



聂梅梅,杨慧珍,李大婧,等. 超声预处理蓝莓真空冷冻干燥工艺优化及对品质的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(3):551-563.

NIE Meimei, YANG Huizhen, LI Dajing, et al. Optimization of vacuum freeze-drying process for blueberry with ultrasonic pretreatment and its effect on quality[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(3): 551-563.

超声预处理蓝莓真空冷冻干燥工艺优化及对品质的影响

聂梅梅^{1,2}, 杨慧珍¹, 李大婧^{1,2*}, 肖亚冬^{1,2}, 杨亦雯²,
于蕊², 刘春菊², 牛丽影², 金鹏¹

(1.南京农业大学食品科学技术学院,江苏南京 210095;2.江苏省农业科学院农产品加工研究所,江苏南京 210014)

摘要: [目的] 本文旨在更好提高蓝莓真空冷冻干燥速率与产品品质。 [方法] 利用超声处理作为预处理方式, 研究超声温度(45、55、65和75℃)、频率(45、80和100 kHz)、功率(600、700、800、900和1 000 W)和时间(25、30、35和40 min)对蓝莓真空冷冻干燥特性、质构、色泽、营养物质保留率及抗氧化活性的影响, 并以干燥速率、花青素含量、色泽和脆性为指标进行四因素三水平响应面优化试验, 筛选出最佳超声预处理工艺及参数。 [结果] 超声温度对蓝莓花青素含量的影响极显著($P<0.001$); 超声频率对蓝莓干燥速率、花青素含量和脆性的影响显著($P<0.05$); 超声功率对蓝莓脆性的影响显著($P<0.05$); 超声条件对蓝莓 ΔE 值的影响均不显著($P>0.05$)。最终获得蓝莓超声预处理的优化工艺条件: 超声温度55℃, 频率80 kHz, 功率700 W, 时间30 min, 此条件下蓝莓的干燥速率为 $1.69\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 花青素含量 $0.55\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 脆性 $2\ 770.00\text{ g}$, ΔE 值6.16。 [结论] 超声预处理可改善蓝莓真空冷冻干燥品质, 该结果为蓝莓真空冷冻干燥研究及产品开发提供基础。

关键词: 蓝莓; 真空冷冻干燥; 超声; 干燥速率; 响应面

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-2030(2024)03-0551-13

Optimization of vacuum freeze-drying process for blueberry with ultrasonic pretreatment and its effect on quality

NIE Meimei^{1,2}, YANG Huizhen¹, LI Dajing^{1,2*}, XIAO Yadong^{1,2},
YANG Yiwen², YU Rui², LIU Chunju², NIU Liying², JIN Peng¹

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: [Objectives] The paper aimed to improve the vacuum freeze-drying rate and product quality of blueberries. [Methods] The ultrasound treatment was used as a pretreatment method to study the effects of ultrasound temperature (45, 55, 65, 75 °C), frequency (45, 80, 100 kHz), power (600, 700, 800, 900, 1 000 W), and time (25, 30, 35, 40 min) on the drying characteristics, texture, color, nutrient retention rate, and antioxidant activity of blueberries. Then a four factors and three levels response surface optimization experiment was conducted using drying rate, anthocyanin content, color, and brittleness as indicators to select the optimal ultrasonic pretreatment process and parameters. [Results] Ultrasound temperature had a significant impact on the anthocyanin content of blueberries ($P<0.001$). The effect of ultrasound frequency on the drying rate, anthocyanin content, and brittleness of blueberries was significant ($P<0.05$). The effect of ultrasound power on blueberry brittleness was significant ($P<0.05$). The effect of ultrasound conditions on the ΔE value of blueberries was not significant ($P>0.05$). The optimize process conditions for ultrasonic pretreatment of blueberries were obtained as follows: ultrasonic temperature 55 °C, frequency 80 kHz, power 700 W, and time 30 minutes. Under these conditions, the drying rate of blueberries was $1.69\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, anthocyanin content $0.55\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, brittleness $2\ 770.00\text{ g}$, and ΔE value 6.16. [Conclusions] Ultrasonic pretreatment could improve the quality of blueberry vacuum freeze-drying. The results provide the basis for the research and product development of blueberry vacuum freeze-drying.

Keywords: blueberry; vacuum freeze-drying; ultrasound; drying rate; response surface

蓝莓 (*Vaccinium* spp.) 富含维生素、矿物质、氨基酸、花青素和果胶等, 食用价值高^[1], 被誉为“浆果之王”。2020年, 我国蓝莓的栽培面积和产量分别达到6万 hm^2 和28.5万t, 居全球第一^[2]。蓝莓表皮薄, 含水率高, 易受机械损伤和微生物污染, 不易贮存^[3-4]。干燥为保存果蔬的一种有效方法, 可以降低物料

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 江苏省现代农业-重点及面上项目 (BE2020338); 江苏省农业自主创新资金项目 [CX(21)2026]

*通信作者: 李大婧, 博士, 研究员, 研究方向为果蔬加工与营养健康, E-mail: lidajing@163.com。

中的水分含量,抑制酶活性和微生物生长,从而延长果蔬贮藏期。真空冷冻干燥(freeze-drying,FD)是近年来在果蔬加工中应用广泛的一种干燥方式。FD产品营养物质保留率高^[5],可保持原有的多孔结构,复水性好^[6-7],FD虽然能够更好维持物料原有的色、香、味及形态,但其干燥时间长、耗能高,在一定程度上限制了其在果蔬加工中的应用^[8]。

超声波作为一种典型的预处理技术在果蔬加工中应用广泛,其具有的空化和机械效应等作用能够破坏细胞结构,使果蔬细胞内部形成微通道,促进水分流通与扩散^[9]。适宜的超声强度能够提高果蔬的干燥速率,减少果蔬营养成分的损失^[10-11]。Fan等^[12]研究发现,超声处理后胡萝卜真空冷冻和红外冷冻干燥时间分别减少15.04%和20.45%, β -胡萝卜素的保留率提高22.7%以上。Soquetta等^[13]比较了探头式和连续式超声不同处理时间对红根甜菜干燥特性及品质的影响,发现2种超声处理后甜菜的热风干燥时间均缩短20%以上,且探头式超声处理后红根甜菜的干燥时间最短,品质最好。在蓝莓超声预处理研究中,Liu等^[14]发现超声预处理和碱液辅助超声处理均可显著提高蓝莓真空冷冻干燥速率。

前期研究表明超声处理有助于破坏蓝莓表皮蜡质层,提高细胞膜渗透率(暂未发表)。超声预处理中的不同参数对果蔬干燥特性与产品品质影响不同,因此本研究开展超声不同参数下蓝莓干燥特性与干制品品质分析及工艺优化试验,分析超声不同温度、频率、功率和时间对蓝莓干基含水率、干燥速率、质构、色泽、花青素、维生素C及抗氧化活性的影响,获得受超声影响显著的真空冷冻干燥蓝莓关键品质指标;在此基础上进行四因素三水平响应面优化试验,确定最佳连续式超声预处理工艺条件和参数,为更好提高蓝莓干燥速率与产品品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

蓝莓品种‘蓝丰’购于南京市玄武区孝陵卫银超市。挑选果实完整、成熟度及大小一致的蓝莓,置于4℃冰箱中保存备用。

1.2 试验试剂与设备

食用纯碱购自南京甘汁园糖业有限公司;六水氯化铁、三氯化铁、过硫酸钾均购自南京化学试剂股份有限公司;L(+)-抗坏血酸购自上海源叶生物科技有限公司。

KQ-S1000VDE三频数控超声波清洗器购自昆山市超声仪器有限公司;Agilent 5977A-7890A气相色谱质谱联用仪购自美国安捷伦科技有限公司;FE20实验室pH计购自上海梅特勒-托利多仪器有限公司;BLK-FD-0.5真空冷冻干燥机购自江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;H3-16KP台式高速冷冻离心机购自湖南可成仪器设备有限公司;CM-700d1全自动色差仪购自日本柯尼卡美能达公司;CT3质构仪购自英国CNS Farmell公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 将原料中受伤、破损的蓝莓剔除,选取大小相似的蓝莓清洗、沥干后,采用20 g·L⁻¹食用纯碱溶液辅助超声处理新鲜蓝莓。将超声预处理后的蓝莓用清水洗净后沥干,置于-20℃环境下完全冻结,之后进行真空冷冻干燥。以未超声处理的蓝莓作为对照组(CK)。

1.3.2 超声处理条件优化 超声预处理工艺参数的单因素试验:选择超声温度(45、55、65、75℃)、超声频率(45、80、100 kHz)、超声功率(600、700、800、900、1 000 W)和超声时间(25、30、35、40 min)4个因素进行单因素试验,分别考察其对蓝莓干燥速率、色泽、质构、花青素、维生素C和抗氧化活性保留率的影响。

