

刘晨, 刘安军, 马艳弘, 等. 蓝莓酒渣花色苷的超声波辅助提取工艺及抗氧化活性[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(1): 242–247.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.082

蓝莓酒渣花色苷的超声波辅助提取工艺及抗氧化活性

刘晨^{1,2}, 刘安军², 马艳弘¹, 郑捷², 黄开红¹, 李亚辉¹

(1. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014; 2. 天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

摘要:研究蓝莓酒渣中花色苷的超声波辅助提取工艺及花色苷的抗氧化活性, 在单因素试验基础上, 通过响应面分析法优化超声波辅助提取工艺, 建立了花色苷提取的二次项数学模型, 测定了其抗 DPPH 自由基、超氧阴离子自由基、羟自由基的能力。结果表明: 蓝莓酒渣花色苷的最佳提取条件为超声时间 50 min、液料比 33 mL : 1 g、提取温度 65 ℃, 在此条件下, 蓝莓酒渣花色苷的提取率为 6.092 mg/g, 所提酒渣花色苷具有较好的抗氧化活性, 0.16 mg/mL 花色苷提取液对 DPPH 自由基的清除率达 81.7%, 抗超氧阴离子自由基能力达 220.89 U/L, 对羟自由基的抑制率为 82.40%。

关键词: 蓝莓酒渣; 花色苷; 超声波辅助; 提取工艺; 抗氧化活性

中图分类号: Q946.91⁺9; O657.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)01-0242-05

蓝莓为杜鹃花科越橘属 (*Vaccinium* spp.) 植物, 是 21 世纪的功能性保健浆果, 被联合国粮农组织 (FAO) 列为人类五大健康食品之一, 富含花青素、黄烷醇、酚酸等多种活性物质^[1-3], 有抗氧化、抗炎、抗癌、护肝、抗衰老、软化血管、保护视力、增强人体免疫力等多种药理保健功效^[4-8], 具有极高的经济价值和开发前景。蓝莓花青素 (anthocyanins) 是蓝莓药理活性的主要物质基础, 属黄酮类化合物, 常以半乳糖苷、葡萄糖苷、阿拉伯糖苷、芸香糖苷等花色苷形式存在^[9-10]。

随着消费者对蓝莓营养保健功能认识的增强, 蓝莓汁、蓝莓酱、蓝莓酒等相关产品风靡世界, 其中蓝莓酒由于具有营养丰富、酒体醇厚、色泽艳丽、口味绵长、香气宜人等特点而备受消费者推崇。但是在蓝莓酒酿造过程中产生的大量酒渣却并未得到充分利用, 而研究认为, 蓝莓酒渣中仍含有大量花色苷, 利用合理的方法提取蓝莓酒渣中的花色苷、提高蓝莓酒渣资源的综合利用率是当前加速蓝莓产业发展的重要途径之一。

国内外许多学者对花色苷的提取方法做了大量研究, 采用的方法主要有溶剂萃取法、酶法辅助法、微波辅助法等^[11-13]。借助超声波进行辅助提取是近年来色素提取研究中发展的新技术, 这种方法可有效破碎植物细胞壁, 具有色素溶出快、提取时间短、萃取效率高等优点^[14-19]。众多的研究主要集中在蓝莓果实中花色苷的分离提取, 而对于蓝莓酒渣中花色苷的高效提取技术还鲜见报道, 因此本试验利用超声波辅助提取法, 通过响应面分析法对提取条件进行优化, 并探

讨其抗氧化活性, 以期为提高蓝莓酒渣综合利用率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蓝莓酒渣, 由江苏省句容市万山红遍生物科技有限公司提供; 25% 蓝莓花色苷标准品, 陕西森弗天然制品有限公司; DPPH, 上海源叶生物科技有限公司; 羟自由基测定试剂盒、抗超氧阴离子自由基测定试剂盒, 南京建成生物工程研究所; 无水乙醇、柠檬酸、盐酸、氯化钾、醋酸钠等均为分析纯试剂。

