

蓝莓微波冷冻干燥特性及品质分析

袁迪, 李洋*, 陈丰, 张欣硕, 黄积微
(东北林业大学土木与交通学院 哈尔滨 150040)

摘要 为研究蓝莓微波冷冻干燥特性及品质变化,本文探究不同微波功率(300,400,500,600 W)、真空度(50,100,150,200 Pa)和物料装载量(60,120,180,240 g)对蓝莓干燥特性及其品质的影响。在单因素实验基础上进行 Box-Behnken 中心组合试验设计,以蓝莓的干燥速率、色差、收缩率、复水比、维生素 C 保存率、花青素保留率的综合评分为评价指标。结果表明:蓝莓在干燥前期的干燥速率较大,且随着微波功率的增加而变大,Page 模型的 R^2 均大于 0.95,能较好地预测蓝莓干燥过程中的水分变化情况,蓝莓有效水分扩散系数在 $3.341 \times 10^{-8} \sim 5.110 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间,且受微波功率和装载量影响显著 ($P < 0.05$)。色差 ΔE 随微波功率的升高而增大,随真空度的升高而减小。微波功率和真空度对复水性能影响较大,VC 保存率随微波功率的增大而快速减小,随真空度和装载量的提高缓慢上升,在 400 W 时有最大值;而花青素含量则随微波功率和真空度的增大整体呈快速下降趋势。根据响应面试验结果,各因素对蓝莓干燥综合评分的影响贡献率为:微波功率 > 真空度 > 装载量。当蓝莓干制品的干燥参数为微波功率 400 W、真空度 100 Pa、装载量 120 g 时,蓝莓的微波冷冻干燥效果最好,此时蓝莓色泽、复水比、质构特性、VC 和花青素含量及内部孔隙分布情况相对最好,品质最佳。

关键词 蓝莓;微波冷冻干燥;干燥特性;综合评分;品质

文章编号 1009-7848(2024)06-0248-16 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.06.022

蓝莓,又名笃斯、越橘,属杜鹃花科、越橘属蓝果类型植物,富含维生素 C、花青素、类黄酮及各种微量元素,被国际粮农组织列为人类五大健康食品之一,有“浆果之王”的美称^[1-2]。目前蓝莓产品主要以鲜食为主,然而蓝莓果实常温下贮藏会出现果肉软化、腐烂变质等现象,产品货架期缩短^[3]。干燥技术是最常见的加工方式,能够抑制微生物生长,降低含水率,减少营养物质流失并显著延长货架期^[4]。目前蓝莓干燥常用的方式主要有热风干燥^[5]、微波干燥^[6]、冷冻干燥^[7]等。在现有蓝莓干燥技术中,热风干燥效率低下且加工品质差;微波干燥易出现加热不均匀,难以控制物料温度等现象;冷冻干燥是一种比较理想的干燥方式,对蓝莓的营养成分有着较好的保持率,然而存在能耗大、成本高等弊端。

微波冷冻干燥技术(Microwave freeze drying, MFD)是一种在传统冷冻干燥的基础上引入微波辐射作为热源的新型干燥技术,其整个干燥过程都在真空状态下完成,物料通过吸收微波能的方

式转换为热能,随后水分以升华的方式去除,避免了因水分迁移而导致的结构不均匀问题^[8]。与传统冷冻干燥相比,整体干燥速率有所提高,同时也可最大限度地保持物料的营养品质^[9]。近年来,微波冷冻干燥技术在果蔬等食品领域应用较多。Li 等^[10]研究了微波冷冻干燥技术对山药片理化、糊化性质及淀粉消化率的影响,结果表明,微波冷冻干燥山药片有着更好的色泽和溶解性,然而淀粉含量易受微波功率的影响。Jiang 等^[11]以微波作为香蕉干燥过程的加热源,与冷冻干燥相比,微波冷冻干燥明显缩短了干燥时间,且二者微观结构的区别在于内部孔径的差异。目前,关于微波冷冻干燥技术应用于蓝莓的研究较少,微波冷冻干燥对蓝莓干燥特性及品质变化的影响鲜有报道。

本文研究不同微波功率、真空度及物料装载量条件下蓝莓的干燥特性,建立相应的干燥动力学模型。通过部分品质指标探究干燥条件对蓝莓品质的影响,以期微波冷冻干燥技术在蓝莓干制品品质调控和实际生产中的应用提供理论参考。

收稿日期: 2023-06-21

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021C016)

第一作者: 袁迪,男,硕士生

通信作者: 李洋 E-mail: 378918917@qq.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“蓝丰”蓝莓,购于哈尔滨市红旗乡蓝莓小镇,

所选蓝莓色泽鲜艳,大小均匀,无褐变。将其置 4℃冰箱冷藏,备用。105℃烘至恒重,测得蓝莓初始湿基含水率为(85.21±1.4)%。

浓盐酸(分析纯),西陇科学股份有限公司;碘酸钾溶液,苏州旭凡生物科技有限公司;氯化钾,天津市东丽区天大化学试剂厂;乙酸-乙酸钠缓冲溶液(pH=5.5),广州检测科技有限公司。

1.2 仪器与设备

CR-410 色彩色差计,日本 KONICA MINOLTA 公司;CT3-10K 质构仪,美国 BROOKFIELD 公司;L5S 型紫外-可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;EM-30plus 扫描电子显微镜,韩国 COXEM 公司;101-3A 型电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;YHW-3S 型微波真空冷冻干燥机,南京亚泰微波能研究所。

1.3 试验方法

1.3.1 单因素实验设计 取新鲜蓝莓原料,在-80℃下预冻 8 h。将蓝莓平铺在干燥箱物料盘内,开启微波冷冻干燥机将冷阱温度设定为-40℃^[12]。设置不同微波功率、真空度及物料装载量,进行单因素干燥实验。每隔 30 min 取出物料盘称重,记录数据后迅速放回,继续干燥,直至干基含水率低于 0.13 g/g 以下停止干燥。每组设 3 个平行实验,取平均值。具体实验设计见表 1。

1.3.2 响应面试验设计 依据单因素实验结果,用 Design-Expert 13 软件对各因素采用 Box-Behnken 试验设计原理进行三因素三水平的响应面试验。以干燥速率、色差、收缩率、复水比、VC 保存率和花青素保留率的综合评分(Y)作为评价指标,研究各试验因素对综合评分(Y)影响的显著程度,试验因素水平设计见表 2。

1.3.3 水分质量分数测定 蓝莓样品参照 GB 5009.3-2016《食品中水分含量的测定》,采用直接干燥法在 105℃恒温干燥箱中干燥,直至样品质量不再变化为止。

1.3.4 干燥特性指标测定

1) 干基含水率:

$$W_t = \frac{m_t - m}{m} \quad (1)$$

式中: W_t 为干燥 t 时刻物料的干基含水率, g/g; m_t 为干燥 t 时刻的物料质量, g; m 为达到绝干

表 1 蓝莓微波冷冻干燥特性实验设计

Table 1 Experimental design of microwave freeze-drying characteristics of blueberry

组号	试验号	试验条件		
		微波功率/W	真空度/Pa	装载量/g
1	1	300	100	120
	2	400	100	120
	3	500	100	120
	4	600	100	120
2	5	400	50	120
	6	400	100	120
	7	400	150	120
	8	400	200	120
3	9	400	100	60
	10	400	100	120
	11	400	100	180
	12	400	100	240

表 2 响应面试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of response surface test

水平	因素		
	A(微波功率/W)	B(真空度/Pa)	C(装载量/g)
-1	300	50	60
0	400	100	120
1	500	150	180

状态时的物料质量, g。

2) 干燥速率:

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

式中: D_R 为干燥速率, g/(g·h); W_{t_2} 为干燥 t_2 时刻物料的干基含水率, g/g; W_{t_1} 为干燥 t_1 时刻物料的干基含水率, g/g。

3) 水分比:

$$M_R = \frac{W_t}{W_0} \quad (3)$$

式中: M_R 为水分比; W_t 为干燥 t 时刻物料的干基含水率, g/g; W_0 为物料初始干基含水率, g/g。

1.3.5 干燥数学模型建立与拟合 物料的干燥过程是一个复杂的传热传质过程,其内部表现为含水量的下降。选取几个常见的用于描述果蔬干燥过程的数学模型,对蓝莓微波冷冻干燥过程中水分比和时间之间的关系进行拟合^[13],并确定最适

合描述蓝莓微波冷冻特性的干燥动力学模型。

$$\text{Lewis 模型: } M_R = \exp(-kt) \quad (4)$$

$$\text{Page 模型: } M_R = \exp(-kt^N) \quad (5)$$

$$\text{Logarithmic 模型: } M_R = A \exp(-kt) + B \quad (6)$$

$$\text{Henderson and Pabis 模型: } M_R = A \exp(-kt) \quad (7)$$

式中: M_R 为水分比; \exp 为 e 函数; t 为干燥时间, min; k 为干燥速率常数; A, B, N 为各模型的待定系数。

为方便数据分析, 将上式(4)~(7)两边取对数, 得到线性关系表达式如下:

$$-\ln M_R = kt \quad (8)$$

$$\ln(-\ln M_R) = \ln k + N \ln t \quad (9)$$

$$-\ln M_R = (k \ln B)t - \ln(A+B) \quad (10)$$

$$-\ln M_R = kt - \ln A \quad (11)$$

根据试验数据, 分别绘制不同微波功率、真空度和装载量的 $t - (-\ln M_R)$ 曲线和 $\ln t - \ln(-\ln M_R)$ 曲线, 验证模型的线性拟合程度。