超声波预处理响应面优化试验:根据单因素试验结果,选取超声温度、超声频率、超声功率和超声时间作为自变量,干燥速率、脆性、花青素含量、 ΔE 值作为响应值,进行响应面试验设计。

1.3.3 真空冷冻干燥 将超声预处理后的蓝莓置于-20℃环境下完全冻结,然后进行真空冷冻干燥。真空冷冻干燥参数:冷阱温度-40℃,真空度20 Pa,以蓝莓含水率 $\leq 8\%$ 为干燥终点。干燥程序:0℃(2 h)→5℃(2 h)→10℃(2 h)→20℃(2 h)→30℃(2 h)→40℃(2 h)→50℃(12 h)。

1.3.4 干燥速率的测定 蓝莓干燥速率采用总平均速率表示,即整个干燥过程开始到干燥结束时蓝莓干基含水率之差与所需时间之比,单位为g·g⁻¹·h⁻¹^[15]。

1.3.5 色泽的测定 采用全自动色差仪对蓝莓进行测定,获得 L^* 、 a^* 、 b^* 3个值。 L^* 代表亮度值, a^* 代表红值, b^* 代表黄值, ΔE 代表干燥前后的色差值。计算公式如下:

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

式中: ΔE 为总色差; L_0 、 a_0 、 b_0 为新鲜蓝莓的测定值; L^* 、 a^* 、 b^* 为干燥后蓝莓的测定值。

1.3.6 质构的测定 采用CT3质构仪对蓝莓进行质地剖面分析(TPA)测试。参考文献[16]方法,选用TA11/1000探头,测试类型为TPA,测前速率 $5.00 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,测试速率 $1.00 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,测后速率 $5.00 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,形变量30%,触发力5 g。平行测定5次,取平均值。

1.3.7 维生素C和花青素含量测定 采用磷钼酸法测定维生素C含量。称取样品0.5 g,加入10 mL草酸-EDTA, $4\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心5 min。取上清液0.5 mL,依次加入0.5 mL蒸馏水,2 mL草酸($0.05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)-EDTA($0.2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$),0.5 mL偏磷酸-乙酸[偏磷酸3 g,48 mL冰乙酸(冰乙酸、蒸馏水体积比为1:5),定容至100 mL],1 mL硫酸(硫酸、蒸馏水体积比为1:19),2 mL $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 钼酸铵,最后在760 nm处测定吸光值。采用pH示差法^[17-18]测定花青素含量。

1.3.8 抗氧化活性的测定 抗氧化能力用FRAP(铁离子还原/抗氧化能力法)自由基清除能力表示,参照李媛媛等^[19]的测定方法,并稍作修改。准确称取蓝莓粉0.2 g,加入8 mL生理盐水, $4\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $12\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心5 min,取上清液测定。移取5 μL 样品液于96微孔板中,加入180 μL 3,5-氯化三苯基四氮唑(TPTZ)工作液,于593 nm处测定吸光值。保留率以干燥后样品中含量与未超声干燥样品含量的比值表示。

1.4 数据分析

每组试验平行测定3次,结果以平均值 \pm 标准差表示。采用Origin 9.0软件绘图,采用SPSS 25.0软件进行方差分析,采用Duncan's检验法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 超声温度对蓝莓干燥特性和品质的影响

以超声功率700 W、超声频率45 kHz、超声时间为30 min处理蓝莓样品,探究超声温度对蓝莓干燥特性和品质的影响。由图1-A可知:超声温度越高,蓝莓干基含水率曲线斜率越大,表明其在高温时水分蒸发较快。在0~8 h,超声75 $^\circ\text{C}$ 的干基含水率最小,说明此时蓝莓的干基含水率变化最快,干燥效果较好,而45和55 $^\circ\text{C}$ 的干基含水率基本一致。由图1-B可知:随着超声温度的增加,干燥速率呈先上升后下降的趋势,65 $^\circ\text{C}$ 时,蓝莓的干燥速率最高,为 $1.71 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

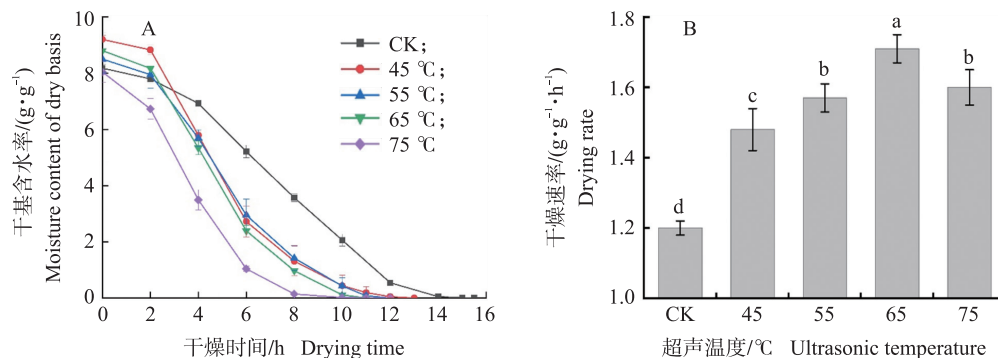


图1 超声温度对蓝莓干基含水率(A)及干燥速率(B)的影响

Fig. 1 Effects of ultrasonic temperature on moisture content of dry basis(A) and drying rate(B) of blueberry

1) CK:未超声处理的对照组 Control group without ultrasonic treatment. 2)不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Different small letters indicate significant difference at 0.05 level among treatments. The same as follows.

超声温度对蓝莓质构的影响如表1所示,随着温度的升高,蓝莓的硬度逐渐增加,超声75 $^\circ\text{C}$ 时,蓝莓的硬度最大,且显著高于其他处理温度($P<0.05$);超声65 $^\circ\text{C}$ 时,蓝莓的脆性和咀嚼性最大,分别为881.33 g和1.40 mJ;除对照组外,超声温度为55 $^\circ\text{C}$ 时,蓝莓的脆性、硬度最小,与其他处理条件间有显著性差异。

由表2可知:超声温度对蓝莓色泽有显著性影响。随着温度的升高,蓝莓的总色差 ΔE 值呈先减少后增加趋势,其中,超声75 $^\circ\text{C}$ 处理后蓝莓的 b^* 和 ΔE 值最高,表明该温度处理后的样品与对照组之间的差异较大。

表1 超声温度对蓝莓质构的影响

Table 1 Effect of ultrasonic temperature on texture of blueberry

温度/℃ Temperature	脆性/g Brittleness	硬度/g Hardness	弹性/mm Flexibility	内聚性 Cohesion	咀嚼性/mJ Chewiness
CK	422.67±21.39 ^c	1 170.67±89.76 ^c	0.51±0.13 ^b	0.06±0.03 ^a	0.33±0.15 ^b
45	841.33±87.37 ^a	1 389.33±111.00 ^c	0.67±0.22 ^{ab}	0.05±0.03 ^a	0.37±0.40 ^b
55	664.00±66.30 ^b	1 236.00±100.48 ^c	0.67±0.02 ^{ab}	0.05±0.02 ^a	0.43±0.12 ^b
65	881.33±5.03 ^a	2 261.33±131.72 ^b	0.85±0.07 ^a	0.09±0.03 ^a	1.40±0.44 ^a
75	776.67±63.54 ^a	3 414.00±331.91 ^a	0.83±0.09 ^a	0.04±0.01 ^a	1.20±0.10 ^a

表2 超声温度对蓝莓色泽的影响

Table 2 Effect of ultrasonic temperature on the color of blueberry

温度/℃ Temperature	L^*	a^*	b^*	ΔE
CK	31.05±0.18 ^b	0.15±0.03 ^b	-2.30±0.35 ^c	
45	33.01±0.46 ^a	-0.29±0.08 ^c	-2.54±0.12 ^c	2.03±0.42 ^b
55	30.15±0.78 ^b	0.35±0.11 ^b	-1.61±0.14 ^b	1.25±0.53 ^c
65	28.36±0.32 ^c	1.57±0.42 ^a	-0.68±0.21 ^a	3.46±0.42 ^a
75	27.92±0.59 ^c	1.38±0.15 ^a	-0.42±0.01 ^a	3.86±0.51 ^a