1.2 仪器设备

DHG-9070 电热鼓风干燥箱, 上海齐欣科学仪器有限公司; HJ-6A 多头磁力搅拌器, 常州国华仪器有限公司; KH-500E 超声波清洗器, 昆山禾创超声仪器有限公司; D-B 分光光度计, 上海奥析科学仪器有限公司; pH 计, 梅特勒-托利多仪器有限公司; RE-5220 型旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂; ZD-F12 真空冷冻干燥机, 南京载智自动化设备有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 蓝莓酒渣花色苷超声提取工艺 将蓝莓酒渣平铺于鼓风干燥箱内, 于 45 ℃ 烘干至恒重, 用高速粉碎机粉碎后过 80 目筛。取干粉按一定比例加入柠檬酸酸化的 70% 乙醇溶液 (体积含量, pH 值为 3), 浸泡 10 min 后置于超声波清洗器中进行不同时间的超声处理。然后置于不同温度磁力搅拌器中避光提取 1 h, 抽滤, 回收滤渣, 加入同体积提取液, 在相同温度下再提取 1 次, 合并 2 次上清液, 50 ℃ 旋转蒸发后, 选用 AB-8 大孔树脂进行纯化^[20], 流速 2 mL/min, 待回收液吸光度值达上样提取液吸光度值 10% 时停止上样。用蒸馏水洗去树脂未吸附杂质, 并采用考马斯法和硫酸苯酚法分别测定回收液中蛋白质含量和还原糖含量, 当二者无检出时, 用柠檬酸酸化的 70% 乙醇溶液 (体积含量, pH 值为 3) 进行洗脱。收集洗脱液于 50 ℃ 旋转蒸发浓缩, 冷冻干燥, 真空包装后于

收稿日期: 2014-08-29

基金项目: 江苏省自然科学基金 (编号: BK2012786); 南京市生物农业项目。

作者简介: 刘晨 (1990—), 女, 山东乐陵人, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工及贮藏工程。E-mail: jgee39@sina.com。

通信作者: 马艳弘, 博士, 副研究员, 主要从事发酵食品与副产物综合利用研究。Tel: (025) 84391287; E-mail: ma_yhyhy@126.com。

4 ℃ 避光贮藏备用。

1.3.2 蓝莓酒渣花色苷提取率的测定 采用 pH 示差法^[21]测定花色苷含量。准确吸取 1 mL 待测提取液于具塞试管中,再分别加入 4 mL pH 值为 1.0、4.5 的缓冲液,避光条件下放置 60 min 达平衡,利用分光光度计分别测量 520、700 nm 处的吸光度值。

提取液花色苷含量计算公式:

$$C = \frac{D \times M \times n \times V}{\epsilon \times l \times m} \times 1\,000;$$

$$D D = [(D_{520\text{ nm, pH值1.0}} - D_{700\text{ nm, pH值1.0}}) - (D_{520\text{ nm, pH值4.5}} - D_{700\text{ nm, pH值4.5}})]$$

表 1 蓝莓酒渣花色苷提取单因素试验设计

因素	水平	其他提取条件
超声时间	10、20、30、40、50、60 min	液料比 20 mL : 1 g, 提取温度 50 ℃, 提取 1 h, 提取 2 次
液料比	5 mL : 1 g、10 mL : 1 g、20 mL : 1 g、30 mL : 1 g、40 mL : 1 g、50 mL : 1 g	超声时间 30 min, 提取温度 50 ℃, 提取 1 h, 提取 2 次
提取温度	30、40、50、60、70、80 ℃	超声时间 30 min, 液料比 20 mL : 1 g, 提取 1 h, 提取 2 次

以上试验均进行 2 次平行试验,结果取平均值。

1.3.4 Box - Behnken 试验设计及响应面分析 根据单因素试验结果,采用 Box - Behnken 设计方案,以超声时间 A、液料比 B、提取温度 C 为考察因素,以花色苷提取率为响应值,利用 Design - Expert8. 0. 5b 软件优化蓝莓酒渣花色苷提取工艺。试验因素水平编码见表 2。

表 2 Box - Behnken 试验因素水平编码

水平因素	因素		
	A:超声时间 (min)	B:液料比 (mL : g)	C:提取温度 (℃)
- 1	40	20 : 1	50
0	50	30 : 1	60
1	60	40 : 1	70

1.3.5 蓝莓酒渣花色苷抗氧化活性检测^[22-23]

1.3.5.1 DPPH 自由基清除能力测定 配置 0. 01、0. 02、0. 04、0. 08、0. 16 mg/mL 的蓝莓酒渣花色苷溶液,各取 2 mL 于具塞试管中,每管加入 2 mL 2 × 10⁻⁴ mol/L DPPH 溶液,摇匀后避光放置 30 min。以同浓度维生素 C 和 25% 蓝莓花色苷标准品为阳性对照,分别测定 517 nm 处的吸光度 D_{517 nm}。

$$\text{DPPH} \cdot \text{清除率} = [1 - (D_{517\text{ nm}(i)} - D_{517\text{ nm}(j)}) / D_{517\text{ nm}(o)}] \times 100\%。$$

式中:D_{517 nm(i)}、D_{517 nm(j)}、D_{517 nm(o)} 分别为测定条件为 2 mL 样品溶液 + 2 mL DPPH 溶液、2 mL 样品溶液 + 2 mL 无水乙醇、2 mL DPPH 溶液 + 2 mL 无水乙醇的吸光度。

