63±12.24 ^c	119.67±5.32 ^d	371.23±128.17 ^e	609.53±35.48 ^g
	13	13.14±9.61 ^c	22.78±10.98 ^d	474.55±16.24 ^e	510.47±20.36 ^h
	14	13.14±9.61 ^c	22.78±10.98 ^d	474.55±16.24 ^e	510.47±20.36 ^h
	15	13.14±9.61 ^c	22.78±10.98 ^d	474.55±16.24 ^e	510.47±20.36 ^h
90	0	159.09±7.52 ^d	5 596.87±996.75 ^a	104 133.49±1 752.61 ^a	109 889.45±2 256.66 ^a
	1	175.11±20.62 ^c	6 051.85±324.98 ^a	41 103.82±2 468.74 ^b	47 330.78±2 471.90 ^b
	2	175.21±16.75 ^c	5 687.86±413.63 ^a	24 181.53±718.14 ^c	30 044.60±764.32 ^c
	3	195.19±10.21 ^b	4 399.02±108.62 ^b	10 495.52±1 236.74 ^d	15 089.73±599.64 ^d
	4	220.77±20.17 ^a	2 314.70±271.69 ^c	3 148.25±589.62 ^e	5 683.72±1 064.57 ^e
	5	175.25±32.45 ^c	548.70±65.71 ^d	765.80±169.52 ^f	1 489.75±258.73 ^f
	6	21.62±2.13 ^e	221.39±9.80 ^e	427.59±90.51 ^g	670.60±58.61 ^g
	7	12.49±7.15 ^e	15.99±3.24 ^e	447.30±33.64 ^g	475.78±12.54 ^h

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

含量显著升高,在 90 ℃时达到最高,分别为 0.044 6, 0.048 2 mg/g。这可能是随着干燥温度的升高,黑果腺肋花楸暴露在空气中的时间减小,减少了多酚和黄酮在空气中氧化的时间。此外,高温能够抑制多酚氧化酶活性,减少多酚向醌类物质转化的发生,从而可以保留更多的多酚^[39]。Que 等^[40]研究发现,在加热干燥过程中酚类物质的前体酚醛分子的非酶转化导致了酚类物质的生成,

在更高的温度下干燥会有更多的酚类物质生成,所以样品中总酚含量较高。

由图 6 可知,样品的 DPPH 自由基清除率在 90 ℃时达到最高,为 11.159 6%。这与样品中的酚类物质以及其他活性物质含量有一定的关系^[41]。高温干燥时获得的优良抗氧化能力还可能与干燥过程中发生的美拉德反应产物的积累有关,同时也与高温下促进黄酮糖苷转化为具有

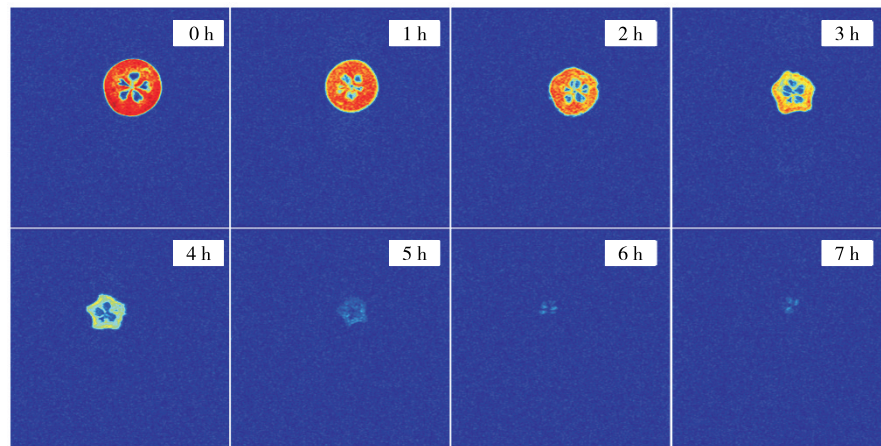
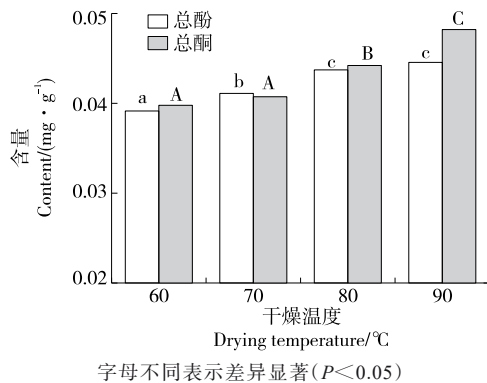
图4 90 °C下黑果腺肋花楸的 T_2 加权 MRI 图像Figure 4 T_2 weighted MRI images of *Aronia melanocarpa* dried at 90 °C