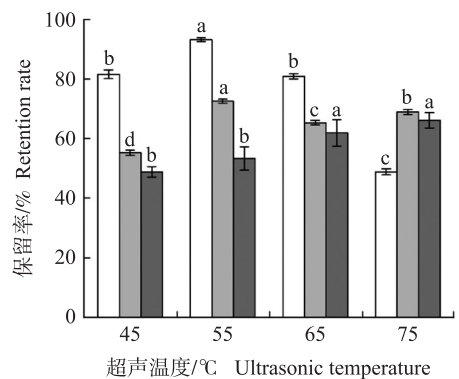
由图2可知:超声温度对蓝莓营养品质的影响有显著性差异。随着超声温度的升高,蓝莓的抗氧化活性保留率增加,花青素保留率先增加后减小。在55℃时,蓝莓花青素和维生素C保留率最高,分别为93.21%和72.53%。综合蓝莓的干燥速率、感官和营养品质考虑,优化的超声温度为55、65、75℃。

2.2 超声频率对蓝莓干燥特性和品质的影响

以超声功率700 W、超声温度55℃、超声时间为30 min处理蓝莓样品,探究超声频率对蓝莓干燥特性和品质的影响。由图3-A可知:随着超声频率的增加,蓝莓的干基含水率曲线斜率减小。由图3-B可知:蓝莓的干燥速率随着超声频率的增加而减小,当频率为45 kHz时,蓝莓干燥速率最大,且显著高于其他超声条件。

由表3可知:随着频率的增加,蓝莓的脆性和硬度逐渐增加,100 kHz超声频率时,蓝莓的脆性、硬度和咀嚼性最大。超声频率对蓝莓的内聚性无显著性差异($P>0.05$)。

由表4可知:超声频率对蓝莓色泽有显著性影响。除对照组外,80 kHz超声频率处理后蓝莓的 L^* 和 a^* 值最大,总色差 ΔE 值最小,表明该频率处理后的样品与对照组之间的差异较小。超声频率为100 kHz时蓝莓的 L^* 最低,为20.98, ΔE 值最大,为10.91。



□ 花青素 Anthocyanin; ■ 维生素 C Vitamin C; ■ 抗氧化活性 Antioxidant activity

图2 超声温度对蓝莓营养品质的影响

Fig. 2 Effect of ultrasonic temperature on nutritional quality of blueberry

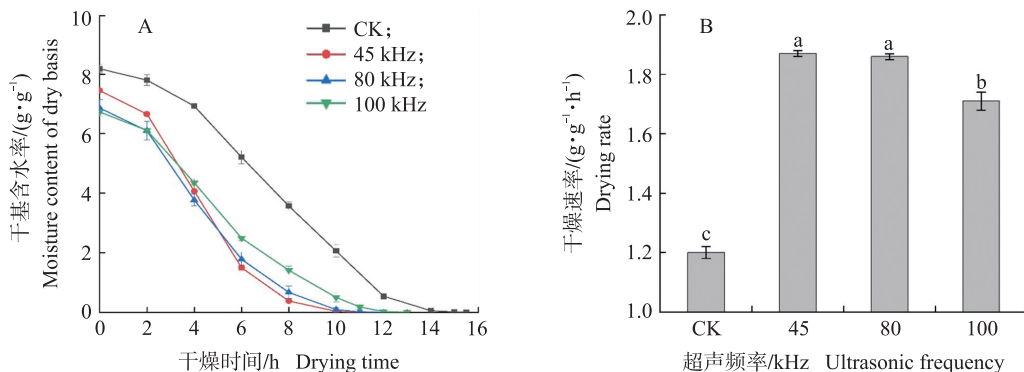


图3 超声频率对蓝莓干基含水率(A)及干燥速率(B)的影响

Fig. 3 Effects of ultrasonic frequency on moisture content of dry basis(A) and drying rate(B) of blueberry

表 3 超声频率对蓝莓质构的影响

Table 3 Effect of ultrasonic frequency on texture of blueberry

频率/kHz Frequency	脆性/g Brittleness	硬度/g Hardness	弹性/mm Flexibility	内聚性 Cohesion	咀嚼性/mJ Chewiness
CK	928.67±27.01 ^c	1 001.67±24.79 ^b	1.88±0.06 ^b	0.53±0.03 ^a	13.07±0.91 ^{bc}
45	1 017.33±27.15 ^b	1 048.00±27.50 ^b	2.08±0.09 ^{ab}	0.51±0.10 ^a	11.53±0.97 ^c
80	1 032.67±15.01 ^b	1 075.33±61.78 ^b	2.37±0.26 ^a	0.56±0.02 ^a	13.57±0.59 ^{ab}
100	1 375.33±75.22 ^a	1 510.00±40.15 ^a	2.02±0.28 ^{ab}	0.50±0.05 ^a	14.87±0.86 ^a

表 4 超声频率对蓝莓色泽的影响

Table 4 Effect of ultrasonic frequency on the color of blueberry

频率/kHz Frequency	L^*	a^*	b^*	ΔE
CK	31.15±0.34 ^a	2.77±0.17 ^{ab}	-3.25±0.41 ^c	
45	22.64±0.77 ^c	2.45±0.28 ^b	-0.22±0.06 ^b	9.05±0.69 ^b
80	24.61±0.60 ^b	3.59±0.73 ^a	0.33±0.04 ^a	7.54±0.50 ^c
100	20.98±0.81 ^d	3.30±0.35 ^{ab}	0.64±0.13 ^a	10.91±0.64 ^a

由图 4 可知:随着超声频率的增加,蓝莓花青素保留率先增加后减小,维生素 C 和抗氧化活性保留率增加。超声频率为 80 kHz 时,蓝莓花青素保留率达到(90.22±0.54)%,含量为 0.55 mg·g⁻¹,与其他处理之间差异显著。超声频率为 45 kHz 时,蓝莓维生素 C 和抗氧化活性保留率最低,分别为 30.13%和 56.58%。综合蓝莓的干燥速率、感官和营养品质考虑,优化的超声频率为 45、80、100 kHz。

2.3 超声功率对蓝莓干燥特性和品质的影响

以超声频率 45 kHz、超声温度 55 ℃、超声时间为 30 min 处理蓝莓样品,探究超声功率对蓝莓干燥特性和品质的影响。由图 5-A 可知:蓝莓干基含水率曲线斜率随着超声功率的增加先减小后增加,在功率为 700、900 和 1 000 W 时蓝莓的干基含水率无明显差异。由图 5-B 可知:随着超声功率的增加,干燥速率呈现先上升后下降的趋势,功率为 900 W 时蓝莓干燥速率最大,为 1.87 g·g⁻¹·h⁻¹,显著高于其他超声功率处理条件。

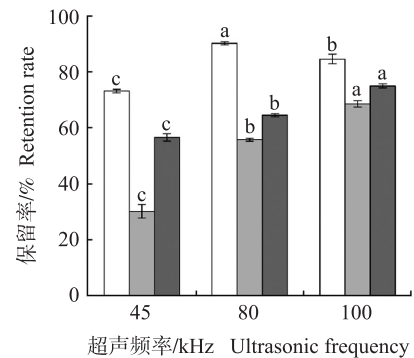


图 4 超声频率对蓝莓营养品质的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic frequency on nutritional quality of blueberry

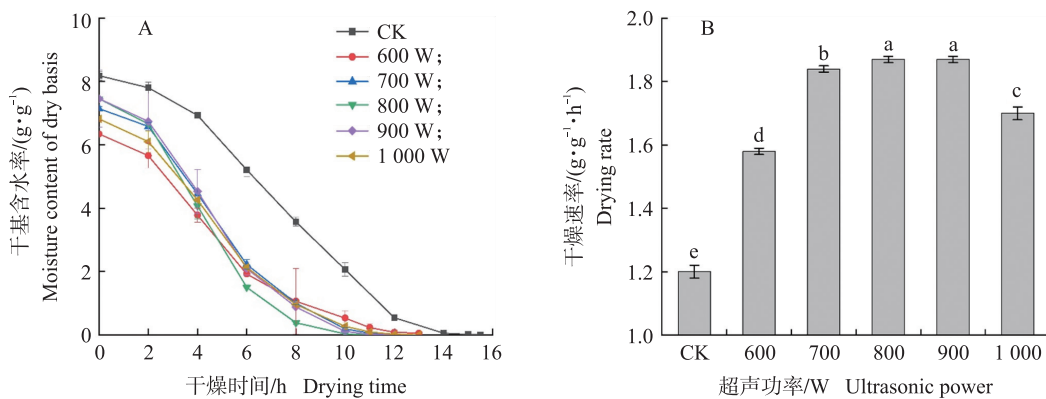


图 5 超声功率对蓝莓干基含水率(A)及干燥速率(B)的影响

Fig. 5 Effects of ultrasonic power on moisture content of dry basis(A) and drying rate(B) of blueberry