1.3.5.2 抗超氧阴离子自由基能力测定 配制 0. 01、0. 02、0. 04、0. 08、0. 16 mg/mL 的样品溶液,按试剂盒说明书操作,取同浓度维生素 C 溶液和 25% 蓝莓花色苷标准品溶液作对照,无水乙醇作空白对照。超氧阴离子自由基清除能力计算公式如下:

$$\text{抗超氧阴离子活力单位 (U/L)} = (D_{550\text{ nm}(\text{对照组})} - D_{550\text{ nm}(\text{试验组})}) / (D_{550\text{ nm}(\text{对照组})} - D_{550\text{ nm}(\text{标准组})}) \times \text{标准品浓度 (mg/mL)} \times 1\,000\text{ mL}。$$

1.3.5.3 清除羟自由基能力的测定 分别取 0. 01、0. 02、

式中:C 为花色苷含量,mg/g;V 为提取液总体积,mL;n 为稀释倍数;M 为矢车菊色素 - 3 - 葡萄糖苷的相对分子质量,449. 2;ε 为矢车菊色素 - 3 - 葡萄糖苷的消光系数,26 900;m 为样品质量,g;l 为光程,1 cm。

实际测定后,将计算结果换算为 1 g 蓝莓酒渣中含有花色苷的质量(mg)。

1.3.3 单因素试验设计 以蓝莓酒渣花色苷提取率为考察目标,以柠檬酸酸化的 70% 乙醇溶液(体积含量,pH 值为 3)为提取液,在超声功率 500 W 的条件下,考察不同超声时间、液料比、提取时间对花色苷提取率的影响,提取条件的单因素设计见表 1。

0. 04、0. 08、0. 16 mg/mL 样品溶液,按试剂盒说明书操作,其呈色与 OH· 的多少成正比关系,即吸光度越小,样品对羟自由基的清除能力越强。取同浓度维生素 C 溶液和 25% 蓝莓花青素标准品溶液作阳性对照,以无水乙醇作空白对照。羟自由基抑制能力计算公式如下:

$$\text{抑制率} = (D_{\text{对照组}} - D_{\text{试验组}}) / D_{\text{对照组}} \times 100\%。$$

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 超声时间对蓝莓酒渣花色苷提取率的影响 如图 1 所示,随超声时间的延长,蓝莓酒渣花色苷提取率逐渐增大,当提取时间超过 50 min 以后,提取率基本趋于稳定。这可能是因为当时间达 50 min 时,在超声作用下酒渣基本完全破壁,继续延长超声时间反而会使部分花色苷分解,因此,50 min 为适宜的超声时间。

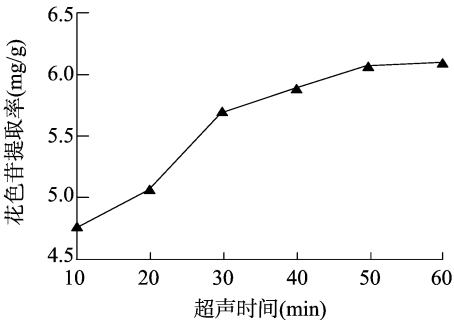


图1 超声时间对蓝莓酒渣花色苷提取率的影响

2.1.2 液料比对蓝莓酒渣花色苷提取率的影响 如图 2 所示,在液料比 30 mL : 1 g 以内,随液料比逐渐增大,花色苷提取率逐渐增加;当液料比达 30 mL : 1 g 后,继续增大提取溶剂量,提取率增加极其缓慢。结果说明,增加溶剂量会增大花色苷扩散速度,使提取速度加快,但过量的提取溶剂会导致物料吸收的超声能减少、花色苷溶出不充分,而且过高溶剂量既增加了成本,又加重了后续浓缩负担,因此综合考虑可以确定 30 mL : 1 g 为最佳液料比。

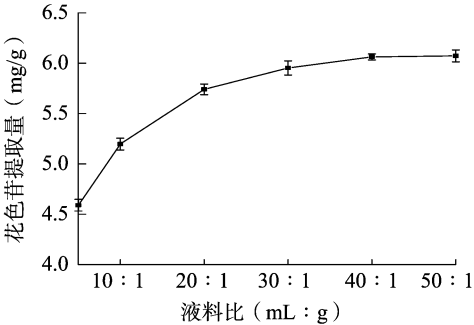


图2 液料比对蓝莓酒渣花色苷提取率的影响

2.1.3 提取温度对蓝莓酒渣花色苷提取率的影响 如图 3 所示,提取温度低于 60 ℃时,随着提取温度的增加,花色苷的提取率逐渐增大;60 ~ 70 ℃之间,花色苷提取率相对平稳;超过 70 ℃后,花色苷提取率反而下降。这是因为花色苷的溶解度会随温度升高而提高,但温度过高会使少部分花色苷结构发生变化,使得提取率下降,因此综合比较可选 60 ℃为蓝莓酒渣花色苷适宜的提取温度。

