

湿法超微粉碎—复合酶法制备蓝莓果汁工艺 优化及其抗氧化活性分析

Optimization of the preparation process and antioxidant activity analysis of blueberry juice by wet ultrafine grinding process and compound enzymolysis method

何婉莹^{1,2} 但利^{1,2} 赵良忠^{1,2} 黄展锐^{1,2} 龙占潜³

HE Wanying^{1,2} DAN Li^{1,2} ZHAO Liangzhong^{1,2} HUANG Zhanrui^{1,2} LONG Zhanqian³

(1. 邵阳学院食品与化学工程学院, 湖南 邵阳 422000; 2. 豆制品加工与安全控制湖南省
重点实验室, 湖南 邵阳 422000; 3. 贵州派森园食品科技有限公司, 贵州 镇远 557700)

(1. College of Food and Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Soybean Products Processing and Safety Control, Shaoyang, Hunan
422000, China; 3. Guizhou Paisenyuan Food Technology Co., Ltd., Zhenyuan, Guizhou 557700, China)

摘要:目的:优化蓝莓果汁制备工艺,提高其抗氧化活性。
方法:采用湿法超微粉碎结合复合酶法制备蓝莓汁,利用
响应面法优化工艺参数并分析蓝莓汁抗氧化活性。**结
果:**不同液料比、粉碎时间、复合酶添加量和酶解时间下
蓝莓汁出汁率及活性物质含量存在显著差异,其中酶解
时间对出汁率和花色苷含量影响最显著;湿法超微粉
碎—复合酶法最优工艺参数为液料比 1 : 1.7 (g/g)、粉碎
时间 8.00 min、复合酶添加量 0.15%、酶解时间 127 min;
在该工艺条件下蓝莓出汁率为 87.89%、花色苷含量为
612.04 mg/L、总黄酮含量 2.96 g/L、总酚含量 3.43 g/L,
样品量为 1.6 mL 时其抗氧化能力与 0.3% 维生素 C 相
当。**结论:**湿法超微粉碎—复合酶法可提高蓝莓汁的出
汁率、最大限度保留其活性物质,使其具有较强抗氧化
能力。

关键词: 蓝莓;湿法超微粉碎;复合酶解;抗氧化

Abstract: Objective: This study aimed to optimize the preparation
process of blueberry juice and improve its antioxidant activity.

Methods: Blueberry juice was prepared using a wet ultrafine

grinding process and compound enzymolysis method. Response
surface methodology was used to optimize the process parameters
and analyze the antioxidant activity of blueberry juice. **Results:**
There were significant differences in the juice yield and active
substance content of blueberry juice under different solid-liquid
ratios, crushing times, compound enzyme contents, and
enzymatic hydrolysis times, with enzymatic hydrolysis time
having the most significant impact on juice yield and anthocyanin
content. The optimal process parameters for the wet ultrafine
grinding process and compound enzymolysis method are solid-
liquid ratio of 1 : 1.7 (g/g), pulverization time of 8.00 min,
compound enzyme content of 0.15%, and enzymatic hydrolysis
time of 127 min. Under the control of these process conditions,
the blueberry juice yield was 87.89%, with the contents of
anthocyanin, total flavonoid and total phenol were 612.04 mg/L,
2.96 g/L and 3.43 g/L, respectively, and its antioxidant capacity
was equivalent to 0.3% vitamin C when the addition amount is
1.6 mL. **Conclusion:** The wet ultrafine grinding process and
compound enzymolysis method can improve the juice yield of
blueberry juice, maximize the retention of its active substances,
and enhance its antioxidant capacity.