图5 干燥温度对黑果腺肋花楸中总酚和总黄酮含量的影响

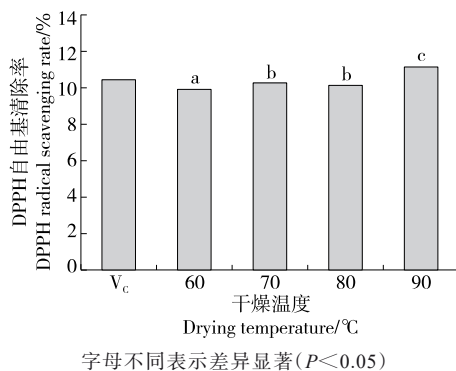
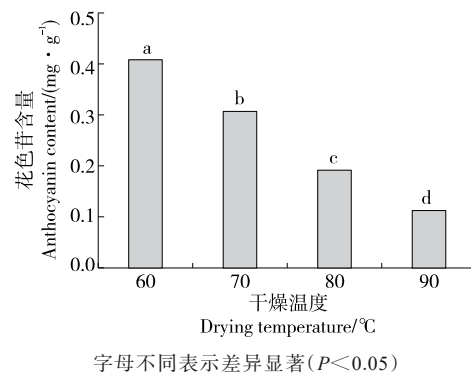
Figure 5 Effect of different drying temperatures on the content of total phenols and total flavonoids in *Aronia melanocarpa*

图6 干燥温度对黑果腺肋花楸 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 6 Effect of different drying temperatures on DPPH radical scavenging of *Aronia melanocarpa*

更强抗氧化能力的一些黄酮苷元类化合物和低相对分子质量的酚类化合物有关^[42]。

由图7可知,花色苷含量随着干燥温度的升高显著降低,在60 °C时含量最高,为0.408 8 mg/g。这是由于花色苷的热敏性比多酚类物质高,更易受温度的影响而分解^[43]。符群等^[27]研究发现,黑果腺肋花楸花色苷的保留量为真空冷冻干燥>热风干燥>喷雾干燥,也进一步说明花色苷对热非常敏感。虽然提高干燥温度有助于保留更多的多酚和黄酮类物质,并增强产品的抗氧化性能,但同时也会降低花色苷含量。这种权衡关系提示在实际应用中需要综合考虑各种因素来确定最适宜的加工条件。例如,如果目标产品旨在最大化保健功效,则应优先选择较高温度下的快速干燥;若要保持色泽特征,建议采用较为温和的方式处理原材料。

图7 干燥温度对黑果腺肋花楸花色苷含量的影响
Figure 7 Effect of different drying temperatures on and anthocyanin content of *Aronia melanocarpa*

3 结论

研究了不同干燥温度下黑果腺肋花楸的干燥特性及品质变化。结果表明,干燥温度对黑果腺肋花楸热风干燥起到影响作用。整个干燥过程可以分为升速阶段和降速阶段两个阶段,黑果腺肋花楸热风干燥以降速阶段为

主且随着干燥温度的升高,干燥速率加快,干燥所需时间缩短。在选定的 8 种果蔬干燥模型中,Weibull distribution 模型拟合程度最佳,具有最高的决定系数以及较低的卡方值和均方根误差,最适合描述热风黑果腺肋花楸中干燥过程中的水分比、所需干燥时间等情况。基于低场核磁共振和成像技术研究干燥过程中水分分布状态及变化规律基本与模型一致。干燥温度对黑果腺肋花楸中的总酚含量、黄酮含量、抗氧化能力和花色苷含量影响显著,当干燥温度为 90 ℃时,黑果腺肋花楸有最高的总酚含量、黄酮含量和抗氧化能力,花色苷含量则在 60 ℃时含量最高。热风干燥黑果腺肋花楸是一种经济实惠的生产加工方式,后续可以对热风干燥设备耗能以及热风联合真空冷冻干燥、微波干燥和射频干燥等多种干燥方式开展深入研究,进一步优化黑果腺肋花楸的干燥工艺。