由表 5 可知:超声功率对蓝莓的脆性、硬度和咀嚼性有显著性影响(P<0.05)。随着功率的增加,蓝莓的脆性和硬度先增加后减小,超声功率为 700 W 时,蓝莓的脆性、硬度和咀嚼性最大。当超声功率为 800 和 900 W 时,蓝莓的质构特性无显著性差异。

由表 6 可知:除对照组外,超声功率为 700 W 时蓝莓的 L* 值最高,总色差 ΔE 值最小,表明该功率处理后的样品与对照组之间的差异较小。超声功率为 900 W 时蓝莓的 L* 最低,ΔE 值最大,为 12.52,与其他功率之间差异显著。

表5 超声功率对蓝莓质构的影响

Table 5 Effect of ultrasonic power on texture of blueberry

功率/W Power	脆性/g Brittleness	硬度/g Hardness	弹性/mm Flexibility	内聚性 Cohesion	咀嚼性/mJ Chewiness
CK	1 710.00±86.28 ^d	1 766.00±76.63 ^d	2.15±0.32 ^a	0.56±0.08 ^a	18.70±1.64 ^b
600	1 662.67±86.12 ^d	1 809.33±93.60 ^d	2.06±0.17 ^a	0.56±0.01 ^a	19.77±2.31 ^b
700	2 735.33±278.44 ^a	2 927.33±216.37 ^a	1.96±0.03 ^a	0.50±0.01 ^{ab}	27.17±3.16 ^a
800	2 261.00±79.99 ^{bc}	2 448.33±100.25 ^b	1.97±0.08 ^a	0.52±0.04 ^a	20.50±0.82 ^b
900	2 364.67±32.08 ^b	2 540.67±126.81 ^b	1.94±0.02 ^a	0.45±0.03 ^b	21.47±0.67 ^b
1 000	2 045.33±99.45 ^c	2 168.00±102.53 ^c	2.05±0.13 ^a	0.51±0.03 ^{ab}	22.23±1.40 ^b

表6 超声功率对蓝莓色泽的影响

Table 6 Effect of ultrasonic power on the color of blueberry

功率/W Power	L^*	a^*	b^*	ΔE
CK	31.15±0.34 ^a	2.77±0.17 ^b	-3.25±0.41 ^c	
600	24.26±0.59 ^b	3.36±0.30 ^a	0.27±0.11 ^a	7.78±0.31 ^c
700	25.17±0.47 ^b	2.44±0.37 ^b	0.25±0.06 ^a	6.99±0.45 ^d
800	22.64±0.77 ^c	2.45±0.28 ^b	-0.22±0.06 ^b	9.05±0.69 ^b
900	19.29±0.60 ^d	1.82±0.19 ^c	0.58±0.33 ^a	12.52±0.46 ^a
1 000	19.54±0.28 ^d	0.40±0.10 ^d	-0.15±0.07 ^b	12.26±0.32 ^a

由图6可知:在功率为700~1 000 W时,蓝莓营养成分的保留率先减小后增加;在功率为800 W时,蓝莓营养品质的保留率最低;在功率为700 W时,蓝莓花青素、维生素C和抗氧化活性保留率最高,分别为90.81%、71.30%和66.49%。综合蓝莓的干燥速率、感官和营养品质考虑,优化的超声功率为700、800、900 W。

2.4 超声时间对蓝莓干燥特性和品质的影响

以超声频率45 kHz、超声温度55℃、超声功率为700 W处理蓝莓样品,探究超声时间对蓝莓干燥特性和品质的影响。由图7-A可知:蓝莓干基含水率曲线斜率随着超声时间的增加而增加,且超声30、35和40 min之间的干基含水率无显著性差异。由图7-B可知:超声时间为30 min时蓝莓干燥速率最大,为 $1.87 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,且干燥速率显著高于其他超声处理时间。

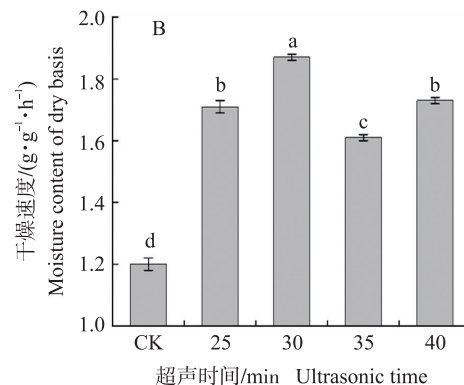
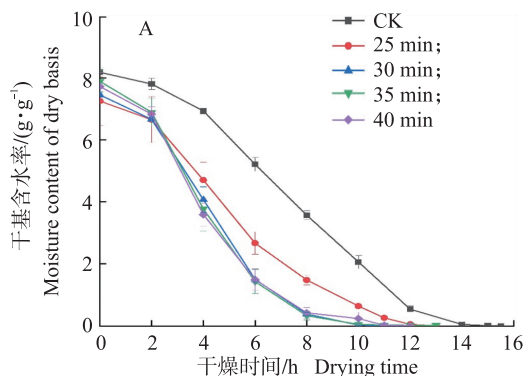


图7 超声时间对蓝莓干基含水率(A)及干燥速率(B)的影响

Fig. 7 Effects of ultrasonic time on moisture content of dry basis(A) and drying rate(B) of blueberry

由表7可知:超声时间对蓝莓的脆性和硬度有显著性的影响,对蓝莓的弹性和咀嚼性无显著性影响。随着超声时间的增加,蓝莓的脆性和硬度先增加后减小,超声时间为35 min时,蓝莓的脆性和硬度最大,分别为 $(2 062.67 \pm 7.57) \text{ g}$ 和 $(2 098.00 \pm 12.17) \text{ g}$ 。

由表8可知:蓝莓的 a^* 值随超声时间的增加而增加,总色差 ΔE 值随时间的增加先减小后增加,在超

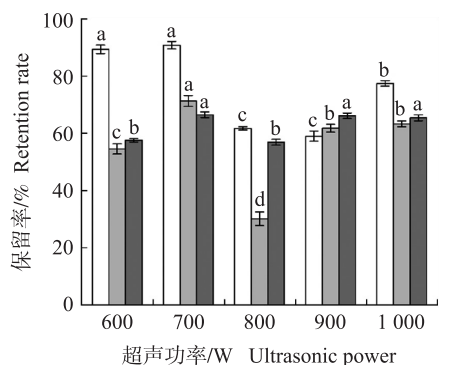


图6 超声功率对蓝莓营养品质的影响

Fig. 6 Effect of ultrasonic power on nutritional quality of blueberry

表 7 超声时间对蓝莓质构的影响

Table 7 Effect of ultrasonic time on texture of blueberry

时间/min Time	脆性/g Brittleness	硬度/g Hardness	弹性/mm Flexibility	内聚性 Cohesion	咀嚼性/mJ Chewiness
CK	1 710.00±86.28 ^c	1 766.00±76.63 ^c	2.15±0.32 ^a	0.56±0.08 ^d	18.70±1.64 ^a
25	1 638.67±33.01 ^c	1 694.67±15.01 ^c	0.60±0.01 ^b	1.93±0.23 ^c	18.63±0.91 ^a
30	1 912.00±60.10 ^b	1 942.00±75.02 ^b	0.61±0.03 ^b	2.12±0.07 ^{bc}	20.63±1.26 ^a
35	2 062.67±7.57 ^a	2 098.00±12.17 ^a	0.62±0.09 ^b	2.21±0.20 ^{ab}	20.80±0.82 ^a
40	1 989.33±61.78 ^{ab}	2 008.67±63.57 ^{ab}	0.65±0.06 ^b	2.48±0.09 ^a	20.83±1.17 ^a

表 8 超声时间对蓝莓色泽的影响

Table 8 Effect of ultrasonic time on the color of blueberry

时间/min Time	L^*	a^*	b^*	ΔE
CK	31.15±0.34 ^a	2.77±0.17 ^a	-3.25±0.41 ^d	
25	22.23±0.56 ^c	1.18±0.16 ^b	-0.04±0.02 ^b	9.64±0.51 ^a
30	27.76±1.02 ^b	1.71±0.33 ^b	-0.88±0.03 ^c	4.37±0.90 ^c
35	26.96±0.30 ^b	2.72±0.67 ^a	-0.34±0.07 ^b	5.16±0.44 ^{bc}
40	27.05±0.30 ^b	3.46±0.43 ^a	0.44±0.23 ^a	5.59±0.24 ^b

声时间为 30 min 时蓝莓的 L^* 值最大, ΔE 值最小, 表明该超声条件处理的样品与对照组之间的差异较小。超声 25 min 时蓝莓的 L^* 和 a^* 值最小, ΔE 值最大。