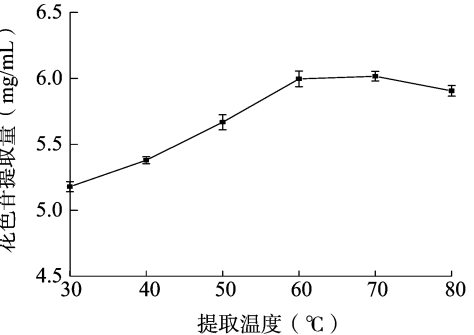


图3 提取温度对蓝莓酒渣花色苷提取率的影响

2.2 响应面试验设计与结果

2.2.1 回归模型建立及方差分析 采用 Box - Behnken 设计方案,以提取率为响应值,优化蓝莓酒渣花色苷提取工艺。试验设计与结果见表 3,其中实测值为 3 次平行试验结果的平均值。

应用 Design Expert8.0.5b 软件对试验结果进行多元回归

表 3 响应面试验设计及结果

序号	A:超声时间 (min)	B:液料比 (mL : g)	C:提取温 度(℃)	提取率(mg/g)	
				实测值	预测值
1	0	-1	1	5.835	5.85
2	0	1	-1	5.983	5.97
3	-1	0	-1	5.795	5.8
4	-1	1	0	5.932	5.95
5	1	0	1	6.102	6.10
6	-1	0	1	5.937	5.94
7	-1	-1	0	5.654	5.64
8	1	-1	0	5.923	5.91
9	0	0	0	6.021	6.01
10	0	0	0	6.032	6.01
11	0	0	0	5.984	6.01
12	0	1	1	6.075	6.06
13	1	0	-1	6.018	6.02
14	1	1	0	6.056	6.07
15	0	-1	-1	5.712	5.72

分析,得到以蓝莓酒渣花色苷提取率为响应值的回归方程为:

花色苷提取率 (mg/g) = 2. 017 42 + 0. 053 071A + 0. 085 525B + 0. 037 237C - 3. 62 500 × 10⁻⁴AC - 1. 450 00 × 10⁻⁴AC - 7. 750 00 × 10⁻⁵BC - 2. 966 67 × 10⁻⁴A² - 9. 141 67 × 10⁻⁴B² - 1. 966 67 × 10⁻⁴C²。

式中:A 为超声时间,min;B 为液料比,mL : g;C 为提取温度,℃。

对模型进行显著性分析,由表 4 可知,回归模型极显著 ($P=0.000\ 2<0.01$),失拟项 ($P=0.645\ 7$) 不显著,实际试验值与预测值具有高度相关性 ($R^2=0.989\ 8,R^2_{Adj}=0.971\ 5$),表明模型与试验值拟合良好^[24],试验方法可信度高,试验得到的 2 次回归方程能够很好地对响应值进行预测。由表 4 还可知,3 个自变量对响应值的影响程度大小依次为液料比(B) > 超声时间(A) > 提取温度(C),其中 3 个因素以及液料比的 2 次项(B^2)对花色苷提取量影响极显著 ($P<0.01$),超声时间和料液比的交互作用(AB)对花色苷提取量影响显著 ($P<0.05$)。

表 4 方差分析结果

参数	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.246 366 017	9	0.027 374 002	54.036 522 82	0.000 2	极显著
A:超声时间	0.076 245 125	1	0.076 245 125	150.508 554	<0.000 1	极显著
B:液料比	0.106 260 5	1	0.106 260 5	209.759 170 9	<0.000 1	极显著
C:提取温度	0.024 310 125	1	0.024 310 125	47.988 402 7	0.001 0	极显著
AB	0.005 256 25	1	0.005 256 25	10.375 8841 9	0.023 4	显著
AC	0.000 841	1	0.000 841	1.660 141 471	0.254 0	
BC	0.000 240 25	1	0.000 240 25	0.474 255 634	0.521 7	
A ²	0.003 249 641	1	0.003 249 641	6.414 820 251	0.052 4	
B ²	0.030 856 641	1	0.030 856 641	60.911 283 49	0.000 6	极显著
C ²	0.001 428 103	1	0.001 428 103	2.819087147	0.154 0	
残差	0.002 532 917	5	0.000 506 583			
失拟项	0.001 268 25	3	0.000 422 75	0.668 555 614	0.645 7	不显著
纯误差	0.001 264 667	2	0.000 632 333			
总和	0.248 898 933	14				
R ²	0.989 8					
R ² _{Adj}	0.971 5					