1.3.6 有效水分扩散系数测定 有效水分扩散系数反映物料干燥过程中的脱水能力, 可反映物料内部水分扩散特性, 常采用 Fick 第二扩散定律^[14]表示:

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t \quad (12)$$

式中: D_{eff} 为水分扩散系数, m^2/s ; L 为物料厚度的一半, m ; t 为干燥时间, s 。由式(12)可看出, $\ln M_R$ 与时间 t 呈线性关系, 有效水分扩散系数 D_{eff} 可由其斜率求出。

1.3.7 品质指标测定

1) 色泽测定 采用 CR-410 色差仪测量干燥样品的 L^* 、 a^* 和 b^* 值, 采用色差值 (ΔE) 对样品进行综合评价^[15], 其反映干燥前、后物料的色泽差异, 色差值越小, 色泽保留越好, 计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (13)$$

式中: L^* 为干燥样品亮度指数, a^* 为红-绿指数, b^* 为蓝-黄指数; L_0^* 、 a_0^* 和 b_0^* 为新鲜样品对应的色泽参数。

2) 收缩率 可用收缩率 (shrinkage ratio, SR) 来判断蓝莓干果的形变量^[16], 其值越小, 蓝莓干燥过程中形态变化越小, 计算公式如下:

$$SR = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \quad (14)$$

式中: V_d 为干燥样品的体积, m^3 ; V_0 为新鲜样品的体积, m^3 。

3) 复水比测定 取干燥后的蓝莓样品放入 25 °C 蒸馏水中, 每隔 30 min 取出, 沥干并称重, 直至前、后称重质量差 ≤ 0.02 g, 复水比 (rehydration ratio, RR) 采用下式计算^[17]:

$$R_R = \frac{m_1}{m_0} \quad (15)$$

式中: m_1 为复水后的蓝莓样品质量, g ; m_0 为复水前的蓝莓样品质量, g 。

4) 质构特性 采用 CT3-10K 质构仪测定蓝莓果实的质构特性, 测试模式为质构分析 (texture profile analysis, TPA), 6 mm 圆柱形探针, 参数设定: 测试速度 2 mm/s, 触发值 0.07 N, 形变量 15%, 循环次数 2 次。根据力-位移曲线图得到样品的硬度、弹性、黏附性和咀嚼性 4 个特性指标^[18]。

5) 维生素 C 保存率 VC 含量采用碘酸钾滴定法测定^[19], 每组试验重复 3 次取平均值, VC 保存率用下式表示:

$$Y_1 = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (16)$$

式中: Y_1 为 VC 保存率, %; m_1 为新鲜蓝莓样品的 VC 含量, mg/g ; m_2 为干燥后蓝莓样品的 VC 含量, mg/g 。

6) 花青素保留率 采用 pH 示差法^[20]测定新鲜和干燥蓝莓样品的花青素含量。准确称取样品 (新鲜蓝莓匀浆 5 g, 干燥蓝莓粉碎 1 g), 加入酸化甲醇 (0.1% HCl), 摇匀后静置, 避光条件下 2 h, 12 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 备用。分别加入 4.5 mL 氯化钾缓冲液 (pH=1.0) 和 4.5 mL 醋酸钠缓冲液 (pH=4.5) 与 0.5 mL 提取液混合, 摇匀后避光放置 10 min, 使用紫外-可见分光光度计在波长 510 nm 和 700 nm 处测定其吸光度, 以蒸馏水为对照组。花青素含量用下式表示:

$$\text{花青素含量} (\text{mg}/100\text{g}) = \frac{A \times M_w \times DF \times V \times 100}{\varepsilon \times d \times m} \quad (17)$$

式中: $A = (A_{510} - A_{700})_{\text{pH}1.0} - (A_{510} - A_{700})_{\text{pH}4.5}$; M_w 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的相对分子质量 (449.2); DF 为稀释倍数; V 为样液体积, mL ; ε 为矢车菊-

3-葡萄糖苷的摩尔消光系数(26 900),L/(mol×cm);*d* 为比色皿厚度,1 cm;*m* 为样品质量,g。

7) 微观结构分析 采用扫描电子显微镜,将干燥后的样品切成 2 mm×2 mm×3 mm 的小块,固定于样品台上,对样品镀金处理后观察其微观结构,工作电压 20 kV,放大 200 倍采集图像。

1.4 综合评分

为保证综合评分的可靠性,消除变量量纲和变异范围的影响,对各项指标进行标准化处理,指标中最优值为 1 分,最差值为 0 分。

其中,干燥速率、复水比、VC 保存率、花青素保留率指标越大越好,计算方法如式(18)所示,色差、收缩率指标越小越好,计算方法如式(19)所示^[21]:

$$d_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (18)$$

$$d_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (19)$$

式中:*d_i* 为评级指标的规范化值;*X_i* 为指标值;*X_{max}* 为指标最大值;*X_{min}* 为指标最小值。

指标权重系数 *w_j* 以熵权法确定,如下式所示:

$$w_j = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^n (1-H_j)} = \frac{1-H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (20)$$

式中:*H_j* 为信息熵, $H_j = -(\ln m)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}$; *n* 为影响因素个数;*m* 为试验次数;*f_{ij}* 为第 *i* 个因素下第 *j* 个评价值的权重。

计算得到各组试验的综合评分 *P_i*, 如下式所示^[22]:

$$P_i = \sum (d_i \times w_j) \quad (21)$$

根据各试验条件下的品质指标进行标准化处理,计算干燥速率、色差、收缩率、复水比、VC 保存率、花青素保留率的权重依次为 0.21,0.13,0.12,0.1,0.19 和 0.25。

1.5 数据处理

采用 Excel 软件处理试验数据,采用 Origin Pro 2021 和 SPSS 26 软件对试验数据进行数据分析、绘图和显著性分析,采用 Design-Expert 13 软件设计响应面分析试验,每组试验重复 3 次,取平均值。

2 结果与分析

2.1 蓝莓微波冷冻干燥特性

2.1.1 微波功率对蓝莓干燥特性的影响 图 1 为真空度 100 Pa,装载量 120 g 时,不同微波功率下蓝莓微波冷冻干燥曲线和干燥速率曲线。由图 1a 可知,随着干燥的进行,蓝莓干基含水率不断减小直至恒重。随着微波功率的增大,干基含水率下降速率明显加快且达到干燥终点的时间大幅缩短,说明提高微波功率可显著加快干燥进程。由图 1b 可知,不同微波功率条件下蓝莓的干燥速率相差较大,干燥初期更为明显。微波功率对干燥速率曲线影响显著,较高功率(600 W)的最大干燥速率为 3.188 g/(g·h),是 300 W 功率时干燥速率 1.593 g/(g·h)的 2 倍左右。整个微波冷冻干燥过程中存在

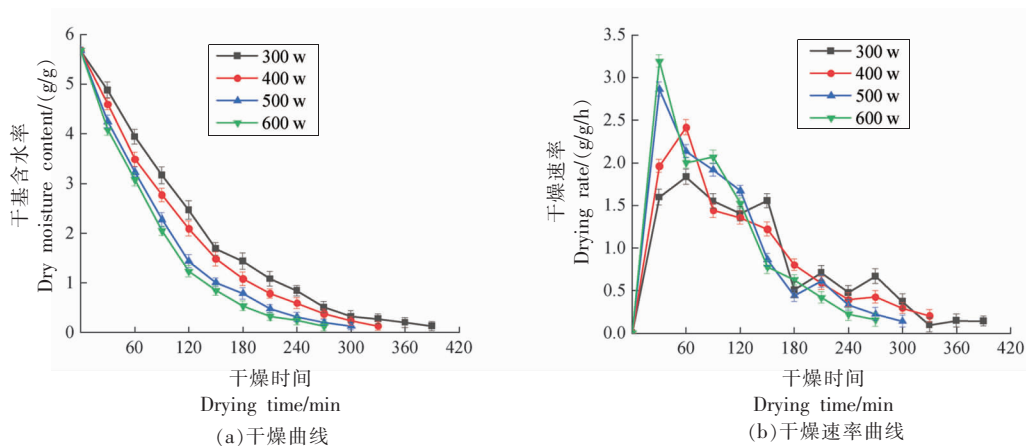


图 1 不同微波功率下蓝莓干燥特性曲线

Fig.1 Drying characteristics curve of blueberry under different microwave power

明显的升速和降速两个阶段^[23]。一方面,干燥初期物料内部存在大量自由水,随着微波功率增大,自由水吸收微波能产生大量摩擦热,将其转化成热能迁移至表面蒸发;另一方面,随着物料干燥的持续进行,物料水分含量减少,自由水基本被脱去,微波能吸收能力减弱,阻碍了物料的水分迁移,干燥速率逐渐降低^[24]。