参考文献

- [1] VALCHEVA-KUZMANOVA S, DENEV P, EFTIMOV M, et al. Protective effects of *Aronia melanocarpa* juices either alone or combined with extracts from *Rosa canina* or *Alchemilla vulgaris* in a rat model of indomethacin-induced gastric ulcers [J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 132: 110739.
- [2] VAGIRI M, JENSEN M. Influence of juice processing factors on quality of black chokeberry pomace as a future resource for colour extraction[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 409-417.
- [3] ZHANG Y W, ZHAO Y C, LIU X L, et al. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as a new functional food relationship with health: an overview[J]. Journal of Future Foods, 2021, 1(2): 168-178.
- [4] OSZMIANŃSKI J, LACHOWICZ S. Effect of the production of dried fruits and juice from chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) on the content and antioxidative activity of bioactive compounds [J]. Molecules, 2016, 21(8): 1 098.
- [5] 石东程,梁舒祺,邹雨,等.黑果腺肋花楸研究进展及开发前景[J].食品工业科技,2024,45(13): 315-325.
SHI D C, LIANG S Q, ZOU Y, et al. Progress in research and development prospects of *Aronia melanocarpa*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 315-325.
- [6] SIDOR A, DROŹDŹYŃSKA A, GRAMZA-MICHAŁOWSKA A. Black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) and its products as potential health-promoting factors-an overview[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 89: 45-60.
- [7] OJEDIRAN J O, OKONKWO C E, OLANIRAN A F, et al. Hot air convective drying of hog plum fruit (*Spondias mombin*): effects of physical and edible-oil-aided chemical pretreatments on drying and quality characteristics[J]. Heliyon, 2021, 7(11): e08312.
- [8] OJEDIRAN J O, OKONKWO C E, ADEYI A J, et al. Drying characteristics of yam slices (*Dioscorea rotundata*) in a convective hot air dryer: application of ANFIS in the prediction of drying kinetics[J]. Heliyon, 2020, 6(3): e03555.
- [9] SRIKANTH K S, SHARANAGAT V S, KUMAR Y, et al. Convective drying and quality attributes of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 8-16.
- [10] TURAN O Y, FIRATLIGIL F E. Modelling and characteristics of thin layer convective air-drying of thyme (*Thymus vulgaris*) leaves[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2019, 37(2): 128-134.
- [11] CHEN J L, ZHANG M, XU B G, et al. Artificial intelligence assisted technologies for controlling the drying of fruits and vegetables using physical fields: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 251-260.
- [12] KUMAR Y, SINGH L, SHARANAGAT V S, et al. Quality attributes of convective hot air dried spine gourd (*Momordica dioica* Roxb. Ex Willd) slices[J]. Food Chemistry, 2021, 347: 129041.
- [13] WEN T Q, LI J B, XIE C F, et al. Investigation of moisture distribution and drying kinetic in noncentrifugal cane sugar during hot-air drying using LF-NMR[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(1): e16195.
- [14] YOUNAS S, MAO Y, LIU C H, et al. Measurement of water fractions in freeze-dried shiitake mushroom by means of multispectral imaging (MSI) and low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96: 103694.
- [15] XU F F, JIN X, ZHANG L, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods[J]. Food Research International, 2017, 96: 191-197.
- [16] XU K, LU J X, GAO Y L, et al. Determination of moisture content and moisture content profiles in wood during drying by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Drying Technology, 2017, 35(15): 1 909-1 918.
- [17] ZHU Y Y, JU R H, MA F F, et al. Moisture variation analysis of the green plum during the drying process based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(12): 5 137-5 147.
- [18] 谭宏渊,凌玉钊,黄丽琪,等.不同预处理对热风干燥山药片品质特性及微观结构的影响[J].食品工业科技,2023,44(20): 43-52.
TAN H Y, LING Y Z, HUANG L Q, et al. Effects of different pretreatment on the quality characteristics and microstructure of hot air dried yam slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 43-52.
- [19] 刘德成,郑霞,肖红伟,等.红枣片冷冻—红外组合干燥特性[J].食品与机械,2023,39(3): 128-135.
LIU C D, ZHEN X, XIAO H W, et al. Characteristics of freeze-infrared combined drying of jujube slices[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 128-135.
- [20] RURUSH E, ALVARADO M, PALACIOS P, et al. Drying kinetics of blueberry pulp and mass transfer parameters: effect of hot air and refractance window drying at different temperatures[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 320: 110929.
- [21] KIAN-POUR N, AKDENIZ E, TOKER O S. Influence of