2.2.2 响应面图分析与优化 图 4 至图 6 反映了几个因素间的交互作用对蓝莓酒渣花色苷提取率的影响。响应曲面图中曲面的陡峭程度可以表明变量对提取率的影响程度, 曲面较陡表明影响较大, 反之则较小; 等高线图反映了因素间交互作用的强弱, 椭圆形表示交互作用显著, 圆形表示交互作用不显著^[24]。由图 4 可见, 超声时间与液料比交互作用的响应面坡度陡, 等高线密集, 说明二者交互作用显著; 同一超声时间下, 随液料比增加, 提取率显著增加; 与之相比, 在同一液料比水平下, 随着超声时间的增加, 提取率增加幅度较缓。由图 5、图 6 看出, 2 个因素间交互作用的响应面坡度缓, 等高线稀疏, 说明二者交互作用不显著, 这一结论与方差分析中 3 个自变量 F 值大小排序所反映的趋势一致。

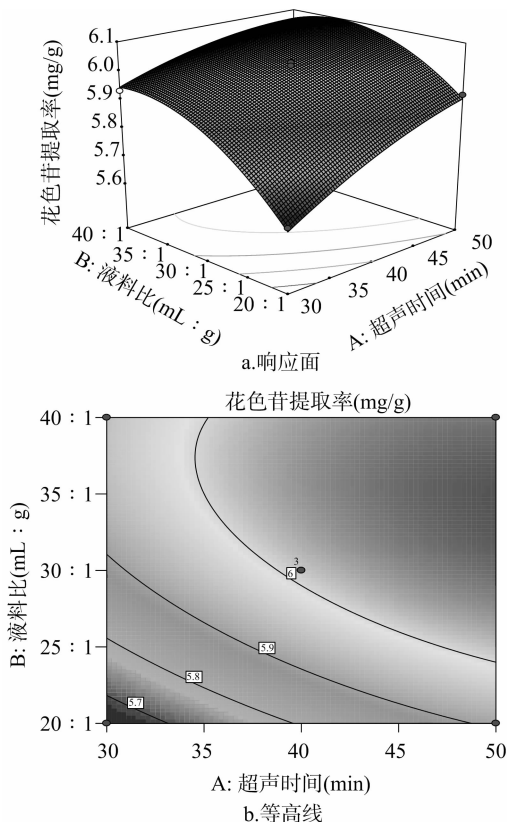


图4 超声功率和料液比和对花色苷提取率的交互作用

2.2.3 最优提取工艺条件及验证试验 通过软件分析得到蓝莓酒渣花色苷超声辅助法最佳提取工艺为: 超声时间 49.96 min、液料比 33.48 mL:1 g、提取温度 65.15 °C, 在此条件下, 蓝莓酒渣花色苷提取率可达 6.110 95 mg/g。为了操作方便, 修正最佳提取工艺条件为: 超声时间 50 min、液料比 33 mL:1 g、提取温度 65 °C。在此条件下, 进行 3 次平行试验, 所得提取率平均值为 6.092 mg/g, 实测值与预测值相对误差仅为 0.31%, 说明该优化设计方案可以较好地预测蓝莓酒渣花色苷提取情况。

2.3 蓝莓酒渣花色苷抗氧化活性分析

2.3.1 DPPH 自由基清除能力 如图 7 所示, 随着溶液浓度的增加, 3 种样品清除 DPPH 自由基能力不断增强, 同浓度条件下, 维生素 C 清除 DPPH 自由基能力高于 25% 蓝莓花色苷标准品和蓝莓酒渣花色苷。当蓝莓花色苷标准品溶液和蓝莓酒渣花色苷溶液浓度为 0.01 ~ 0.02 mg/mL 时, 前者对 DPPH