2.1.2 真空度对蓝莓干燥特性的影响 图2为微波功率400 W,装载量120 g时,不同真空度下蓝莓微波冷冻干燥曲线和干燥速率曲线。由图2a可得,在整个干燥过程中,不同真空度下的干燥曲线较为接近,干燥所需时间随着真空度的增加而略有缩短,差异并不显著。由图2b可知,不同真空度

下蓝莓干燥过程分为加速和降速阶段,最高和最低干燥速率分别为真空度150 Pa时的3.28 g/(g·h)和真空度50 Pa时的2.85 g/(g·h)。真空度200 Pa时的干燥速率略低于真空度150 Pa时的,可能是因为此时的物料间对流速率减慢,热量传递减少,干燥周期略有延长。对比图1而言,真空度对其干基含水率和干燥速率的影响远小于微波功率。干燥前期,水分子的沸点随着真空度的升高而降低,水分升华加快,干燥速率增加^[17];干燥后期,干燥速率差异减小,最后趋于一致。实际生产中,应适当提高真空度,加快水分蒸发,同时要避免高真空度带来的能量损耗,成本增加问题。

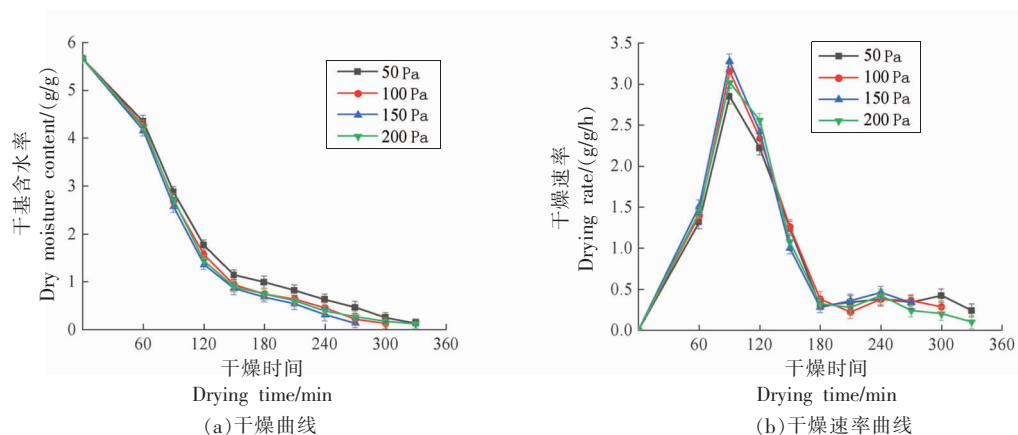


图2 不同真空度下蓝莓干燥特性曲线

Fig. 2 Drying characteristics curve of blueberry under different vacuum degrees

2.1.3 物料装载量对蓝莓干燥特性的影响 图3为微波功率400 W,真空度100 Pa时,不同物料装载量下蓝莓微波冷冻干燥曲线和干燥速率曲线。

由图3a可知,随着装载量的增加,蓝莓达到干燥终点所需时间变长,由于物料总水分含量增加,单位质量的蓝莓吸收微波能减小,分子的热运动减

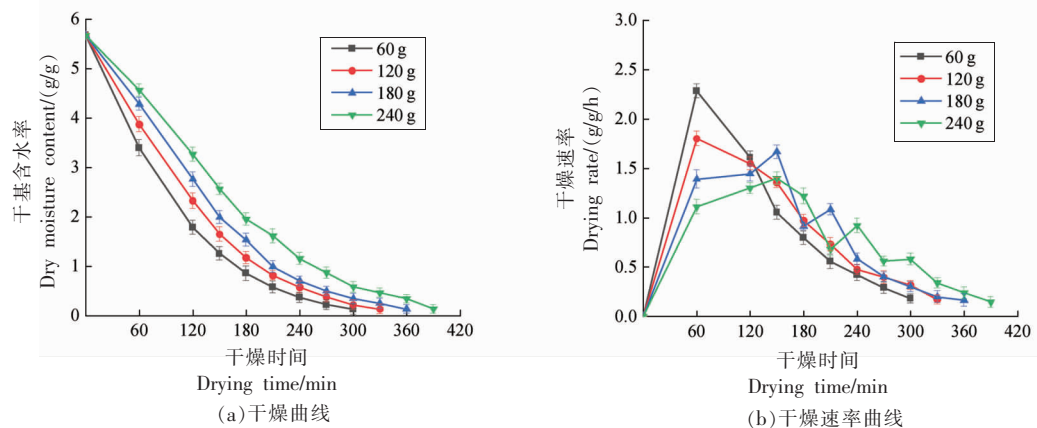


图3 不同物料装载量下蓝莓干燥特性曲线

Fig.3 Drying characteristics curve of blueberry under different material loading

缓,干燥时间延长。由图 3b 可知,达到最大干燥速率所需时间随着装载量的增加而增加,且装载量为 60 g 时的干燥速率最大值 2.28 g/(g·h) 比装载量 240 g 时的干燥速率 1.4 g/(g·h) 提高近 1 倍。较少的装载量提高了物料水分扩散能力,传热速率加快,干燥速率提高,干燥时间缩短。

2.2 蓝莓微波冷冻干燥动力学模型拟合

2.2.1 蓝莓微波干燥动力学模型的选择与建立

将试验数据代入经线性处理的表达式,绘制不同微波功率、真空度和装载量条件下的 $t - (-\ln M_R)$ 曲线和 $\ln t - \ln(-\ln M_R)$ 曲线,如图 4~图 6 所示。

由图 4~图 6 可看出, $-\ln M_R$ 和 t 不呈线性关系,说明蓝莓微波冷冻干燥不完全符合 Lewis、Logarithmic 和 Henderson and Pabis 模型,而 $\ln(-\ln M_R)$ 和 $\ln t$ 呈一定的线性关系,初步验证蓝莓微

波冷冻干燥特性符合 Page 模型。接下来选取此模型对蓝莓干燥过程进行拟合,进一步验证 Page 模型的适用性。

2.2.2 蓝莓微波冷冻干燥动力学模型的拟合与验证

将不同微波功率、真空度和装载量条件下的数据代入 Page 模型进行线性回归拟合,采用决定系数 (R^2)、残差平方和 (residual sum of squares, RSS) 评价拟合程度,结果见表 3。

通过对 Page 模型在不同微波功率、真空度和装载量条件下的方差分析可知,动力学模型的决定系数 R^2 数值在 0.9622~0.9982 范围变化,残差平方和 RSS 数值在 0.0049~0.1914 范围变化,且 P 值均 < 0.01 。这说明蓝莓微波冷冻干燥动力学模型线性回归结果较好,拟合度高,Page 模型能很好地描述蓝莓微波冷冻干燥过程。

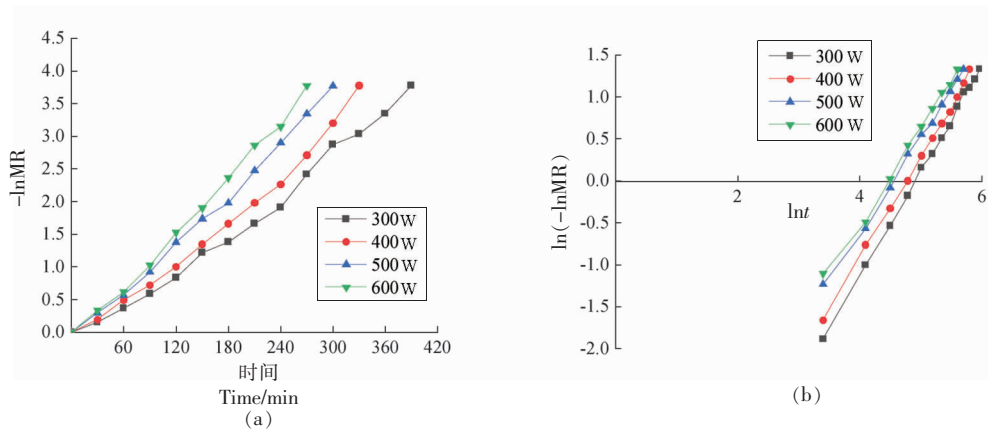


图 4 不同微波功率下 $t - (-\ln M_R)$ 和 $\ln t - \ln(-\ln M_R)$ 曲线

Fig.4 Curves of the $t - (-\ln M_R)$ and $\ln t - \ln(-\ln M_R)$ at different microwave powers