Keywords: blueberry; wet ultrafine grinding process; compound
enzymolysis method; antioxidant activity

基金项目:邵阳学院研究生科研创新项目(编号: CX2022SY067);
国家级大学生创新创业训练计划项目(编号:
202110547066);贵州省科技厅科技支撑项目(编号:黔
科合支撑[2021]一般 139)

作者简介:何婉莹,女,邵阳学院在读硕士研究生。

共同第一作者:但利,女,邵阳学院在读本科生。

通信作者:赵良忠(1962—),男,邵阳学院教授,硕士。

E-mail: sys169@163.com

收稿日期:2023-11-21 **改回日期:**2024-04-02

蓝莓,又称越橘、蓝浆、笃斯,属于杜鹃花科越橘属
植物,具有抗氧化、抗衰老、预防心脑血管疾病、改善眼
部血液循环等健康功能^[1-2]。蓝莓中含有丰富的营养

成分,除了一些普通水果都含有的基本营养成分(如多糖、氨基酸、维生素、矿物元素等)外,蓝莓中还含有许多如黄酮、花色苷、尼克酸等其他水果中少见的活性物质^[3-5]。

近年来,中国蓝莓种植产业发展迅速,2021年蓝莓种植面积为6.64万hm²,同比增长10.1%;蓝莓产量为34.72万t,同比增长63.9%^[6-7]。目前,中国蓝莓约60%以鲜果销售为主,但蓝莓果在常温下易腐烂不耐贮藏,制约了蓝莓产业的发展^[7-9]。蓝莓果汁作为中国目前市场上最主要的蓝莓加工品,在品牌数量、消费总量、知名度方面均处于蓝莓加工品的前列^[10-11]。但是,常用提取/制备蓝莓果汁方法(例如:采用破壁机、磨碎机、打浆机、压榨机等方法)存在出汁率低、汁液浑浊、酸涩味严重、营养成分及活性物质易被破坏等技术难点问题。

榨汁是果蔬汁加工中必不可缺的环节,对果蔬汁品质具有一定的影响^[12]。基于微米技术原理的超微粉碎技术利用特殊的机械设备,在相关加工工艺流程的搭配下,对物料进行研磨、冲击,致使物料变成粒径更小的颗粒(10~25 μm),增大了物料的比表面积和孔隙率,有利于物质中的营养成分释放和活性物质的保留^[13-15]。邓凯波等^[16]研究发现南瓜经超微粉碎后,其蛋白质溶解度、多糖含量及可溶性膳食纤维提取率明显提高,且具有较好的自由基清除能力。刘子放等^[17]利用湿法超微粉碎加工新鲜桑果,结果表明桑果浆pH、可溶性固形物、花色苷含量、游离态多酚含量、总黄酮含量均逐渐增大,色度(*L**值、*a**值、*b**值)均先升高再降低。Zhao等^[18]将红葡萄果进行超微粉碎,发现超细粉碎处理可以降低堆积密度、振实密度和流动性,且随着粉末粒径的减小,酚类的主要结构未被破坏。由此可知,使用超微粉碎技术处理果蔬可较好地保护果蔬中的营养成分和维持果蔬良好色泽,已被广泛应用于果蔬汁加工领域。此外,采用粉碎工艺结合复合酶解技术(果胶酶、纤维素酶、半纤维素酶等)制备果汁,不仅能提高果汁出汁率和营养品质,而且能有效抑制果汁褐变^[19-20]。

研究拟以蓝莓为研究对象,基于湿法超微粉碎技术和复合酶解技术(果胶酶和纤维素酶),选取料液比、粉碎时间、复合酶添加量和酶解时间4个因素进行单因素试验,再通过响应面试验方法优化蓝莓汁制备工艺参数条件,并分析探讨蓝莓汁抗氧化活性,以期为制备出高品质、高营养、高抗氧化蓝莓果汁饮料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蓝莓:采自贵州省黔东南州麻江县蓝莓种植基地;
芦丁和没食子酸标准品:纯度≥95%,合肥博美科技

生物有限公司;

ABTS:纯度≥98%,合肥千盛生物科技有限公司;

DPPH:纯度≥90%,合肥千盛生物科技有限公司;

果胶酶:3万U/g,上海源叶生物科技有限公司;

纤维素酶:1万U/g,上海源叶生物科技有限公司;