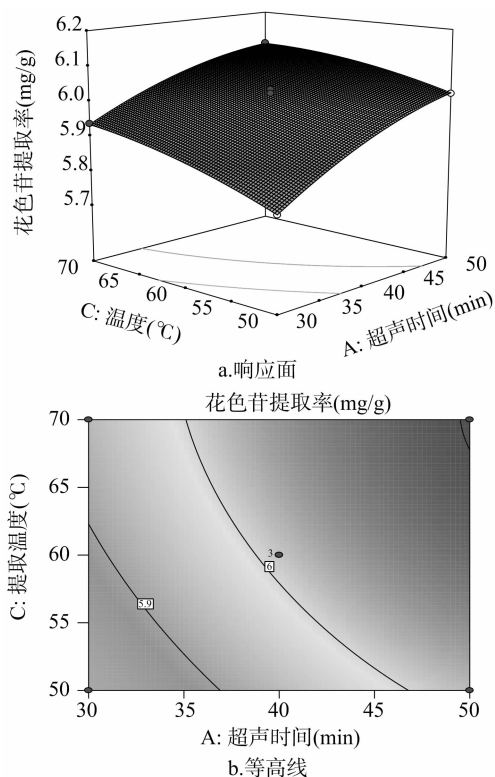


图5 超声时间和料液比和对花色苷提取率的交互作用

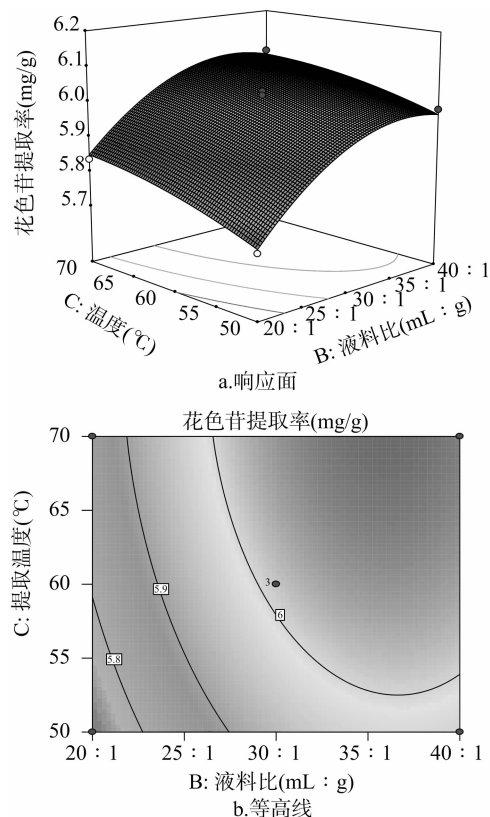


图6 料液比及提取温度对花色苷提取率的交互作用

自由基的清除率高于后者; 随浓度逐渐增大并大于 0.04 mg/mL 后, 前者的清除率低于后者; 当蓝莓酒渣花色苷溶液浓度达 0.08 mg/mL 时, 清除率达 78.59%; 浓度达 0.16 mg/mL 时, 清除率达 81.70%。

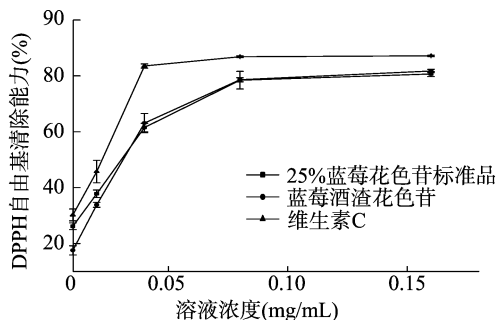


图7 蓝莓酒渣花色苷DPPH自由基清除能力

2.3.2 抗超氧阴离子自由基能力 由图8可见,随着溶液浓度的增加,3种样品抗超氧阴离子自由基能力不断增强;相同浓度条件下,维生素C抗自由基能力高于25%蓝莓花色苷标准品和蓝莓酒渣花色苷。25%蓝莓花色苷标准品抗自由基能力在一定浓度内略高于蓝莓酒渣花色苷,当蓝莓酒渣花色苷溶液浓度达0.16 mg/mL时,抗自由基能力达220.89 U/L。

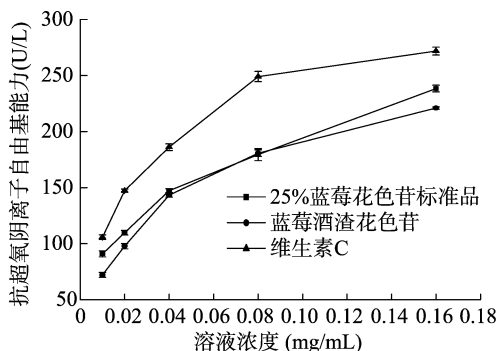


图8 蓝莓酒渣花色苷抗超氧阴离子自由基能力

2.3.3 羟自由基抑制能力 如图9所示,随着3种样品溶液浓度增加,羟自由基抑制率不断提高。同浓度时抗维生素C对羟自由基的抑制能力大于25%蓝莓花色苷标准品、蓝莓酒渣花色苷。当蓝莓花色苷标准品溶液和蓝莓酒渣花色苷溶液浓度为0.01~0.02 mg/mL时,前者自由基抑制率低于后者;随浓度增大为0.04~0.16 mg/mL时,后者自由基清除率低于前者;当蓝莓酒渣花色苷浓度达0.08 mg/mL时,羟自由基清除率达66.54%;浓度达0.16 mg/mL时,羟自由基清除率达82.40%。