- coating-blanching in starch solutions, on the drying kinetics, transport properties, quality parameters, and microstructure of celery root chips[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 160: 113262.
- [22] AYALA-APONTE A A, CÁRDENAS-NIETO J D, TIRADO D F. *Aloe vera* gel drying by refractance window®: drying kinetics and high-quality retention[J]. Foods, 2021, 10(7): 1 445.
- [23] XU W X, PEI Y S, ZHU G Y, et al. Effect of far infrared and far infrared combined with hot air drying on the drying kinetics, bioactives, aromas, physicochemical qualities of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 162: 113452.
- [24] 孙协军, 李秀霞, 励建荣, 等. 乙醇体积分数对山楂提取物黄酮组成及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(3): 143-150.
- SUN X J, LI X X, LI J R, et al. Effect of ethanol volume fraction on flavonoid composition and antioxidative activity of extract from hawthorn[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(3): 143-150.
- [25] LU J D, WANG Z, QIN L H, et al. Drying methods affect bioactive compound contents and antioxidant capacity of *Bletilla striata* (Thunb.) Reichb. f. flower[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 164: 113388.
- [26] AHMAD NAYIK G, DAR B N, NANDA V. Optimization of the process parameters to establish the quality attributes of DPPH radical scavenging activity, total phenolic content, and total flavonoid content of apple (*Malus domestica*) honey using response surface methodology[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(8): 1 738-1 748.
- [27] 符群, 钟明旭, 王萍. 不同干燥方式对黑果腺肋花楸果粉品质的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 180-187.
- FU Q, ZHONG M X, WANG P. Effect of drying methods on quality characteristics of *Aronia melanocarpa* powder[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(1): 180-187.
- [28] VEGA-GÁLVEZ A, MIRANDA M, DÍAZ L P, et al. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19): 7 265-7 270.
- [29] PEI Y S, LI Z F, SONG C F, et al. Analysis and modelling of temperature and moisture gradient for ginger slices in hot air drying[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 323: 111009.
- [30] BOTREL D A, RODRIGUES I C B, DE SOUZA H J B, et al. Application of inulin in thin-layer drying process of araticum (*Annona crassiflora*) pulp[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 32-39.
- [31] HASHIM N, DANIEL O, RAHAMAN E. A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita moschata*) in a convective hot air dryer[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2014, 2: 345-352.
- [32] WEN T Q, LI J B, XIE C F, et al. Investigation of moisture distribution and drying kinetic in noncentrifugal cane sugar during hot-air drying using LF-NMR[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(1): e16195.
- [33] SUN Y N, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Intelligent detection of flavor changes in ginger during microwave vacuum drying based on LF-NMR[J]. Food Research International, 2019, 119: 417-425.
- [34] LI M Y, WANG H B, ZHAO G M, et al. Determining the drying degree and quality of chicken jerky by LF-NMR[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 139: 43-49.
- [35] LI L L, ZHANG M, YANG P Q. Suitability of LF-NMR to analysis water state and predict dielectric properties of Chinese yam during microwave vacuum drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 105: 257-264.
- [36] LI M, CHEN Y N, WANG X, et al. Determination of drying kinetics and quality changes of *Panax quinquefolium* L. dried in hot-blast air[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116: 108563.
- [37] ZHU D S, LIANG J Y, LIU H, et al. Sweet cherry softening accompanied with moisture migration and loss during low-temperature storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(10): 3 651-3 658.
- [38] TAN M Q, LIN Z Y, ZU Y X, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of instant sea cucumber: Emphatically on water status of by LF-NMR and MRI[J]. Food Research International, 2018, 109: 65-71.
- [39] 田文翰, 张晓伟, 杨小露, 等. 不同干燥方式对十香菜根多酚和黄酮含量及其抗氧化活性的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(2): 103-107.
- TIAN W H, ZHANG X W, YANG X L, et al. Effect of different drying methods on the polyphenol and flavonoid content of root of *Mentha spicata* Linn. and the antioxidant activity[J]. Storage and Process, 2019, 19(2): 103-107.
- [40] QUE F, MAO L C, FANG X H, et al. Comparison of hot air-drying and freeze-drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) flours[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2008, 43(7): 1 195-1 201.
- [41] 张宁, 王凤新, 杨明冠, 等. 不同干燥方式对桑椹酥果理化特性的影响[J]. 北方园艺, 2024(12): 80-87.
- ZHANG N, WANG F X, YANG M G, et al. Effects of different drying methods on physicochemical properties of mulberry crispy fruits[J]. Northern Horticulture, 2024(12): 80-87.
- [42] 周明, 徐明生, 陈金印, 等. ‘修水化红’甜橙皮热风干燥动力学及其品质特性分析[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 141-149.
- ZHOU M, XU M S, CHEN J Y, et al. Drying kinetics and quality characteristics of 'Xiushui Huahong' sweet orange peel dried by hot air[J]. Food Science, 2020, 41(11): 141-149.
- [43] AKCICEK A, AVCI E, TEKIN-CAKMAK Z H, et al. Influence of different drying techniques on the drying kinetics, total bioactive compounds, anthocyanin profile, color, and microstructural properties of blueberry fruit[J]. ACS Omega, 2023, 8(44): 41 603-41 611.