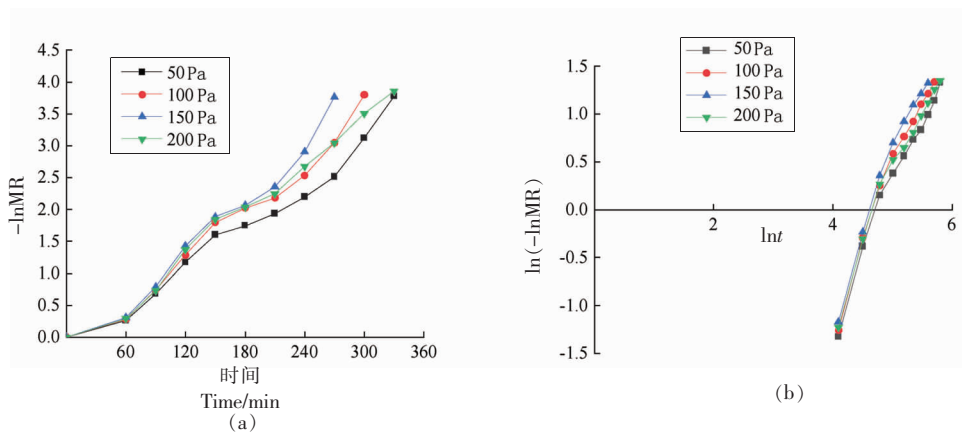


图 5 不同真空度下 $t - (-\ln M_R)$ 和 $\ln t - \ln(-\ln M_R)$ 曲线

Fig.5 Curves of the $t - (-\ln M_R)$ and $\ln t - \ln(-\ln M_R)$ at different vacuum levels

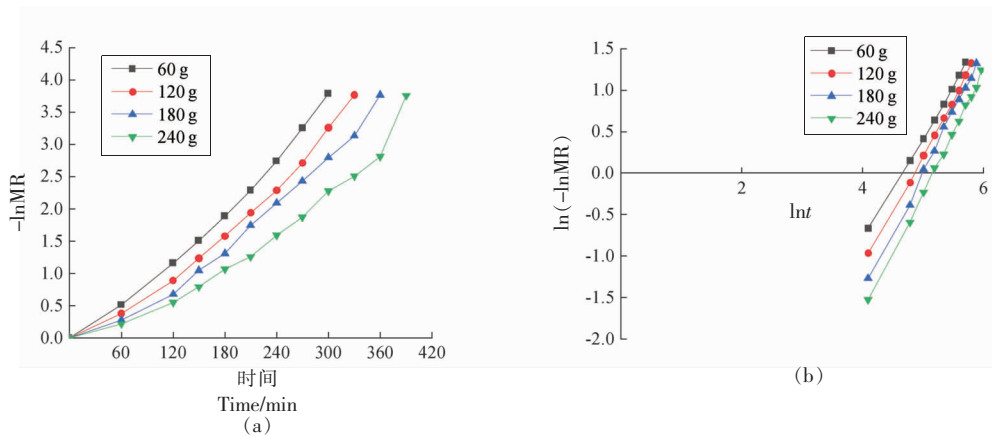


图6 不同装载量下 $t(-\ln M_R)$ 和 $\ln t - \ln(-\ln M_R)$ 曲线

Fig.6 Curves of the $t(-\ln M_R)$ and $\ln t - \ln(-\ln M_R)$ at different material loading

表3 不同干燥条件下 Page 模型的拟合结果

Table 3 Fitting results of Page model under different drying conditions

干燥条件	模型参数		拟合方程	评价指标		
	K	N		R ²	RSS	
微波功率/W	300	0.02011	1.2519	$\ln(-\ln M_R) = 1.2519 \ln t - 3.9066$	0.9982	0.0177
	400	0.02773	1.2076	$\ln(-\ln M_R) = 1.2076 \ln t - 3.5853$	0.9974	0.0191
	500	0.04488	1.1282	$\ln(-\ln M_R) = 1.1282 \ln t - 3.1037$	0.9975	0.0140
	600	0.04972	1.1317	$\ln(-\ln M_R) = 1.1317 \ln t - 3.0009$	0.9958	0.0196
真空度/Pa	50	0.00105	1.4166	$\ln(-\ln M_R) = 1.4166 \ln t - 6.8582$	0.9656	0.1753
	100	0.00068	1.5375	$\ln(-\ln M_R) = 1.5375 \ln t - 7.2961$	0.9642	0.1759
	150	0.00048	1.6311	$\ln(-\ln M_R) = 1.6311 \ln t - 7.6327$	0.9648	0.1540
	200	0.00120	1.4106	$\ln(-\ln M_R) = 1.4106 \ln t - 6.7257$	0.9622	0.1914
装载量/g	60	0.00319	1.2337	$\ln(-\ln M_R) = 1.2337 \ln t - 5.7462$	0.9981	0.0049
	120	0.00152	1.3402	$\ln(-\ln M_R) = 1.3402 \ln t - 6.4902$	0.9980	0.0073
	180	0.0007	1.4557	$\ln(-\ln M_R) = 1.4557 \ln t - 7.2658$	0.9972	0.0140
	240	0.00052	1.4663	$\ln(-\ln M_R) = 1.4663 \ln t - 7.5676$	0.9979	0.0122

为验证模型的精确性，选取试验条件为微波功率 400 W、真空度 100 Pa、装载量 180 g 的 1 组水分比试验值与 Page 模型预测值进行比较分析，结果如图 7 所示。蓝莓干燥过程中水分比试验值与 Page 模型预测值基本拟合，说明 Page 模型可较准确地反映蓝莓微波冷冻干燥特性，并对其干燥过程具有预测作用。

2.3 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数 D_{eff} 是反映物料干燥过程中内部水分扩散特性和质量传递性质的重要参数，其大小受物料结构、组分、水分状态等内部性质和干燥方式、条件等外部因素的影响^[25]。 D_{eff} 值越大，物料达到干燥终点所需时间越短。不同干燥条件下的 D_{eff} 值见表 4。

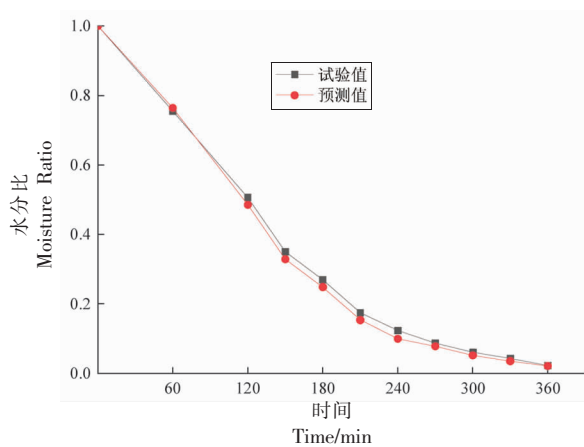


图7 同一条件下的试验值与预测值比较

Fig.7 Comparison of experimental values and predicted values under the same conditions

表 4 不同干燥条件下蓝莓的有效水分扩散系数

Table 4 Effective water diffusion coefficient of blueberry under different drying conditions

干燥条件		线性回归拟合方程	R^2	有效水分扩散系数 $D_{\text{eff}}/(\text{m}^2/\text{s})$
微波功率/W	300	$\ln M_R = -0.0098t + 0.2398$	0.9872	3.593×10^{-8}
	400	$\ln M_R = -0.0111t + 0.2195$	0.9815	4.045×10^{-8}
	500	$\ln M_R = -0.0126t + 0.1398$	0.9947	4.614×10^{-8}
	600	$\ln M_R = -0.0140t + 0.1374$	0.9946	5.110×10^{-8}
真空度/Pa	50	$\ln M_R = -0.0110t + 0.2227$	0.9682	4.012×10^{-8}
	100	$\ln M_R = -0.0124t + 0.2445$	0.9713	4.534×10^{-8}
	150	$\ln M_R = -0.0137t + 0.2872$	0.9642	4.997×10^{-8}
	200	$\ln M_R = -0.0121t + 0.1885$	0.9862	4.428×10^{-8}
装载量/g	60	$\ln M_R = -0.0118t - 0.3270$	0.9634	4.308×10^{-8}
	120	$\ln M_R = -0.0112t - 0.1182$	0.9595	4.056×10^{-8}
	180	$\ln M_R = -0.0105t + 0.0183$	0.9678	3.819×10^{-8}
	240	$\ln M_R = -0.0092t + 0.1456$	0.9306	3.341×10^{-8}

根据式(12),水分比自然对数 $\ln M_R$ 与时间 t 呈线性关系,对其进行线性拟合并由斜率求得有效水分扩散系数 D_{eff} 。由表 4 可知,不同干燥条件下蓝莓 $\ln M_R$ 随 t 变化的拟合曲线的 R^2 均大于 0.95,拟合性很好,得出的有效水分扩散系数 D_{eff} 在 $3.341 \times 10^{-8} \sim 5.110 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。同时可看出,随着微波功率的增大和装载量的减小,水分有效扩散系数呈增大的趋势^[26]。这是因为微波功率增大使得物料内部孔隙网络结构迅速形成,有利于水分扩散。装载量越大,其单位体积吸收的微波能越小,不利于水分扩散。相比于微波功率和装载量,真空度对水分有效扩散系数的影响最小,不同真空度条件下有效水分扩散系数变化区间为 $4.012 \times 10^{-8} \sim 4.997 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.4 不同干燥条件下蓝莓品质特性分析