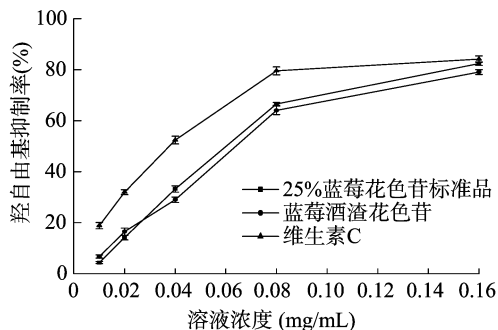


图9 蓝莓酒渣花色苷对羟自由基的抑制情况

综合分析以上3组试验结果可知,蓝莓酒渣花色苷具有较好抗氧化能力,与25%蓝莓花色苷标准品抗氧化能力接近。

3 结论

在单因素试验基础上,通过响应面分析法优化了蓝莓酒渣花色苷最佳提取工艺,建立了可靠的预测模型,得到蓝莓酒渣花色苷最优提取条件为:柠檬酸酸化70%乙醇(体积含量, pH值=3)为提取液,浸泡10 min,液料比33 mL:1 g、超声时间50 min、提取温度65℃、连续提取2次。此条件下蓝莓酒渣花色苷提取率为6.092 mg/g,与理论预测值基本一致。通过DPPH自由基清除能力、抗超氧自由基能力、羟自由基抑制能力测试发现,所提酒渣花色苷具有较强的抗氧化活性,0.16 mg/mL的花色苷提取液对DPPH自由基清除率达81.70%,抗超氧阴离子自由基能力达220.89 U/L,羟自由基抑制率为82.40%。由此可见,超声辅助提取的蓝莓酒渣花色苷得率较高、抗氧化能力较强,既为节能环保、提高蓝莓酒渣资源的利用率提供了很好的思路,又为蓝莓酒渣花色苷工业化生产提供了试验依据。

参考文献:

- [1] 方仲相,胡君艳,江波,等. 蓝莓研究进展[J]. 浙江农林大学学报,2013,30(4):599-606.
- [2] 胡雅馨,李京,惠伯棣. 蓝莓果实中主要营养及花青素成分的研究[J]. 食品科学,2006,27(10):600-603.
- [3] Kong J M, Chia L S, Goh N K, et al. Analysis and biological activities of anthocyanins[J]. Phytochemistry, 2003, 64(5):923-933.
- [4] Wang Li Shu, Stoner G D. Anthocyanins and their role in cancer prevention[J]. Cancer Letters, 2008, 269(2, SI):281-290.
- [5] Wang S Y, Chen H J, Ehlenfeldt M K. Variation in antioxidant enzyme activities and nonenzyme components among cultivars of rabbiteye blueberries (*Vaccinium ashei* Reade) and *V. ashei* derivatives[J]. Food Chemistry, 2011, 129(1):13-20.
- [6] Lacombe A, Wu V C, White J, et al. The antimicrobial properties of the lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium*) fractional components against foodborne pathogens and the conservation of probiotic *Lactobacillus rhamnosus*[J]. Food Microbiology, 2012, 30(1):124-131.
- [7] Prior R L, Wilkes S E, Rogers T R, et al. Purified blueberry anthocyanins and blueberry juice alter development of obesity in mice fed an obesogenic high-fat diet[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(7):3970-3976.
- [8] Yi W G, Akoh C C, Fischer J, et al. Effects of phenolic compounds in blueberries and muscadine grapes on HepG2 cell viability and apoptosis[J]. Food Research International, 2006, 39(5):628-638.
- [9] 李颖畅,马勇,孟宪军,等. 圣云蓝莓花色苷的组成分析[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(8):129-132.
- [10] Kalea A Z, Lamari F N, Theocharis A D, et al. Wild blueberry (*Vaccinium angustifolium*) consumption affects the composition and structure of glycosaminoglycans in Sprague-Dawley rat aorta[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2006, 17(2):109-116.
- [11] 高梓淳,吴涛,陈卫,等. 蓝莓花色苷提取与纯化工艺的研究[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(3):1-5, 18.
- [12] 袁春龙,张金. 纤维素酶和果胶酶对番茄红素提取的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(13):100-104.
- [13] 吕春茂,王新现,董文轩,等. 响应面法优化越橘花色苷微波辅助提取工艺参数[J]. 食品科学, 2011, 32(6):71-75.

江 宁,李丽娟,李大婧,等. 莲藕片热风干燥特性及动力学模型[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):247-250.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.083

莲藕片热风干燥特性及动力学模型

江 宁,李丽娟,李大婧,刘春泉

(江苏省农业科学院农产品加工研究所/国家农业科技华东(江苏)创新中心农产品加工工程技术研究中心,江苏南京 210014)

摘要:为研究莲藕片热风干燥特性,探讨了不同装载量和热风温度对莲藕片薄层热风干燥过程的影响。根据试验数据建立了莲藕片热风干燥水分比与干燥时间关系的动力学模型,并对模型进行拟合,最后计算了莲藕片热风干燥条件下的有效扩散系数。结果表明,莲藕片热风干燥过程符合 Page 模型,经验证,模型预测值与试验值拟合良好;莲藕片热风干燥有效扩散系数在 $0.831 \times 10^{-7} \sim 3.516 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内。Page 模型适用于描述莲藕片热风干燥过程。