福林酚、亚硝酸钠、硝酸铝、甲醇、无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

氢氧化钠、碳酸钠、氢氧化钠:分析纯,南京化学试剂股份有限公司。

1.2 仪器与设备

湿法超微粉碎机:QDSJ9000-2型,无锡轻大食品装备有限公司;

可见分光光度计:T-6vm型,南京菲勒仪器有限公司;

电子分析天平:EL204型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 单因素试验设置 分别以料液比[1:1,1:2,1:3,1:4,1:5(g/g)]、粉碎时间(2,4,6,8,10 min)、复合酶($m_{\text{果胶酶}} : m_{\text{纤维素酶}} = 2:1$)添加量(0.05%,0.10%,0.15%,0.20%,0.25%)和酶解时间(60,90,120,150,180 min)为单因素。试验时分别控制料液比1:3(g/g)、粉碎时间6.00 min、复合酶添加量0.15%、酶解时间120 min,在确保其他因素不变的情况下,改变其中一个因素,探究该因素对蓝莓出汁率、花色苷含量、总酚含量和总黄酮含量的影响。

1.3.2 蓝莓汁制作工艺 选取新鲜、成熟度好、无损伤的蓝莓果,清洗后80℃热烫3 min,捞出冷却后按比例加入去离子水,置于湿法超微粉碎机(2.2 kW,9 000 r/min)中粉碎打浆,匀浆液经复合酶酶解后采用200目筛网过滤,收集滤液即为蓝莓果汁。蓝莓果汁样品放置于4℃冰箱中保存备用。

1.3.3 响应面优化试验 在单因素试验结果基础上,选取影响较大的因素进行响应面试验,以蓝莓汁出汁率和花色苷含量为参考指标进行试验优化,每组进行3次重复试验。

1.4 检测方法

1.4.1 蓝莓出汁率 参照朱金艳等^[21]的方法。

1.4.2 蓝莓汁花色苷含量 参照贾鸿冰等^[22]的方法。

1.4.3 蓝莓汁总黄酮含量 采用亚硝酸钠—硝酸铝比色法。量取0,1,2,3,4,5,6 mL芦丁标准溶液(0.2 mg/mL)分别置于25 mL容量瓶中,各加入60%的乙醇10 mL,再向每个容量瓶中加入5 g/100 mL的NaNO₂溶液1 mL摇匀,放置6 min后加入10 g/100 mL的Al(NO₃)₃溶液

1 mL, 放置 6 min, 加入 4% 的 NaOH 溶液 10 mL, 放置 15 min, 蒸馏水定容到 25 mL。取蓝莓汁样液 4 mL, 按上述方法定容至 25 mL。在波长为 510 nm 下测定芦丁标准曲线和蓝莓汁样液吸光度, 并按标准曲线法计算总黄酮含量。

1.4.4 蓝莓汁总酚含量 采用 Folin-Ciocalteu 法。量取 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mL 没食子酸标准溶液 (0.10 mg/mL) 分别置于 10 mL 比色管中, 各加入 2 mL Folin-Ciocalteu 试剂 (稀释 10 倍), 反应 5 min 后加入 1.8 mL 7.5% Na_2CO_3 溶液。然后加蒸馏水定容至 10 mL。常温下避光反应 1~2 h 后, 在 765 nm 处测定吸光度。取蓝莓汁样液 0.4 mL, 按上述方法定容至 10 mL。在波长为 765 nm 下测定芦丁标准曲线和蓝莓汁样液吸光度, 并按标准曲线法计算总酚含量。

1.4.5 蓝莓汁抗氧化活性测定 以 0.3% 维生素 C (V_C) 溶液为阳性对照, 参照程宏桢等^[23] 的方法测定蓝莓果汁的 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率和羟自由基清除率。