2.4.1 色泽

色泽是干燥产品重要的品质评价指标之一,总色差值反映干燥样品的外观颜色变化程度。不同单因素实验条件下对蓝莓色泽的影响如表 5 所示,微波功率、真空度和物料装载量均对色泽有显著影响 ($P < 0.05$)。 L^* 表示样品的明亮度,随着微波功率的增大明显减小, ΔE 随微波功率的增大而增大,600 W 下的 ΔE 明显高于 300 W 下的 ΔE 数值,可能因为较高的微波功率导致蓝莓内部水分扩散至表面而无法及时蒸发,促进蓝莓干燥过程中的美拉德等非酶促反应,加剧其褐变程度^[27]。随着真空度的增加,干燥蓝莓的色差值

ΔE 逐渐减小。一方面,随真空度的提高,干燥环境氧气含量减少,延缓了蓝莓色素和酶的氧化;另一方面,真空度的升高降低了水分蒸发的温度,缩短了干燥时间,有利于样品原有色泽的保持。在不同装载量条件下, L^* 和 ΔE 随着装载量的增加呈先增大后减小的趋势,当装载量为 240 g 时, ΔE 达到最小值 7.24 ± 0.22 ,分析原因可能是:随着物料装载量的增加,达到干燥终点所需时间延长,褐变程度增大;其单位质量获得的微波能减少,升温较慢,避免了加热不均匀带来的焦糊现象^[28]。这也说明适当增加蓝莓装载量有利于其色泽品质的提升。

2.4.2 收缩率、复水比

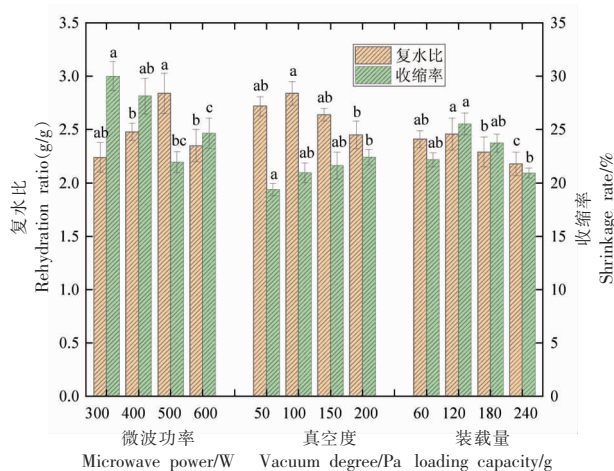
收缩率、复水比反映干燥过程中物料的收缩性和内部组织结构的破坏程度,是衡量干制品品质的重要指标。复水比数值越大,表明物料原组织结构被保留的越好,品质越佳^[29]。图 8 显示不同单因素实验条件下蓝莓收缩率和复水比的变化情况。蓝莓干制品的复水比在不同干燥条件下整体呈先增大后减小的趋势。在微波功率单因素实验条件下,当微波功率从 300 W 增到 600 W 时,单位质量干燥蓝莓吸收的微波能增多,水分去除方式以升华干燥为主,进而阻碍因内部水分迁移而引起的应力收缩现象,收缩率减小,复水性增强,而过高的微波功率破坏了蓝莓的组织结构,收缩程度变大,复水性减弱^[30]。在真空度单因素实验条件下,水分沸点及蒸发温度均

表5 不同干燥条件对蓝莓色泽的影响

Table 5 Effect of different drying conditions on the color of blueberry

干燥条件		色泽参数			
		L^*	a^*	b^*	ΔE
微波功率/W	300	78.54 ± 0.86 ^e	1.11 ± 0.13 ^a	-3.59 ± 0.04 ^a	8.86 ± 0.56 ^a
	400	77.27 ± 1.21 ^b	1.70 ± 0.03 ^{ab}	-4.12 ± 0.14 ^a	11.36 ± 0.23 ^b
	500	75.85 ± 0.92 ^b	2.04 ± 0.09 ^{bc}	-4.10 ± 0.23 ^{ab}	12.76 ± 1.02 ^c
	600	73.33 ± 1.17 ^a	1.66 ± 0.21 ^c	-3.73 ± 0.79 ^b	14.05 ± 0.08 ^{bc}
真空度/Pa	50	75.05 ± 1.25 ^a	1.13 ± 0.16 ^a	-3.53 ± 0.42 ^b	16.24 ± 0.78 ^a
	100	76.94 ± 0.47 ^{ab}	1.09 ± 0.24 ^a	-3.46 ± 0.27 ^a	13.61 ± 0.22 ^b
	150	78.04 ± 0.62 ^b	1.37 ± 0.17 ^a	-3.88 ± 0.38 ^{ab}	12.48 ± 0.18 ^b
	200	80.68 ± 2.01 ^c	1.46 ± 0.18 ^{ab}	-3.42 ± 0.25 ^a	10.62 ± 1.23 ^c
装载量/g	60	75.60 ± 1.34 ^{ab}	1.22 ± 0.06 ^c	-3.26 ± 1.02 ^a	11.13 ± 1.0 ^b
	120	77.65 ± 0.78 ^a	1.05 ± 0.14 ^b	-3.42 ± 0.46 ^{ab}	13.18 ± 0.09 ^a
	180	74.67 ± 1.51 ^b	0.92 ± 0.16 ^a	-3.07 ± 0.43 ^b	10.17 ± 0.98 ^b
	240	71.65 ± 0.49 ^c	0.77 ± 0.07 ^b	-3.05 ± 0.57 ^a	7.24 ± 0.22 ^c

注:相同干燥条件下同一列不同小写字母表示存在显著差异($P<0.05$)。



注:不同小写字母表示样品差异显著($P<0.05$)。

图8 不同干燥条件对蓝莓复水比和收缩率的影响

Fig.8 Effect of different drying conditions on the rehydration ratio and shrinkage of blueberry

降低,水分蒸发速率大大增加,使得干燥环境形成较大的蒸汽压,组织膨胀性增强,收缩率逐渐增大,复水性增强,而真空度过大会导致样品内部细胞骨架崩解,内部结构破损程度较大,复水性降低^[31]。随着物料装载量的增加,达到干燥终点所需时间变长,且单位质量蓝莓吸收的微波能减少,使得水分蒸发变慢,组织膨胀性减弱,物料的孔隙结构更加不均匀,收缩率呈下降趋势,复水性随之变小。

2.4.3 质构特性 质构特性作为果蔬产品自身的重要属性,与产品的组织结构及状态有关,同时是

评价果蔬感官品质的重要指标之一^[32]。表6列出不同干燥条件下蓝莓的质构指标。不同微波功率下,样品的弹性差异显著($P<0.05$),当微波功率为600 W时硬度和弹性均达到最大值,可能是因为较高的微波功率破坏了蓝莓内部疏松多孔结构,硬度和弹性有所增加。不同真空度下,样品的弹性和咀嚼性差异显著($P<0.05$)。真空度150 Pa条件下蓝莓干的咀嚼性达到(17.50±0.14)mJ,表明此时的样品表皮硬度增加,咀嚼程度最大。硬度和咀嚼性反映果实的坚实性,不同装载量下,样品的硬度和咀嚼性差异显著($P<0.05$)。当装载量为180 g时样品的硬度和咀嚼性最大。不同于其它质构指标,样品的黏附性在不同单因素实验条件下差异均不显著($P>0.05$)。

2.4.4 VC保存率 VC是一种热敏感性很强的不稳定成分,易受温度和氧化作用的影响而发生降解。蓝莓微波冷冻干燥过程中的VC保存率可作为评价干燥手段的重要指标。图9显示不同干燥条件下蓝莓VC保存率的变化情况。随着微波功率的增加,VC保存率呈下降趋势,600 W条件下VC保存率仅55.40%,可能是因为水分含量较高且吸收较多的微波能转化成热能,温度逐渐升高,加快了物料的非酶促褐变反应,使得VC降解速率增大,含量降低。与微波功率不同的是,VC保存率随真空度的增大而增加,一方面,真空度的提高降低了干燥环境温度和干燥时间,延缓了热敏性成分VC

表 6 不同干燥条件对蓝莓质构特性的影响

Table 6 Effect of different drying conditions on the textural properties of blueberry