由图 8 可知: 超声时间对蓝莓营养品质的影响有显著性差异。随着超声时间的增加, 蓝莓维生素 C 保留率先增加后减小。超声时间为 30 min 时, 蓝莓花青素和维生素 C 保留率最高, 分别为 78.8% 和 61.14%; 超声时间 40 min 时, 蓝莓抗氧化活性保留率最高, 为 76.02%。综合蓝莓的干燥速率、感官和营养品质考虑, 优化的超声时间为 30、35、40 min。

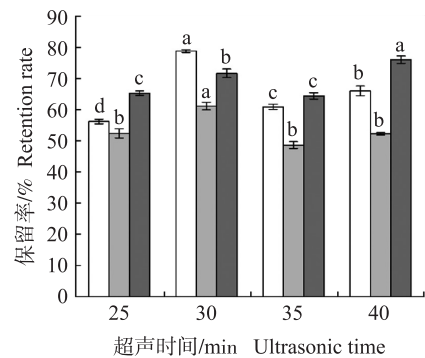
2.5 响应面优化试验结果与分析

以单因素试验的结果为基础, 对超声处理后蓝莓的干燥速率、脆性、 ΔE 值和花青素含量进行响应面优化处理, 试验设计及结果见表 9。

表 9 试验设计及结果

Table 9 Test design and results

序号 No.	温度/°C Temperature	频率/kHz Frequency	功率/W Power	时间/min Time	干燥速率/ ($g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) Drying rate	花青素含量/ ($mg \cdot g^{-1}$) Anthocyanin content	脆性/g Brittleness	ΔE
1	55	45	800	35	1.59	0.46	2 024	3.70
2	75	45	800	35	1.67	0.29	1 724	4.23
3	55	100	800	35	1.58	0.41	2 784	3.83
4	75	100	800	35	1.51	0.16	2 486	4.04
5	65	80	700	30	1.58	0.33	2 888	4.16
6	65	80	900	30	1.59	0.38	2 232	3.66
7	65	80	700	40	1.57	0.32	2 604	6.43
8	65	80	900	40	1.54	0.39	2 570	4.37
9	55	80	800	30	1.55	0.44	2 120	3.72
10	75	80	800	30	1.42	0.19	2 546	4.72
11	55	80	800	40	1.49	0.32	2 292	3.45
12	75	80	800	40	1.64	0.21	2 654	4.15
13	65	45	700	35	1.68	0.38	2 294	4.86
14	65	100	700	35	1.52	0.36	2 878	4.53
15	65	45	900	35	1.58	0.32	2 128	4.83
16	65	100	900	35	1.52	0.34	2 214	4.61
17	55	80	700	35	1.64	0.28	2 426	4.22
18	75	80	700	35	1.65	0.19	2 642	4.03
19	55	80	900	35	1.64	0.36	2 076	3.59



□ 花青素 Anthocyanin; ■ 维生素 C Vitamin C; ■ 抗氧化活性 Antioxidant activity

图 8 超声时间对蓝莓营养品质的影响

Fig. 8 Effect of ultrasonic time on nutritional quality of blueberry

续表9 Table 9 continued

序号 No.	温度/°C Temperature	频率/kHz Frequency	功率/W Power	时间/min Time	干燥速率/ (g·g ⁻¹ ·h ⁻¹) Drying rate	花青素含量/ (mg·g ⁻¹) Anthocyanin content	脆性/g Brittleness	ΔE
20	75	80	900	35	1.65	0.20	2 424	4.49
21	65	45	800	30	1.52	0.39	2 260	6.77
22	65	100	800	30	1.44	0.30	2 596	6.47
23	65	45	800	40	1.51	0.38	2 356	6.99
24	65	100	800	40	1.46	0.28	2 428	6.80
25	65	80	800	35	1.64	0.20	2 034	6.72
26	65	80	800	35	1.65	0.21	1 972	7.44
27	65	80	800	35	1.61	0.17	1 974	6.50
28	65	80	800	35	1.64	0.23	2 198	7.44
29	65	80	800	35	1.65	0.18	2 184	6.14

对表9中的试验数据进行处理,利用 Design Expert 8.0 软件分析数据,各项回归系数和变量分析见表10,各个试验因素对响应值的影响可用下列回归方程表示:

$$\text{干燥速率} = 1.65 + 0.011A - 0.044B - 0.015C + 6.364 \times 10^{-3}D - 0.038AB - 1.925 \times 10^{-3}AC + 0.069AD + 0.029BC + 0.011BD - 0.012CD - 4.037 \times 10^{-3}A^2 - 0.077B^2 + 0.012C^2 - 0.093D^2;$$

$$\text{花青素含量} = 0.200 - 0.083A - 0.032B + 0.0108C - 0.0100D - 0.0200AB - 0.0175AC + 0.0350AD + 0.0100BC + 0.0010BD + 0.0025CD + 0.0202A^2 + 0.0889B^2 + 0.0627C^2 + 0.0714D^2;$$

$$\text{脆性} = 2\,001.86 + 52.72A + 216.67B - 154.02C + 31.38D + 55.65AB + 33.00AC - 16.00AD - 109.91BC - 52.53BD + 155.50CD + 86.63A^2 + 153.92B^2 + 233.88C^2 + 255.13D^2;$$

$$\Delta E \text{ 值} = 6.91 + 0.27A - 0.092B - 0.22C + 0.21D - 0.055AB + 0.27AC - 0.075AD - 0.034BC + 0.048BD - 0.39CD - 2.10A^2 - 0.47B^2 - 1.39C^2 - 0.41D^2。$$

式中:A、B、C、D 分别代表超声温度、超声频率、超声功率和超声时间,方程中的各项系数可以表示各因素对干燥速率、花青素含量、脆性和 ΔE 的影响情况。

通过对上述回归模型进行方差分析,检验方程的有效性。由表10可知,4个指标的模型均显著,回归方程失拟项均不显著,表明该方程能够较好预测试验数据,拟合度较好。影响蓝莓干燥速率从大到小的因素依次为超声频率、超声功率、超声温度、超声时间,超声频率对蓝莓干燥速率的影响显著($P < 0.05$);影响蓝莓花青素含量从大到小的因素依次为超声温度、超声频率、超声功率、超声时间,其中超声温度对蓝莓花青素含量的影响极显著,超声频率对蓝莓花青素含量的影响显著;影响蓝莓脆性从大到小的因素依次为超声频率、超声功率、超声温度、超声时间,超声频率和功率对蓝莓脆性的影响显著;影响蓝莓 ΔE 值从大到小的因素依次为超声温度、超声功率、超声时间、超声频率,超声温度、时间、功率和频率对 ΔE 值的影响不显著。

表10 回归系数及变量分析

Table 10 Regression coefficient and variable analysis

系数项 Coefficient term	干燥速率/(g·g ⁻¹ ·h ⁻¹) Drying rate	花青素含量/(mg·g ⁻¹) Anthocyanin content	脆性/g Brittleness	ΔE
Model	<0.000 1 ***	0.000 4 ***	0.013 7 *	0.011 7 *
Intercept	1.65	0.200	2 001.86	6.91
A	0.01	0.083 ***	52.72	0.27
B	0.04 ***	0.032 *	216.67 **	0.09
C	0.02	0.010 8	154.02 *	0.22
D	6.36×10 ⁻³	0.010	31.38	0.21
AB	0.04 *	0.014	55.65	0.06
AC	1.93×10 ⁻³	0.018	33.00	0.27
AD	0.07 ***	0.035	16.00	0.08
BC	0.03	0.018	109.91	0.03
BD	0.01	0.001	52.53	0.05
CD	0.01	0.005	155.50	0.39
A ²	4.04×10 ⁻³	0.020	86.63	2.10 ***
B ²	0.08 ***	0.087 ***	153.92	0.47
C ²	0.01	0.063 **	233.88 **	1.39 **
D ²	0.09 ***	0.071 **	255.13 **	0.41
失拟项	0.117 7	0.081 3	0.102 5	0.166 5

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

2.6 交互作用分析

由表 10 和图 9 可知:超声温度和超声频率的交互作用对蓝莓干燥速率的影响显著。干燥速率随超声频率的增加先增加后减小,随超声温度的增加而增加。超声温度和超声时间的交互作用对蓝莓干燥速率的影响极显著($P<0.001$),干燥速率随超声时间的增加先增加后减小,随超声温度的增加而下降。