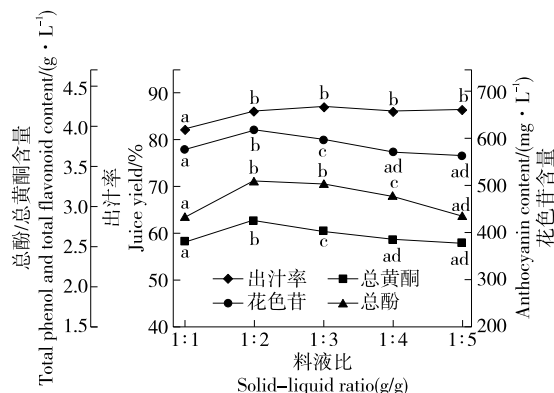
1.5 数据处理及分析

试验数据均以“平均值 ± 标准差”表示, 使用 SPSS 22.0、Origin 9.1 和 Design-Expert 10.0 进行统计分析和方差分析, 显著性差异水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 料液比对蓝莓出汁率及活性物质含量的影响

由图 1 可知: 随着料液比增高, 蓝莓出汁率呈先增加然后趋于平稳的变化趋势。其原因是当水量较低时, 蓝莓果粉碎不充分而导致出汁率较低; 而当水量充足时, 蓝莓果能均匀、充分粉碎而促使其出汁率增高并保持稳定^[24]。随着料液比增高, 蓝莓汁中花色苷含量、总黄酮含量和总酚含量均呈先增加然后减少趋势, 在料液比为 1:



小写字母不同表示各组间差异显著 ($P < 0.05$)

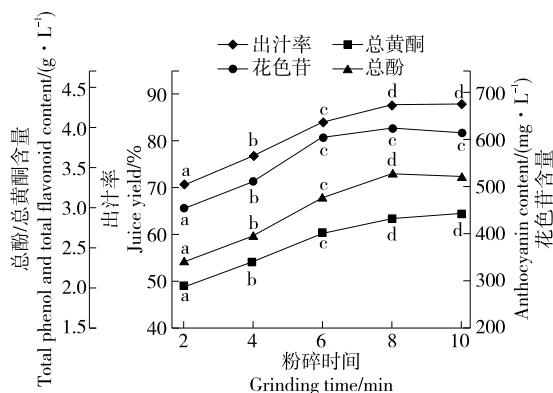
图 1 不同液料比下蓝莓出汁率及活性物质含量变化

Figure 1 Effects of different solid-to-liquid ratio on juice yield and active substance content of blueberry

2 (g/g) 时达到最高值, 分别为 618.38 mg/L、2.83 g/L、3.32 g/L。一方面是水分较高时蓝莓果肉较分散, 在规定粉碎时间内未能均匀、充分粉碎, 致使其果肉中活性成分释放受到限制; 另一方面是料液比较高时, 蓝莓汁中花色苷含量、总酚含量和总黄酮含量被稀释而降低。因此, 料液比选择 1:1, 1:2, 1:3 (g/g) 进行响应面试验。

2.2 粉碎时间对蓝莓出汁率及活性物质含量的影响

由图 2 可知: 蓝莓出汁率、花色苷含量、总酚含量和总黄酮含量均在 2~6 min 时显著增高, 而在 8~10 min 趋于平稳, 且存在较显著的相关性。其原因是湿法超微粉碎技术显著降低了蓝莓果浆粒径 (10~25 μm), 增大了蓝莓果浆的比表面积和孔隙率, 促使了花色苷、总酚和总黄酮的溶出^[14]。但随着超微粉碎时间的持续增加, 蓝莓果浆粒径、比表面积和孔隙率保持稳定, 花色苷、总酚和总黄酮的溶出趋于稳定。因此, 粉碎时间选择 6, 8, 10 min 进行响应面试验。



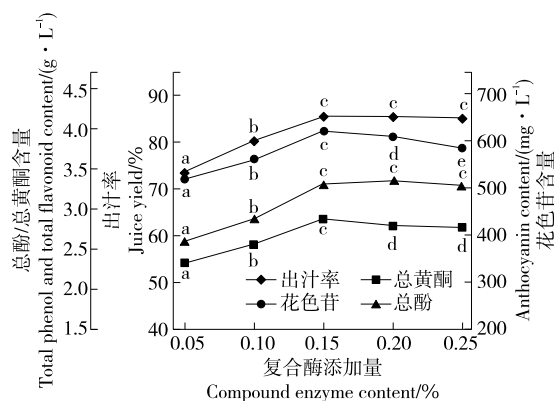
小写字母不同表示各组间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同粉碎时间下蓝莓出汁率及活性物质含量变化