关键词:莲藕;热风;干燥特性;动力学模型

中图分类号: TS255.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)01-0247-04

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn),别称荷藕、莲菜等,为睡莲科莲属多年生大型宿根水生草本植物^[1],原产中国和印度,历史悠久,种质资源丰富,以肥嫩根状茎供食用,是我国极重要的水生蔬菜。莲藕含有淀粉、膳食纤维、氨基酸、维生素等多种营养成分,营养丰富,同时又含有少量生物碱、黄酮类、鞣质等功能性成分,具有清热凉血、生津止渴、健脾开胃等药用价值,广受消费者喜爱^[2-3]。莲藕采收后,易氧化褐变、失水干缩以及腐烂变质,不耐贮运,干制可有效延长其贮藏期限,且便于运输。

我国每年有大量的脱水藕片出口日本、韩国、新加坡、菲律宾、美国等国家,而脱水藕片所采用的干燥技术即为热风干燥。热风干燥技术操作简便、成本低廉,国内外的研究报道也较多,段振华等建立了罗非鱼片热风干燥水分比与干燥时间关系的数学模型^[4];诸爱士等分析了瓠瓜的热风干燥特性,

并在此基础上建立其干燥动力学模型^[5];刘坤等研究了红枣的热风干燥特性,并建立了薄层干燥数学模型^[6];Kaleta 等对苹果的热风干燥特性进行了研究,并建立了相应的干燥模型^[7];Doymaz 建立了猕猴桃热风干燥数学模型,并研究其有效扩散系数^[8];Kaleemullah 等研究了红辣椒的薄层热风干燥模型,并计算了有效扩散系数^[9]。

本试验研究了热风干燥对莲藕片干燥特性的影响,并建立了莲藕片热风干燥动力学模型,用以描述莲藕片热风干燥过程中的水分变化,以期对莲藕热风干燥工艺的研究和生产控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

“美人红”莲藕:于 2012 年 5 月由江苏省扬州市宝应县天禾食品有限公司特供。莲藕肉质肥嫩,色泽洁白,无明显机械伤。

1.2 仪器与设备

DHG-9073B5-Ⅲ型电热恒温鼓风干燥箱(上海新苗医疗器械制造有限公司);FA2104 电子分析天平(北京赛多利斯科学仪器有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理

将莲藕洗净、去皮后,用不锈钢刀切分

收稿日期:2014-03-21

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(13)3082]。

作者简介:江 宁(1983—),男,江苏南京人,硕士,助研,从事农产品精深加工研究。Tel: (025) 84391570; E-mail: jn19831109@163.com。

通信作者:刘春泉,硕士,研究员,从事农产品精深加工及产业化开发研究。Tel: (025)84390188; E-mail: liuchunquan2009@163.com。

[14]慕金超,刘春芬. 紫茄皮中花青素的提取研究[J]. 江苏农业科学,2014,42(4):227-229.

[15]姬晓灵,屈爱桃,汪 岭,等. 超声波辅助提取百脉根花色苷工艺[J]. 江苏农业科学,2013,41(11):298-301.

[16]肖军霞,黄国清,迟玉森. 樱桃花色苷的提取及抗氧化活性研究[J]. 中国食品学报,2011,11(5):70-75.

[17]Corrales M, Toepfl S, Butz P, et al. Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: A comparison[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(1): 85-91.

[18]迟海霞,涂宗财,陈 钢,等. 米糠多糖的超声波辅助纤维素酶-柠檬酸联合提取及结构分析[J]. 食品科学,2010,31(24):168-171.

[19]焦 岩,王振宇. 蓝靛果花色苷超声波辅助提取优化及其降血脂作用[J]. 中国食品学报,2010,10(2):52-59.

[20]李颖畅,郑凤娥,孟宪军. 大孔树脂纯化蓝莓果中花色苷的研究[J]. 食品与生物技术学报,2009,28(4):496-500.

[21]宋德群,孟宪军,王晨阳,等. 蓝莓花色苷的 pH 示差法测定[J]. 沈阳农业大学学报,2013,44(2):231-233.

[22]牟建楼,王 颀. 响应面法优化灵芝枣饮料工艺及其抗氧化性研究[J]. 中国食品学报,2013,13(11):21-27.

[23]Li X X, Han L J, Chen L J. In vitro antioxidant activity of protein hydrolysates prepared from corn gluten meal[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(9):1660-1666.

[24]程 丹,傅玉颖,梅 子,等. 响应曲面法优化酵母微胶囊化核桃油工艺[J]. 中国食品学报,2013,13(11):28-34.