干燥条件	质构特性参数				
		硬度/N	弹性/mm	黏附性/mJ	咀嚼性/mJ
微波功率/W	300	6.01 ± 0.12 ^c	1.77 ± 0.03 ^b	0.30 ± 0.02 ^a	1.20 ± 0.05 ^b
	400	7.50 ± 0.09 ^b	1.47 ± 0.02 ^d	0.10 ± 0.03 ^{ab}	1.40 ± 0.06 ^a
	500	8.37 ± 0.23 ^a	1.64 ± 0.04 ^c	0.09 ± 0.02 ^{ab}	0.91 ± 0.03 ^c
	600	8.53 ± 0.17 ^a	1.84 ± 0.02 ^a	0.12 ± 0.01 ^b	1.12 ± 0.06 ^b
真空度/Pa	50	3.53 ± 0.24 ^c	1.84 ± 0.08 ^c	0.06 ± 0.04 ^b	3.72 ± 0.10 ^c
	100	5.78 ± 0.13 ^b	1.53 ± 0.04 ^d	0.02 ± 0.01 ^a	7.01 ± 0.07 ^b
	150	9.77 ± 0.32 ^a	2.28 ± 0.06 ^b	0.05 ± 0.02 ^{ab}	17.50 ± 0.14 ^a
	200	3.12 ± 0.16 ^c	3.06 ± 0.03 ^a	0.03 ± 0.01 ^a	3.90 ± 0.06 ^c
装载量/g	60	7.46 ± 0.14 ^c	9.67 ± 0.12 ^a	1.10 ± 0.03 ^a	3.02 ± 0.08 ^b
	120	9.25 ± 0.06 ^b	2.57 ± 0.05 ^c	0.51 ± 0.02 ^b	1.90 ± 0.04 ^c
	180	10.90 ± 0.15 ^a	1.64 ± 0.08 ^d	0.33 ± 0.01 ^c	3.40 ± 0.12 ^a
	240	8.93 ± 0.13 ^b	6.66 ± 0.06 ^b	0.29 ± 0.02 ^c	2.90 ± 0.09 ^b

注:相同干燥条件下同一列不同小写字母表示存在显著差异($P < 0.05$)。

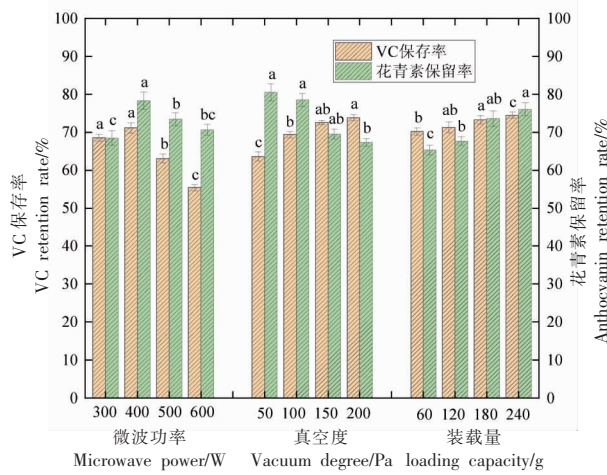


图 9 不同干燥条件对蓝莓 VC 保存率和花青素保留率的影响

Fig.9 Effect of different drying conditions on the retention of vitamin C and anthocyanins in blueberry

的损失程度;另一方面,真空度的提高也减少了干燥腔内氧气含量,减弱了 VC 的氧化反应,使 VC 含量逐渐升高。这与易军鹏等^[33]研究酸菜微波冷冻干燥中真空度对维生素 C 含量的影响结果相似。而物料装载量在 60~240 g 范围变化,随单位质量蓝莓吸收的微波能减小,细胞结构的破坏作用被削弱,升温速率较慢,干燥时间较长,VC 含量虽呈上升趋势,但整体差别不大。

2.4.5 花青素保留率 蓝莓富含天然可食用色素

花青素,其化学性质不稳定,极易降解^[34]。不同干燥条件对蓝莓花青素保留率的影响见图 9。随着微波功率的提高,蓝莓吸收较多的微波能并转化成热能,干燥温度升高,花青素等酚类物质发生大量分解,花青素保留率下降,最高为功率 400 W 时的 78.35%。类似地,蓝莓干制品的花青素保留率随着真空度的增大而减小,在真空度 50 Pa 时的花青素保留率达 80.49%,而真空度 200 Pa 下的花青素保留率仅 67.28%。由于花青素的降解与温度和氧气浓度成正比,低真空度可维持干燥环境的低氧状态,因此可在低温完成水分去除的同时,实现对花青素成分的有效保护。在其它干燥条件相同时,随着物料装载量的增加,花青素保留率呈上升趋势,装载量 240 g 时的花青素含量明显高于装载量 60 g 时的数值,可能是因为单位质量物料的受热面积较小,所吸收的微波能较少,故花青素含量损失变小,花青素保留率有所增加。

2.5 响应面试验结果分析

2.5.1 回归模型的建立 对响应面试验的各品质指标进行归一化,计算干燥蓝莓综合评分 Y 值,结果见表 7。通过 Design-Expert 13 软件对数据进行多元回归拟合分析,建立综合评分(Y)与微波功率(A)、真空度(B)和装载量(C)的二次多项回归模型,得到综合评分的拟合方程: $Y = 0.8604 + 0.035A + 0.0129B - 0.0036C - 0.0063AB + 0.0052AC - 0.005BC - 0.211A^2 - 0.0777B^2 + 0.0378C^2$ 。

表7 响应面设计与试验结果

Table 7 Response surface design and experimental results

序号	A (微波功率)/W	B (真空度)/Pa	C (装载量)/g	Y_1 (干燥速率)/[g/(g·h)]	Y_2 (色差 ΔE)	Y_3 (收缩率)/%	Y_4 (复水比)	Y_5 (VC保存率)/%	Y_6 (花青素保留率)/%	Y (综合评分)
1	-1	1	0	1.572	6.88	29.35	2.46	68.24	62.89	0.546
2	0	0	0	1.345	11.51	25.58	2.34	72.06	77.89	0.859
3	0	0	0	1.364	11.21	25.21	2.51	71.25	77.98	0.865
4	0	-1	1	1.753	10.93	23.31	2.34	71.63	77.73	0.807
5	0	0	0	1.354	11.36	24.65	2.48	71.14	78.36	0.861
6	1	0	1	1.644	11.25	28.31	2.49	69.77	71.98	0.716
7	1	-1	0	1.637	8.92	27.56	2.43	65.68	65.73	0.610
8	0	-1	-1	2.023	14.26	23.42	2.47	70.73	76.25	0.811
9	0	1	-1	1.875	12.71	23.98	2.29	71.42	74.42	0.844
10	1	1	0	1.754	10.21	27.92	2.57	66.76	64.11	0.626
11	0	0	0	1.289	11.23	24.72	2.53	71.00	78.54	0.871
12	0	0	0	1.327	11.47	23.98	2.42	69.87	78.63	0.846
13	-1	-1	0	1.363	7.68	29.07	2.36	63.26	64.15	0.505
14	-1	0	-1	1.618	10.13	23.17	2.42	69.24	67.27	0.669
15	0	1	1	1.582	9.24	24.02	2.25	71.86	76.25	0.820
16	-1	0	1	1.446	9.89	29.45	2.33	71.10	70.15	0.658
17	1	0	-1	1.716	11.27	22.76	2.54	68.13	68.05	0.706

2.5.2 回归方程显著性分析 综合评分显著性检验结果如表8所示,方差分析表明,模型相关系数 $R^2=0.9938$,该拟合模型极显著($P<0.01$),失拟项不显著($P=0.0949>0.05$),模型的校正系数为 $R^2_{adj}=0.9838$,能解释极大部分的响应值变化,说明此模

型可靠。同时发现,装载量(C)对结果影响不显著($P>0.05$),微波功率(A)和真空度(B)均对结果影响显著,其中微波功率(A)对结果影响极显著($P=0.0002<0.01$)。由F检验可得出各因素对综合评分影响的贡献率依次为微波功率>真空度>装载量。

表8 综合评分回归模型方差分析及显著性检验

Table 8 Variance analysis and significance test of regression model for comprehensive scores

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.2343	9	0.026	124.63	< 0.0001	**
A	0.0098	1	0.0098	46.92	0.0002	**
B	0.0013	1	0.0013	6.35	0.0398	*
C	0.0001	1	0.0001	0.5034	0.501	
AB	0.0002	1	0.0002	0.7481	0.4157	
AC	0.0001	1	0.0001	0.5279	0.4911	
BC	0.0001	1	0.0001	0.4788	0.5113	
A^2	0.1874	1	0.1874	897.14	< 0.0001	**
B^2	0.0254	1	0.0254	121.71	< 0.0001	**
C^2	0.0006	1	0.0006	28.81	0.001	**
残差	0.0015	7	0.0002			
失拟项	0.0011	3	0.0004	4.35	0.0949	不显著
纯误差	0.0003	4	0.0001			
总和	0.2357	16				

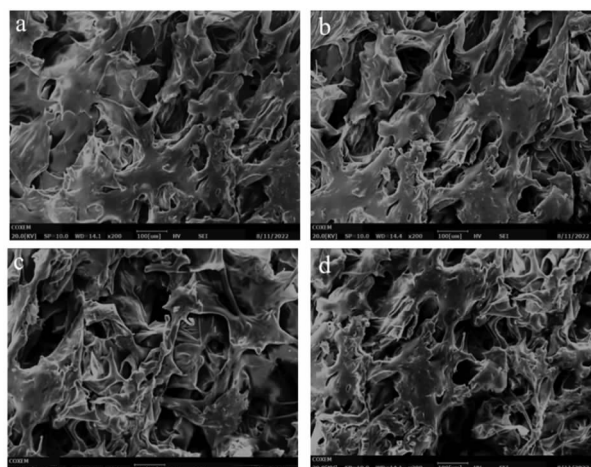
注:“**”表示差异极显著, ($P<0.01$);“*”表示差异显著, ($P<0.05$)。