Figure 2 Effects of different crushing time on juice yield and active substance content of blueberry

2.3 复合酶添加量对蓝莓出汁率及活性物质含量的影响

由图 3 可知: 随着复合酶添加量增高, 蓝莓出汁率、总酚含量和总黄酮含量均在 0.05%~0.15% 时显著增高, 而在 0.15%~0.25% 时略有降低。其原因可能是复合酶含量在一定范围时, 随着复合酶添加量增加, 复合酶与蓝莓果肉细胞反应增多, 能够促进胞内物质溶出^[25], 进而促使蓝莓出汁率和活性物质溶出量不断升高; 当复合酶添加量过高时, 蓝莓果肉细胞出现过度酶解, 导致糖类物质增多、果汁黏度增大, 进而阻碍了酶解反应进行, 最终导致蓝莓出汁率和活性物质溶出量略有下降。此外, 蓝莓汁中花色苷含量随复合酶添加量升高出现先升高后降低的变化趋势, 在复合酶添加量为 0.15% 时达到最高值 621.14 mg/L。已有研究^[26-27] 表明, 果胶酶具有 β -糖苷



小写字母不同表示各组间差异显著 ($P < 0.05$)

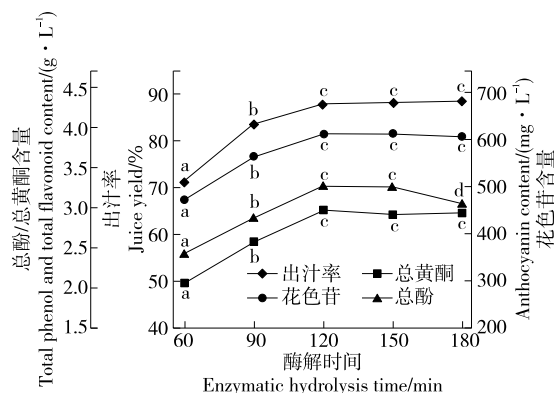
图3 不同复合酶添加量下蓝莓出汁率及活性物质含量变化

Figure 3 Effects of different compound enzyme supplemental levels on juice yield and active substance content of blueberry

酶和肉桂酯酶活性,不仅能降解花色苷,还可以催化花色苷去糖基化成为稳定性较差的花色苷元。因此,蓝莓汁中花色苷含量在复合酶添加量较高时出现降低现象,一方面可能是由于过量的复合酶催化或降解花色苷致使其含量下降,另一方面则是由于复合酶添加量过高时蓝莓汁中糖类物质增多、黏度增大,酶解反应受到阻碍导致花色苷溶出量降低。综上所述,复合酶添加量选择0.10%,0.15%,0.20%进行响应面试验。

2.4 酶解时间对蓝莓出汁率及活性物质含量的影响

由图4可知:酶解时间60~120 min时,蓝莓出汁率、花色苷含量、总酚含量和总黄酮含量均随酶解时间延长而显著增高 ($P < 0.05$);酶解时间120~180 min时,蓝莓出汁率、花色苷含量、总黄酮含量和总酚含量无显著性变



小写字母不同表示各组间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同酶解时间下蓝莓出汁率及活性物质含量变化

Figure 4 Effects of different enzymatic hydrolysis time on juice yield and active substance content of blueberry

化 ($P > 0.05$)。试验中蓝莓出汁率和花色苷含量变化趋势,与贾鸿冰等^[22]的研究结果一致,均在120 min达到最大值,表明酶解反应在120 min时基本结束。蓝莓汁中花色苷、总酚和总黄酮含量在150~180 min时略有下降,其原因一方面可能是由于酶解超过一定时间后,受光照和氧气等因素诱导发生氧化分解^[28-29],溶出速度小于分解速度,导致其溶出量逐渐下降。因此,酶解时间选择90,120,150 min进行响应面试验。