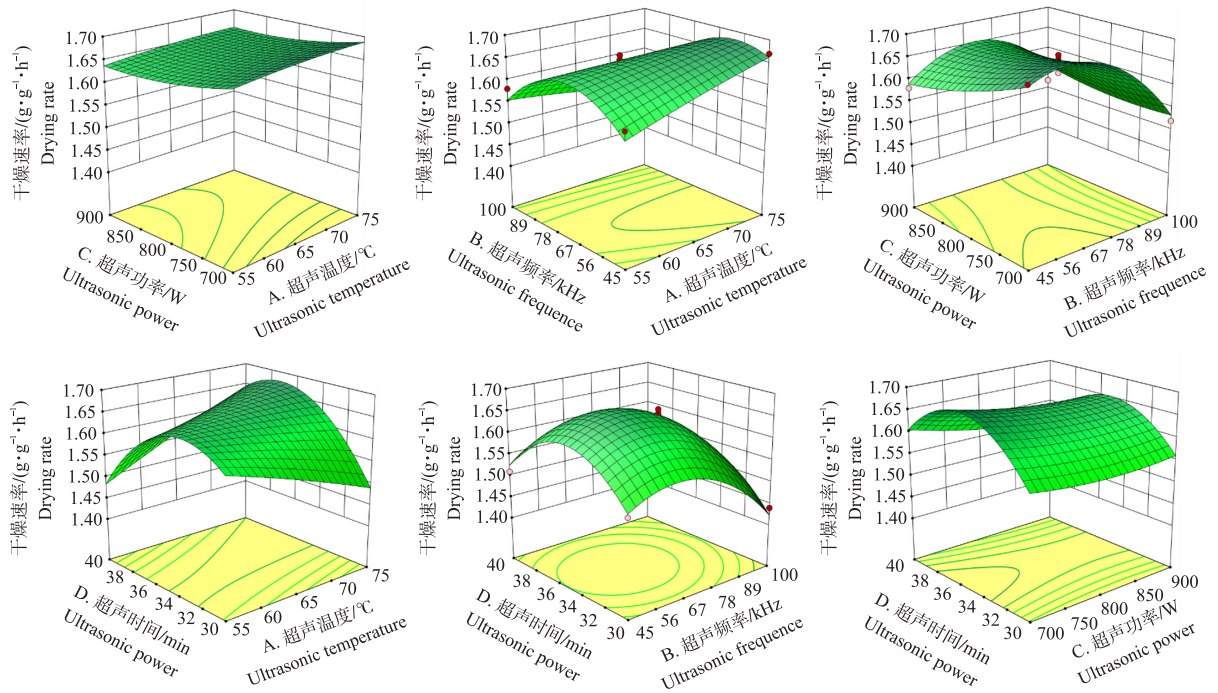


图 9 各因素的交互作用对干燥速率的影响

Fig. 9 Effect of the interaction of various factors on drying rate

由表 10 和图 10 可知:超声条件之间的交互作用对蓝莓花青素含量的影响不显著。花青素含量随超声频率的增加先减小后增加,随超声温度的增加而减小;随超声功率的增加先减小后增加,随超声温度的增加而减小。

由表 10 和图 11 可知:超声条件之间的交互作用对蓝莓脆性的影响不显著。蓝莓脆性随超声频率的

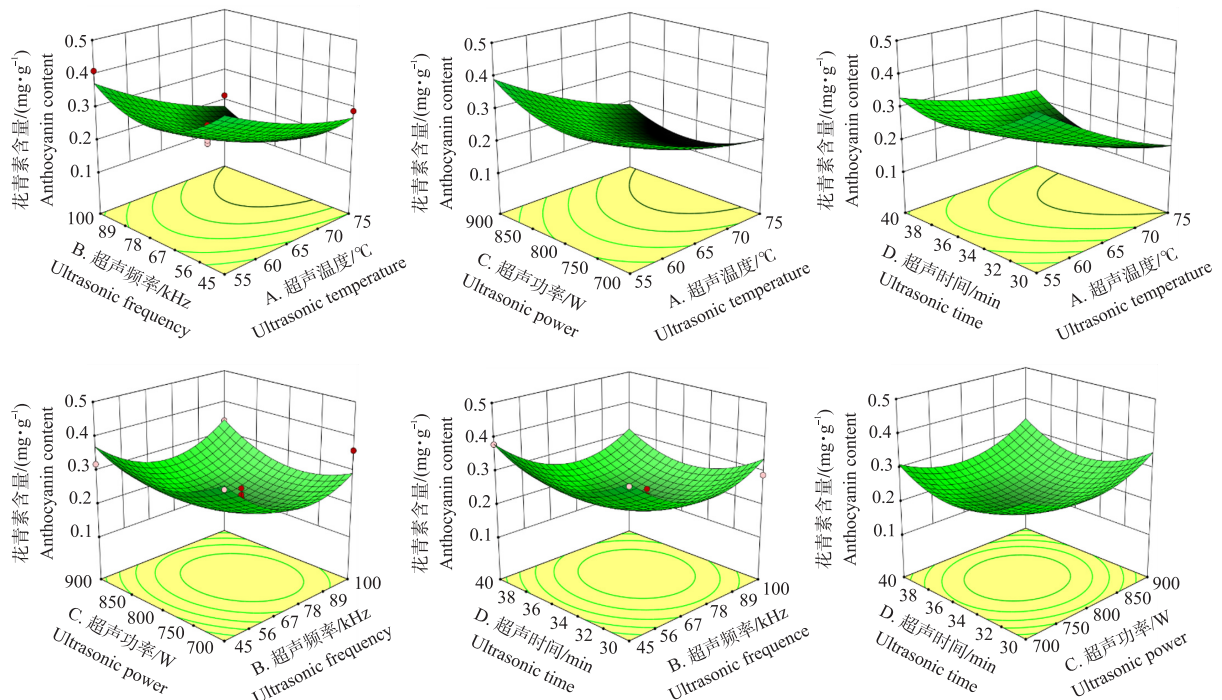


图 10 各因素交互作用对花青素含量的影响

Fig. 10 Effect of the interaction of various factors on anthocyanin content

增加先减小后增加,随超声温度的增加先减小后增加;随超声功率的增加先减小后增加,随超声温度的增加先减小后增加。

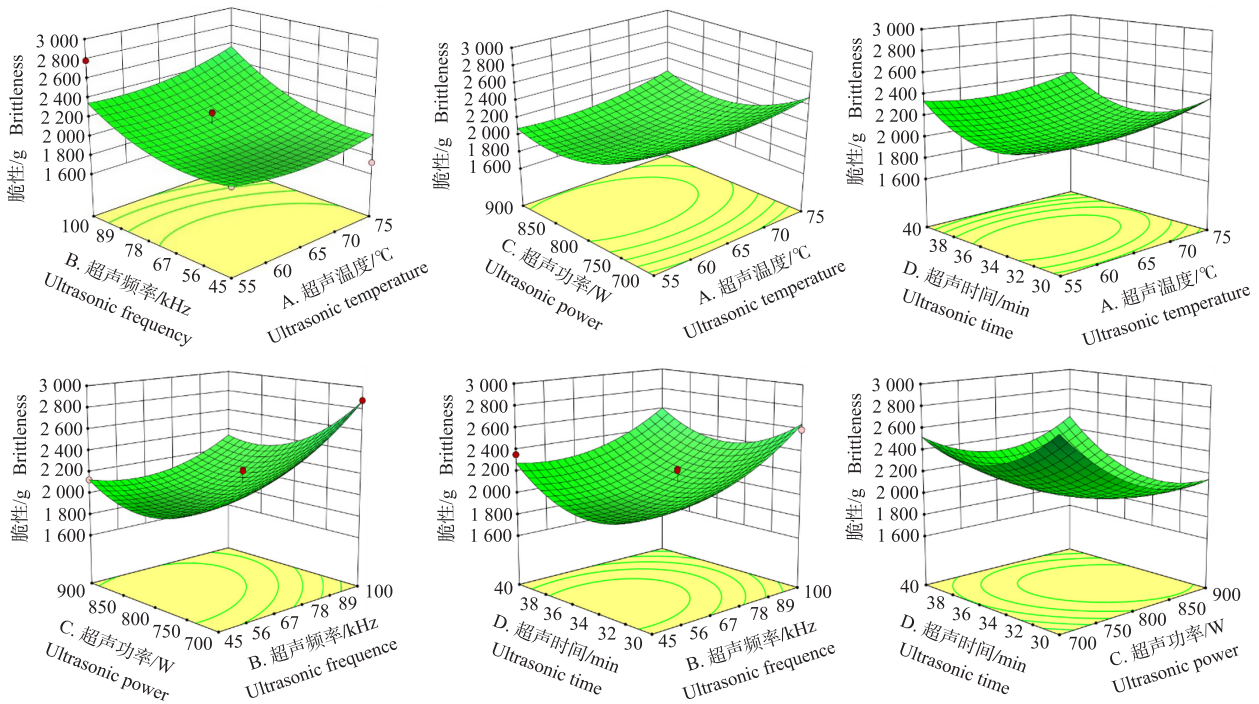


图 11 各因素交互作用对蓝莓脆性的影响

Fig. 11 Effect of the interaction of various factors on brittleness of blueberry

由表 10 和图 12 可知:超声条件之间的交互作用对蓝莓 ΔE 的影响不显著。蓝莓 ΔE 随超声时间的增加而增加,随超声温度的增加先增加后减小;随超声功率的增加先增加后减小,随超声频率的增加先增加后减小。