2.6 微观结构分析

微观结构的变化从另一维度反映干燥速率的快慢和干燥效果。蓝莓在适当的干燥条件下可形成较好的孔隙结构,有利于水分迁移,保持较好的复水性和质构特性等。由响应面分析结果可知,微波功率对蓝莓干制品综合品质的影响最大,因此讨论不同微波功率条件下蓝莓内部结构完整性,其截面的微观结构如图 10 所示。在真空度 100 Pa,装载量 120 g 时的同等放大倍数下,微波功率为 300 W 时,蓝莓样品呈局部的疏松多孔结构。较低的微波功率导致蓝莓水分从微孔道蒸发缓慢,干燥时间较长,蓝莓细胞组织结构被破坏,部分气孔张开且不均匀;当微波功率为 400 W 时,样品的孔径结构变大,出现塌陷现象且有部分断裂,然而整体分布相对均匀,可能因为这一条件下的热传导阻力较小,物料中冰晶在短时间内快速升华^[35-36],样品细胞骨架和组织形态保持较好,此时的皱缩率低,复水性和质构特性也较好。而当微波功率增到 500 W 和 600 W 时,蓝莓样品内部孔径大小不一且细胞间隙不均等,出现纤维结构层叠,整体细胞骨架皱缩严重,变形最大,说明样品细胞结构破坏严重,这也使蓝莓的皱缩率变大,复水性变差。

3 讨论

本研究表明,与多数农产品的干燥特性类似^[15,23,37],蓝莓的干燥过程是一个动态变化过程,可依据蓝莓干燥速率的变化规律将其干燥过程分为两段:升温干燥阶段和降温干燥阶段。蓝莓在干燥前期的干燥速率较大,这是由于其表面含水率较小,整个干燥过程未出现明显的恒速干燥阶段,且后期存在两个不同的降温阶段,这与黄博等^[38]研究菠萝片的微波真空干燥特性的结果相似。在试验条件下,水分扩散系数的变化范围在 $3.341 \times 10^{-8} \sim 5.110 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。刘鹤等^[39]研究马铃薯的热风干燥时,其有效水分扩散系数在 $5.02 \times 10^{-10} \sim 11.53 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围变化;Zielinska 等^[6]在研究蓝莓的微波真空干燥时,测得有效水分扩散系数变化范围为 $1.73 \times 10^{-10} \sim 3.11 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。与常见的热风干燥和微波真空干燥相比,微波冷冻干燥的有效水分扩散系数相对更大,这表明此技术更有利于提高干燥效率。



注:a,b,c,d 分别为微波功率 300,400,500,600 W 的蓝莓干制品

图 10 不同微波功率下蓝莓干制品的微观结构($\times 200$)

Fig.10 Microstructure of dried blueberry products under different microwave power ($\times 200$)

由本试验数据可知,微波功率越大,装载量越小,蓝莓的干燥速率越大。相比而言,真空度对物料干燥速率的影响远小于微波功率。同时,提高微波功率虽然可以缩短干燥时间,加快干燥速率,但是这不意味着微波功率越大越好。微波功率对色泽影响显著($P < 0.05$),过高的微波功率会加剧褐变反应,其色差值 ΔE 变大,VC 与花青素的损失程度加大,从而影响干制品的最终品质。此结论与赵梦月等^[23]研究不同微波功率对山茱萸干燥动力学及品质影响的结果一致。随着微波功率、真空度的增大,复水比呈先上升后下降的趋势,说明过高的微波功率和真空度均破坏蓝莓内部的组织结构,在 400 W、100 Pa 的条件下有较好的复水性能。与微波功率不同,VC 含量随真空度和装载量的增加而缓慢上升。Shewale 等^[40]也得到类似的结论,真空度的提高弱化了 VC 等热敏性成分的氧化反应,其含量呈逐渐升高趋势。

采用综合评分法分析各因素对蓝莓综合品质的影响效果由大到小依次为:微波功率、真空度、装载量。除此之外,考虑到蓝莓的干燥过程是复杂的动态热质传递过程,除与干燥介质自身特性息息相关外,外部的干燥温度、预处理方式、温湿调控等也对内部水分相态转化与迁移、理化品质有显著影响^[12,41-42]。未来,进一步结合核磁共振技术等直观展现干燥蓝莓的水分扩散过程,探究内部

介电特性、热质传递等动态变化规律,将为蓝莓干燥工艺及品质调控提供可靠的理论指导。

4 结论

1) 在单因素实验条件下,微波功率对产品干燥速率的影响较大,干燥速率曲线存在明显的升速和降速两个阶段。Page 模型能很好地描述蓝莓微波冷冻干燥过程中的水分变化规律,有效水分扩散系数在 $3.341 \times 10^{-8} \sim 5.110 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。

2) 微波功率、真空度和物料装载量均对色泽影响显著 ($P < 0.05$), ΔE 随微波功率的升高而增大,随真空度的升高而减小。微波功率和真空度对蓝莓样品的收缩率、复水比影响较大,当微波功率 400 W,真空度 100 Pa 时,微波冻干后的蓝莓复水比较大,收缩率较小。

3) 不同干燥条件对蓝莓质构特性的影响不一,VC 保存率随微波功率的增加而快速减少,随真空度和装载量的提高呈缓慢上升趋势,而花青素含量随微波功率和真空度的增大呈快速下降趋势。

4) 响应面分析结果:各因素对综合评分的影响贡献率依次为微波功率>真空度>装载量。当蓝莓果的干燥参数为微波功率 400 W、真空度 100 Pa、装载量 120 g 时,其微波冷冻干燥效果最好,此条件下的蓝莓色泽、复水比、质构特性、VC 和花青素含量及内部孔隙分布情况相对最好,品质最佳。

参 考 文 献

- [1] 郜海燕,徐龙,陈杭君,等. 蓝莓采后品质调控和抗氧化研究进展[J]. 中国食品学报, 2013, 13(6): 1-8.
GAO H Y, XU L, CHEN H J, et al. Advances in postharvest quality control and antioxidant research of blueberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(6): 1-8.
- [2] CASTREJÓN A D R, EICHHOLZ I, ROHN S, et al. Phenolic profile and antioxidant activity of high-bush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) during fruit maturation and ripening[J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 564-572.
- [3] 纪淑娟,马超,周倩,等. 蓝莓果实贮藏期间软化及相关指标的变化[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 341-345.
- [4] JI S J, MA C, ZHOU Q, et al. Changes in softening and related indicators of blueberry fruit during storage[J]. Food Science, 2013, 34(12): 341-345.
- [5] YANG J F, SHI W J, BAI Y C, et al. Preharvest and postharvest UV radiation affected flavonoid metabolism and antioxidant capacity differently in developing blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. Food Chemistry, 2019, 301(15): 125248.
- [6] 许晴晴,陈杭君,郜海燕,等. 真空冷冻和热风干燥对蓝莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 64-68.
XU Q Q, CHEN H J, GAO H Y, Effect of vacuum freezing and hot air drying on the quality of blueberry[J]. Food Science, 2014, 35(5): 64-68.
- [7] ZIELINSKAM, MICHALSKA A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 671-680.
- [8] REYES A, EVSEEV A, MAHN A, et al. Effect of operating conditions in freeze-drying on the nutritional properties of blueberries[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2011, 62(3): 303-306.
- [9] 段柳柳. 怀山药微波冷冻干燥(MFD)过程的孔道演变特性及调控[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019.
DUAN L L. Characteristics and regulation of porous morphological of Chinese Yam during microwave freeze-drying (MFD)[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019.
- [10] FAN K, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Recent developments in high efficient freeze-drying of fruits and vegetables assisted by microwave: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(8): 1357-1366.
- [11] LI L L, CHEN J L, BAI D Q, et al. Physicochemical, pasting properties and *in vitro* starch digestion of Chinese yam flours as affected by microwave freeze-drying[J]. Foods, 2022, 11(15): 2324.
- [12] JIANG H, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Analysis of temperature distribution and SEM images of microwave freeze drying banana chips[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(5): 1144-1152.
- [13] LIU W C, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A