2.5 响应面优化试验

2.5.1 响应面优化试验结果 选取料液比、粉碎时间、复合酶添加量和酶解时间4个因素3个水平进行响应面试验,以蓝莓汁的制备效率(出汁率)和最主要的抗氧化活性物质含量(花色苷含量)为参考指标进行试验优化,响应面试验因素水平设置见表1。响应面试验结果如表2所示,通过Design-expert 10.0软件对数据进行多元回归拟合,得到出汁率(Y_1)和花色苷含量(Y_2)的二次多项式回归方程为:

$$Y_1 = 88.34 - 1.52A + 0.17B - 0.36C + 2.35D - 0.85AB + 0.57AC - 1.24AD + 1.89BC - 0.87BD + 0.26CD - 7.36A^2 - 5.65B^2 - 5.97C^2 - 6.68D^2, \quad (1)$$

$$Y_2 = 610.52 - 14.23A - 6.66B - 6.77C + 24.47D + 7.39AB - 4.24AC - 4.45AD - 25.47BC - 15.25BD + 19.55CD - 44.02A^2 - 61.33B^2 - 58.11C^2 - 57.79D^2. \quad (2)$$

由表3可知,蓝莓出汁率和花色苷含量模型 P_1 、 P_2 均小于0.01,表明回归模型影响呈极显著 ($P < 0.01$)。失拟项 $P_1 = 0.5095 > 0.05$ 、 $P_2 = 0.9673 > 0.05$,可知两个模型失拟项不显著,表明模型可靠。试验校正系数 $R_1^2 = 0.9940$ 、 $R_2^2 = 0.9842$,修正系数 $R_1^2 = 0.9879$ 、 $R_2^2 = 0.9683$,说明两个方程能够较好地反映各个单因素之间关系,拟合度高且试验误差小,能分别解释98.79%蓝莓出汁率和96.83%花色苷含量响应值变化,可用于对蓝莓湿法超微粉碎-复合酶法工艺进行分析与预测。

通过分析两个模型回归方程及方差分析结果可知,各因素影响蓝莓出汁率和花色苷含量大小均依次为:酶解时间>料液比>复合酶添加量>粉碎时间,说明酶解时间对蓝莓出汁率和花色苷含量的影响最大,料液比的影响其次。回归方程及方差分析结果表明,酶解时间决

表1 响应面试验因素水平表

Table 1 Level of response surface test factors

水平	A 料液比 (g/g)	B 粉碎时 间/min	C 复合酶添 加量/%	D 酶解时 间/min
-1	1:1	6	0.10	90
0	1:2	8	0.15	120
1	1:3	10	0.20	150

定了蓝莓出汁率与花色苷溶出量,酶解时间过短,复合酶氧化分解,导致蓝莓出汁率与花色苷含量下降。
不能与蓝莓果肉充分反应;酶解时间过长,会引起花色苷 2.5.2 交互作用分析 响应面3D模型中两个因素相互