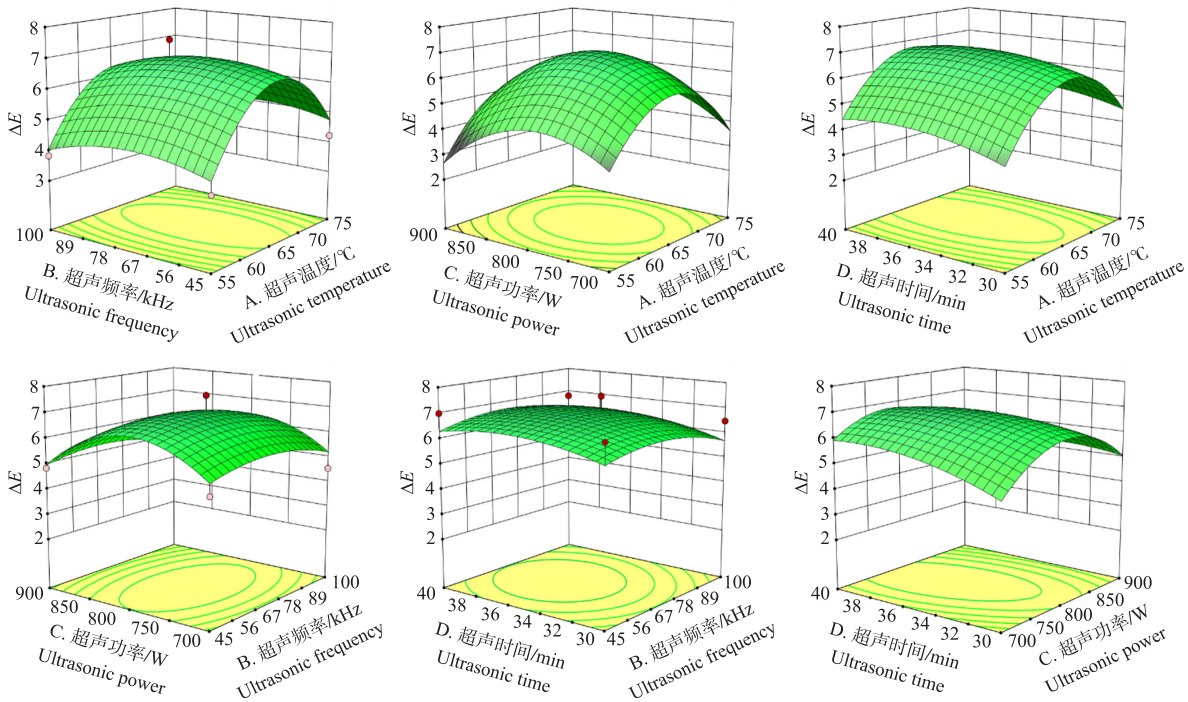


图 12 各因素交互作用对蓝莓 ΔE 的影响

Fig. 12 Effect of the interaction of various factors on ΔE of blueberry

2.7 验证性试验

在优化预处理工艺参数改善果蔬休闲食品干燥效率和干制品品质的试验中,提高其干燥速率和脆性

尤为重要,故本试验选择干燥速率和脆性为蓝莓超声预处理的重要评价指标。根据以上原则,利用软件以干燥速率、花青素、脆性最大值, ΔE 值最小值为标准,获得超声处理蓝莓最佳条件的理论值:超声温度 55℃,频率 73.83 kHz,功率 700 W,时间 30.03 min,结合实际生产应用,最终确定蓝莓超声预处理工艺参数:超声温度 55℃,频率 80 kHz,功率 700 W,时间 30 min,验证试验得到的结果如表 11 所示。验证值的干燥速率和脆性与预测值较相近,但花青素含量和 ΔE 值与预测值相差较大,考虑到果蔬不同样品之间的差异性,认为该回归模型能够较好预测和分析超声条件与蓝莓干燥速率及品质的关系。未经超声处理的蓝莓样品干燥速率为 $(1.19 \pm 0.05) \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,经响应面优化条件得到蓝莓样品,干燥速率提高 42.02%,而花青素保留率达 92.21%,维生素 C 保留率达 72.15%,表明超声预处理显著改善蓝莓真空冷冻干燥速率和品质。

表 11 验证回归模型数据

Table 11 Validate regression model data

项目 Item	温度/℃ Temperature	频率/kHz Frequency	功率/W Power	时间/min Time	干燥速率/ $(\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ Drying rate	花青素含量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ Anthocyanin content	脆性/g Brittleness	ΔE
理论值 Theoretical value	55.00	73.83	700.00	30.03	1.62	0.46	2 832.62	2.56
验证值 Validation value	55.00	80.00	700.00	30.00	1.69	0.55	2 770.00	6.16

3 讨论

本研究表明,蓝莓真空冷冻干燥速率随超声预处理温度的增加先升高后降低,这是因为高温的烫漂作用可软化蓝莓细胞组织,增加细胞膜的通透性,提高干燥速率,但温度过高会导致蓝莓内容物溢出,阻碍其干燥过程中的水分扩散^[20]。蓝莓的干燥速率随超声频率的增加而减小,低频超声作用下,空化效应产生的气泡数量少但尺寸大,能够增加其超声强度,从而提高蓝莓的干燥速率^[21]。本研究中,超声功率为 800 W 时蓝莓的干燥速率最大,原因是随超声功率的增加其产生的机械波增多,对蓝莓内部细胞的破坏性越大,当超过一定功率后,蓝莓表皮出现破损,形态发生变化,干燥速率降低^[22]。本研究中,超声时间为 30 min 时蓝莓的干燥速率最大,在一定时间范围内,随超声处理时间的增加蓝莓真空冷冻干燥速率逐渐升高,但作用时间过长会导致果蔬内部组织严重损坏,从而延长其干燥时间^[23]。

本研究中,蓝莓脆性在超声温度为 65℃ 时最大,因为适宜的超声温度能够减小高温对蓝莓整体形态的破坏,使其内部结构疏松,脆性增加^[24]。脆性随着频率的增加而增加,这是由于低频率超声波作用于样品会产生较大的内爆和剪切力,空化区域温度和压力升高,对细胞内部结构的破坏过大,导致其脆性减小^[25]。蓝莓脆性随超声功率和时间的增加先增加后减小,在一定范围内,超声功率越大,时间越长,其作用于物料产生的海绵效应越强,超声强度越大,在蓝莓内部形成微通道,增加其脆性,但超声强度过大,会导致蓝莓原有形态发生变化,脆性减小^[26]。

花青素和维生素 C 不稳定,容易降解,易受温度、pH、氧气、光、酶等影响^[27]。本研究中,55℃ 时蓝莓的花青素和维生素 C 的保留率最高,这与 Agcam 等^[28]的研究结果一致。随超声频率的增加,花青素保留率先增加后减小,维生素 C 和抗氧化活性保留率增加,低频超声能够与物料发生共振,从而降低物料中营养成分的含量。蓝莓的营养成分保留率在超声功率为 700 W 时最大,之后随超声功率的增加而减小,在超声时间为 30 min 时,蓝莓的花青素和维生素 C 保留率最高,超声强度随着超声功率和时间的增加而增加,强度过大会使细胞受损严重,造成营养成分的流失,而适宜的超声功率和处理时间可以较好保留蓝莓中的营养成分^[29-31]。

综上,本研究单因素试验表明,超声温度、频率、功率和时间对蓝莓的干燥特性及品质有显著性影响。以干燥速率、花青素含量、脆性和总色差 ΔE 值为指标进行四因素三水平响应面优化试验,试验结果表明:超声温度对蓝莓花青素含量的影响极显著;超声频率对蓝莓干燥速率、花青素含量和脆性的影响显著;超声功率对蓝莓脆性的影响显著;超声条件对蓝莓 ΔE 值的影响均不显著;4 个指标的回归方程均能较好表示超声条件对其的影响。响应面优化试验获得的蓝莓连续式超声预处理的优化工艺条件:超声温度 55℃,频率 80 kHz,功率 700 W,时间 30 min,干燥速率 $1.69 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,花青素含量 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,脆性 2 770.00 g, ΔE 值 6.16,考虑不同批次之间样品营养成分和色泽差异较大的因素,此验证值与理论值相近,表明优化试验结果可靠。