- novel combination of LF-NMR and NIR to intelligent control in pulse-spouted microwave freeze drying of blueberry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 137(11): 110455.
- [13] 宋树杰, 黄雪, 郭玉蓉. 基于温度控制的猕猴桃片微波真空干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 124-132, 244.
- SONG S J, HUANG X, GUO Y R. Study on the characteristics of microwave vacuum drying of kiwi slices based on temperature control[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 124-132, 244.
- [14] JU H Y, ZHAO S H, MUJUMDAR A S, et al. Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models[J]. Food and Bioproducts Processing, 2018, 111: 20-29.
- [15] WANG J, LAW C L, NEMA P K, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 224: 129-138.
- [16] 赵艳雪, 余金橙, 刘士琪, 等. 山楂切片冷冻干燥动力学与品质特性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(2): 53-60.
- ZHAO Y X, YU J C, LIU S Q. et al. Study on freeze-drying kinetics and quality characteristics of Hawthorn slices[J]. Food Research and Development, 2021, 42(2): 53-60.
- [17] 段续, 刘文超, 任广跃, 等. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 295-302.
- DUAN X, LIU W C, REN G Y. et al. Microwave freeze-drying characteristics and drying quality of *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 295-302.
- [18] DUAN X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(4): 491-497.
- [19] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 39-41.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 39-41.
- [20] 张荣菲, 王绍云. 贵州黔东南蓝莓中花青素的提取与含量测定[J]. 中国食品添加剂, 2016(11): 190-194.
- ZHANG R F, WANG S Y. Extraction and content determination of anthocyanins from blueberries in Qiandongnan, Guizhou [J]. China Food Additives, 2016(11): 190-194.
- [21] 代建武, 付琪其, 黄欢, 等. 青花椒真空脉动干燥特性及干燥品质工艺优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 279-287.
- DAI J W, FU Q Q, HUANG H, et al. Vacuum pulsation drying characteristics and drying quality process optimization of green pepper[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 279-287.
- [22] 赵泽颖, 袁越锦, 王栋, 等. 多指标试验公式法优化哈密瓜片真空热风干燥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 140-146.
- ZHAO Z Y, YUAN Y J, WANG D, et al. Optimization of vacuum hot air drying process of cantaloupe slices by multi-index test formula method[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 140-146.
- [23] 赵梦月, 段续, 任广跃, 等. 山茱萸微波冷冻干燥动力学及品质变化分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 111-117, 129.
- ZHAO M Y, DUAN X, REN G Y, et al. Analysis of microwave freeze-drying kinetics and quality changes of *Cornus officinalis*[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 111-117, 129.
- [24] REN G Y, ZENG F L, DUAN X, et al. The effect of glass transition temperature on the procedure of microwave-freeze drying of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Drying Technology, 2015, 33(2): 169-175.
- [25] 程新峰, 潘玲, 李宁, 等. 菊芋微波真空干燥过程的水分扩散特性及模型拟合[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 33-40.
- CHENG X F, PAN L, LI N, et al. Moisture diffusion characteristics and model fitting of microwave vacuum drying process of chicory[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 33-40.
- [26] 种翠娟, 朱文学, 刘云宏, 等. 胡萝卜薄层干燥动力学模型研究[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 24-29.
- ZHONG C J, ZHU W X, LIU Y H, et al. Kinetic modeling of thin-layer drying of carrots[J]. Food Science, 2014, 35(9): 24-29.

- [27] 胡云峰, 唐裕轩, 李宁宁, 等. 枸杞干制过程中褐变反应研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 159-163.
HU Y F, TANG Y X, LI N N, et al. Study of browning reactions in the drying process of *Lycium barbarum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(22): 159-163.
- [28] 张海伟, 鲁加惠, 张雨露, 等. 干燥方式对香菇品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 150-156.
ZHANG H W, LU J H, ZHANG Y L, et al. Effect of drying method on quality characteristics and microstructure of shiitake mushrooms[J]. Food Science, 2020, 41(11): 150-156.
- [29] 朱洪梅, 王禹心, 刘喻心, 等. 胡萝卜脆片冻干过程中水分、微观结构及品质变化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(11): 42-48.
ZHU H M, WANG Y X, LIU Y X, et al. Changes in moisture, microstructure and quality of carrot crisps during freeze-drying[J]. Food Research and Development, 2022, 43(11): 42-48.
- [30] TEPE T K, TEPE B. The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices[J]. Heat and Mass Transfer, 2020, 56(11): 3047-3057.
- [31] 高若婉, 李丽, 梅树立, 等. 基于遗传算法的苦瓜片真空冷冻干燥工艺优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 401-406.
GAO R W, LI L, MEI S L, et al. Optimization of vacuum freeze-drying process of bitter melon slices based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(S1): 401-406.
- [32] RIZZOLO A, VANOLI M, BIANCHI G, et al. Relationship between texture sensory profiles and optical properties measured by time-resolved reflectance spectroscopy during post-storage shelf life of 'Braeburn' apples[J]. Journal of Horticultural Research, 2014, 22(1): 113-121.
- [33] 易军鹏, 贺健, 李欣, 等. 微波真空冷冻干燥对酸菜品质及微生物活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 191-197.
YI J P, HE J, LI X, et al. Effect of microwave vacuum freeze-drying on the quality and microbial activity of sauerkraut[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 191-197.
- [34] TEPIĆ HORECKI A, VAKULA A, PAVLIĆ B, et al. Comparative drying of cornelian cherries: Kinetics modeling and physico-chemical properties[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(3): e13562.
- [35] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 不同组合冷冻干燥方法对水蜜桃脆片品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(7): 173-178.
WANG H O, FU Q Q, CHEN S J, et al. Effect of different combinations of freeze-drying methods on the quality of peach crisps[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 44(7): 173-178.
- [36] XIAO H W, BAI J W, XIE L, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. Food and Bioprocess Processing, 2015, 94: 581-591.
- [37] LIU W C, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A novel combination of LF-NMR and NIR to intelligent control in pulse-spouted microwave freeze drying of blueberry[J]. Lwt, 2021, 137(11): 110455.
- [38] 黄博, 李冠, 罗少梅, 等. 菠萝片微波真空干燥特性及动力学模型研究[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(10): 161-163, 168.
HUANG B, LI G, LUO S M, et al. Study on microwave vacuum drying characteristics and kinetic model of pineapple slices[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(10): 161-163, 168.
- [39] 刘鹤, 焦俊华, 田友, 等. 马铃薯片热风干燥特性及收缩动力学模型[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 58-64.
LIU H, JIAO J H, TIAN Y, et al. Hot air drying characteristics and shrinkage kinetic model of potato chips[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 58-64.
- [40] SHEWALE S R, RAJORIYA D, HEBBAR H U. Low humidity air drying of apple slices: Effect of EMR pretreatment on mass transfer parameters, energy efficiency and quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 55: 1-10.
- [41] CHEN F Y, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Comparative evaluation of the properties of deep-frozen blueberries dried by vacuum infrared freeze drying with the use of CO₂ laser perforation, ultrasound, and freezing-thawing as pretreatments[J].

- Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(10): 1805–1816.
- [42] 陈毅, 顾莹, 宋平, 等. 利用低场核磁共振分析蓝莓贮藏过程中水分含量及迁移变化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 321–328.
- CHEN Y, GU Y, SONG P, et al. Analysis of water content and migration changes during storage of blueberries using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(17): 321–328.

Analysis of Microwave Freeze-drying Characteristics and Quality of Blueberry

Yuan Di, Li Yang*, Chen Feng, Zhang Xinchuo, Huang Jiwei

(College of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040)

Abstract In order to investigate the microwave freeze-drying characteristics and quality changes of blueberries, this paper explores the effects of different microwave power (300, 400, 500, 600 W), vacuum degree (50, 100, 150, 200 Pa) and material loading (60, 120, 180, 240 g) on the drying characteristics of blueberries and their quality. A Box-Behnken central combination experimental design was carried out on the basis of a one-way experiment, and the comprehensive scores of drying rate, color difference, shrinkage, rehydration ratio, Vitamin C preservation rate, and anthocyanin retention rate of blueberries were used as evaluation indexes. The results showed that: the drying rate of blueberries in the pre-drying period was larger and became larger with the increase of microwave power, the R^2 of Page model were all greater than 0.95, which could better predict the moisture changes in the drying process of blueberries, and the effective moisture diffusion coefficient of blueberries ranged from 3.341×10^{-8} to 5.110×10^{-8} m²/s, and was significantly affected by the microwave power and loading capacity ($P < 0.05$). The chromatic aberration ΔE increased with the increase of microwave power and decreased with the increase of vacuum. The microwave power and vacuum degree had a greater influence on the rehydration performance, the VC retention rate decreased rapidly with the increase of microwave power, and increased slowly with the increase of vacuum degree and loading capacity, and had a maximum value at 400 W; whereas the anthocyanin content showed an overall rapid decreasing trend with the increase of microwave power and vacuum degree. According to the results of the response surface test, the contribution of each factor to the overall score of blueberry drying was: microwave power > vacuum degree > loading capacity. When the drying parameters of dried blueberry products were microwave power of 400 W, vacuum degree of 100 Pa, and loading capacity of 120 g, the microwave freeze-drying effect of blueberries was the best, at which time the blueberry color and luster, rehydration ratio, textural characteristics, vitamin C and anthocyanin content and internal pore distribution were relatively the best, and the quality was the best.

Keywords blueberry; microwave freeze-drying; drying characteristics; comprehensive score; quality