参考文献 References:

- [1] 李殿鑫,戴远威,陈伟,等. 蓝莓的营养价值及保健功能研究进展[J]. 农产品加工,2018(4):69-70,74.
Li D X,Dai Y W,Chen W,et al. Research progress on nutritional value and health function of blueberry[J]. Farm Products Processing,2018(4):69-70,74(in Chinese with English abstract).
- [2] 李亚东,盖禹含,王芳,等. 2021 年全球蓝莓产业数据报告[J]. 吉林农业大学学报,2022,44(1):1-12.
Li Y D,Gai Y H,Wang F,et al. Global blueberry industry report 2021[J]. Journal of Jilin Agricultural University,2022,44(1):1-12(in Chinese with English abstract).
- [3] Kim J G,Kim H L,Kim S J,et al. Fruit quality, anthocyanin and total phenolic contents, and antioxidant activities of 45 blueberry cultivars grown in Suwon,Korea[J]. Journal of Zhejiang University:SCIENCE B(Biomedicine & Biotechnology),2013,14(9):793-799.
- [4] 林玲娜. 蓝莓贮藏保鲜技术研究综述[J]. 甘肃农业科技,2018(6):81-87.
Lin L N. Research advances in storage and fresh-keeping technology of blueberry[J]. Gansu Agricultural Science and Technology,2018(6):81-87(in Chinese with English abstract).
- [5] 毕金峰,冯舒涵,金鑫,等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. 核农学报,2022,36(2):414-421.
Bi J F,Feng S H,Jin X,et al. Current status and development trend of freeze drying technology and industry[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2022,36(2):414-421(in Chinese with English abstract).
- [6] Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods;a review[J]. Journal of Food Engineering,2001,49(4):311-319.
- [7] 王静,张卫卫,石勇,等. 真空冷冻干燥技术对食品品质的影响[J]. 农产品加工,2018(1):36-38,42.
Wang J,Zhang W W,Shi Y,et al. The effect of vacuum freeze-drying technology on food quality[J]. Farm Products Processing,2018(1):36-38,42(in Chinese with English abstract).
- [8] 王涛. 真空冷冻干燥技术在果蔬中的应用与发展[J]. 中国果菜,2021,41(6):47-50.
Wang T. Application and development of vacuum freeze-drying technology in fruits and vegetables[J]. China Fruit & Vegetable,2021,41(6):47-50(in Chinese with English abstract).
- [9] Naik A S,Suryawanshi D,Kumar M,et al. Ultrasonic treatment:a cohort review on bioactive compounds, allergens and physico-chemical properties of food[J]. Current Research in Food Science,2021,4:470-477.
- [10] Yilmaz B,Cakmak H,Tavman S. Ultrasonic pretreatment of carrot slices:effects of sonication source on drying kinetics and product quality[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciencias,2019,91(3):e20180447.
- [11] Santacatalina J V,Contreras M,Simal S,et al. Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple[J]. Ultrasonics Sonochemistry,2016,28:100-109.
- [12] Fan D C,Chitrakar B,Ju R H,et al. Effect of ultrasonic pretreatment on the properties of freeze-dried carrot slices by traditional and infrared freeze-drying technologies[J]. Drying Technology,2021,39(9):1176-1183.
- [13] Soquetta M B,Schmaltz S,Righes F W,et al. Effects of pretreatment ultrasound bath and ultrasonic probe, in osmotic dehydration, in the kinetics of oven drying and the physicochemical properties of beet snacks[J]. Journal of Food Processing and Preservation,2018,42(1):e13393.
- [14] Liu W C,Zhang M,Mujumdar A S,et al. Effects of chitosan coating on freeze-drying of blueberry enhanced by ultrasound pre-treatment in sodium bicarbonate medium[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2021,181:631-643.
- [15] 李原,毕金峰,马有川,等. 打孔和划痕预处理对蓝莓粒真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. 食品科学技术学报,2023,41(2):175-186.
Li Y,Bi J F,Ma Y C,et al. Effects of punching and cutting epidermis pretreatment on freeze drying characteristics and qualities of blueberry[J]. Journal of Food Science and Technology,2023,41(2):175-186(in Chinese with English abstract).
- [16] 范东翠,张彪,王玉川,等. 不同预处理对甜玉米粒干燥品质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2014,33(11):1154-1159.
Fan D C,Zhang M,Wang Y C,et al. Effects of different pretreatments on the quality of dried sweet corn kernels[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2014,33(11):1154-1159(in Chinese with English abstract).
- [17] 李颖畅. 蓝莓花色苷提取纯化及生理功能研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2008.
Li Y C. Study on extraction, purification and functional characteristic of blueberry anthocyanins[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2008(in Chinese with English abstract).
- [18] 宋泽君,李培培,袁斓方,等. 土壤含水率对蓝莓叶片生理及果实品质的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(3):147-156.
Song Z J,Li P P,Yuan L F,et al. Effects of soil water content on leaf physiology and fruit quality of blueberry[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2023,47(3):147-156(in Chinese with English abstract).
- [19] 李媛媛,李灵犀,崔艳,等. 微型 DPPH、ABTS 和 FRAP 法动态监测从红酒中分离得到的不同种类多酚化合物的抗氧化活性[J]. 现代食品科技,2017,33(8):130-140.
Li Y Y,Li L X,Cui Y,et al. A micro-model of DPPH, ABTS and FRAP for dynamic monitoring of the antioxidant activity of different types of polyphenols isolated from red wine[J]. Modern Food Science and Technology,2017,33(8):130-140(in Chinese with English abstract).
- [20] 袁越锦,洪晨,徐英英,等. 组合干燥方式下胡萝卜真空脉动蒸汽烫漂工艺优化[J]. 浙江农业学报,2022,34(1):163-172.

- Yuan Y J, Hong C, Xu Y Y, et al. Optimization of carrot vacuum pulsating steam blanching process under combined drying method[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2022, 34(1):163–172 (in Chinese with English abstract).
- [21] Madalão M C M, Lima E M F, Benincá D B, et al. Extraction of bioactive compounds from juçara pulp (*Euterpe edulis* M.) is affected by ultrasonic power and temperature[J]. *Ciência e Agrotecnologia*, 2021, 45:e024820.
- [22] Zhang J Y, Liu Y H, Sun Z K, et al. Drying characteristics and optimization of ultrasound-strengthened cold air drying combined with sequential far-infrared radiation drying on potato[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(9):e14632.
- [23] Fijalkowska A, Nowacka M, Witrowa-Rajchert D. The physical, optical and reconstitution properties of apples subjected to ultrasound before drying[J]. *Italian Journal of Food Science*, 2017, 29(2):343–356.
- [24] Nowacka M, Dadan M, Tylewicz U. Current applications of ultrasound in fruit and vegetables osmotic dehydration processes[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(3):1269.
- [25] Machado A P D F, Sumere B R, Mekar C, et al. Extraction of polyphenols and antioxidants from pomegranate peel using ultrasound; influence of temperature, frequency and operation mode[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(9):2792–2801.
- [26] Brncic M, Karlovic S, Rimac S, et al. Textural properties of infrared dried apple slices as affected by high power ultrasound pre-treatment[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, 9(41):6907–6915.
- [27] Cavalcanti R N, Santos D T, Meireles M A A. Non-thermal stabilization mechanisms of anthocyanins in model and food systems: an overview[J]. *Food Research International*, 2011, 44(2):499–509.
- [28] Agcam E, Akyıldız A, Balasubramaniam V M. Optimization of anthocyanins extraction from black carrot pomace with thermosonication[J]. *Food Chemistry*, 2017, 237:461–470.
- [29] Ratti C, Araya-Farias M, Mendez-Lagunas L, et al. Drying of garlic (*Allium sativum*) and its effect on allicin retention[J]. *Drying Technology*, 2007, 25(2):349–356.
- [30] Rodríguez ó, Eim V, Rosselló 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*, 2018, 98(5):1660–1673.
- [31] 李娜, 李瑜. 利用低场核磁共振技术分析冬瓜真空干燥过程中的内部水分变化[J]. *食品科学*, 2016, 37(23):84–88.
- Li N, Li Y. Analysis of internal moisture changes of *Benincasa hispida* during vacuum drying using low-field NMR[J]. *Food Science*, 2016, 37(23):84–88 (in Chinese with English abstract).

责任编辑: 范雪梅