表 2 工艺优化响应面试验结果

Table 2 Response surface test results of process optimization

试验号	A	B	C	D	出汁率/%	花色苷含量/ (mg · L ⁻¹)	试验号	A	B	C	D	出汁率/%	花色苷含量/ (mg · L ⁻¹)
1	-1	-1	0	0	74.24±0.47	490.76±0.92	16	0	1	1	0	77.28±0.34	447.71±0.96
2	-1	0	0	1	74.10±0.31	517.30±0.21	17	0	1	0	1	77.98±0.35	485.73±4.27
3	-1	0	0	-1	71.89±0.36	471.65±3.38	18	0	0	0	0	86.38±0.17	622.78±2.51
4	-1	0	-1	0	73.38±0.66	505.82±1.15	19	0	0	1	1	77.28±0.52	531.65±3.27
5	-1	0	1	0	73.61±0.07	484.30±2.80	20	0	0	0	0	87.76±0.12	599.10±3.28
6	-1	1	0	0	72.90±0.34	489.32±4.25	21	0	0	0	0	87.13±0.64	606.99±1.19
7	0	-1	-1	0	78.22±0.42	472.10±3.46	22	0	1	0	-1	73.17±0.59	468.07±3.48
8	0	-1	0	1	77.99±0.25	538.83±3.05	23	0	0	0	0	87.68±0.08	589.77±0.75
9	0	-1	1	0	72.94±0.65	511.56±2.82	24	1	-1	0	0	76.14±0.35	541.70±4.31
10	0	-1	0	-1	69.71±0.33	460.17±2.21	25	1	0	0	1	79.53±0.47	556.05±2.09
11	0	0	-1	-1	72.67±0.31	492.46±3.53	26	1	0	0	-1	72.39±0.53	481.70±3.11
12	0	0	-1	1	77.47±0.41	500.80±1.58	27	1	0	-1	0	77.19±0.13	524.48±3.28
13	0	0	0	0	87.53±0.66	615.60±0.16	28	1	0	1	0	74.79±0.21	520.89±1.62
14	0	0	1	-1	71.45±0.61	445.11±2.81	29	1	1	0	0	78.29±0.06	505.11±0.78
15	0	1	-1	0	74.99±0.46	510.13±1.92							

表 3 蓝莓出汁率和花色苷含量响应面试验结果方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance of response surface methodology for juice yield and anthocyanin content

来源	出汁率				花色苷含量			
	平方和	F 值	P 值	显著性	平方和	F 值	P 值	显著性
模型	786.43	164.48	<0.000 1	* *	68 461.98	62.17	<0.000 1	* *
A	27.63	80.91	<0.000 1	* *	2 430.48	30.90	<0.000 1	* *
B	0.26	0.76	0.396 7		416.62	5.30	0.037 3	*
C	1.22	3.58	0.079 3	*	430.55	5.47	0.034 6	*
D	51.80	151.69	<0.000 1	* *	5 621.16	71.46	<0.000 1	* *
AB	3.40	9.94	0.007 0	* *	263.51	3.22	0.094 2	
AC	1.50	4.39	0.054 8	*	83.49	1.06	0.297 5	
AD	7.13	20.86	0.000 4	* *	92.10	1.17	0.101 0	
BC	14.33	41.95	<0.000 1	* *	2 594.88	32.99	<0.000 1	* *
BD	3.01	8.81	0.010 2	*	930.25	11.83	0.004 0	* *
CD	0.27	0.78	0.393 1		1 528.81	19.44	0.000 6	* *
A ²	178.40	522.38	<0.000 1	* *	6 373.35	81.02	<0.000 1	* *
B ²	207.07	606.32	<0.000 1	* *	24 400.92	310.21	<0.000 1	* *
C ²	231.38	677.52	<0.000 1	* *	21 900.43	278.42	<0.000 1	* *
D ²	289.23	846.90	<0.000 1	* *	21 664.57	275.42	<0.000 1	* *
失拟项	0.509 5	0.967 3						
R ²	0.994 0	0.984 2						
R _{adj} ²	0.987 9	0.968 3						

[†] * 表示差异显著(P<0.05); * * 表示差异极显著(P<0.01)。

影响总体呈抛物线型关系,均出现先升高后下降变化趋势,且存在极值——响应面最优值^[30]。根据方差分析结果选取具有显著影响的组合因素进行交互作用分析,其中料液比和酶解时间、复合酶添加量和粉碎时间 3D 曲面陡峭

(图 5),表明它们之间的交互效应对蓝莓出汁率影响极显著,与方差分析结果相吻合。复合酶添加量和酶解时间、粉碎时间和酶解时间 3D 曲面陡峭,表明它们之间的交互效应对花色苷含量影响极显著,与方差分析结果相吻合。

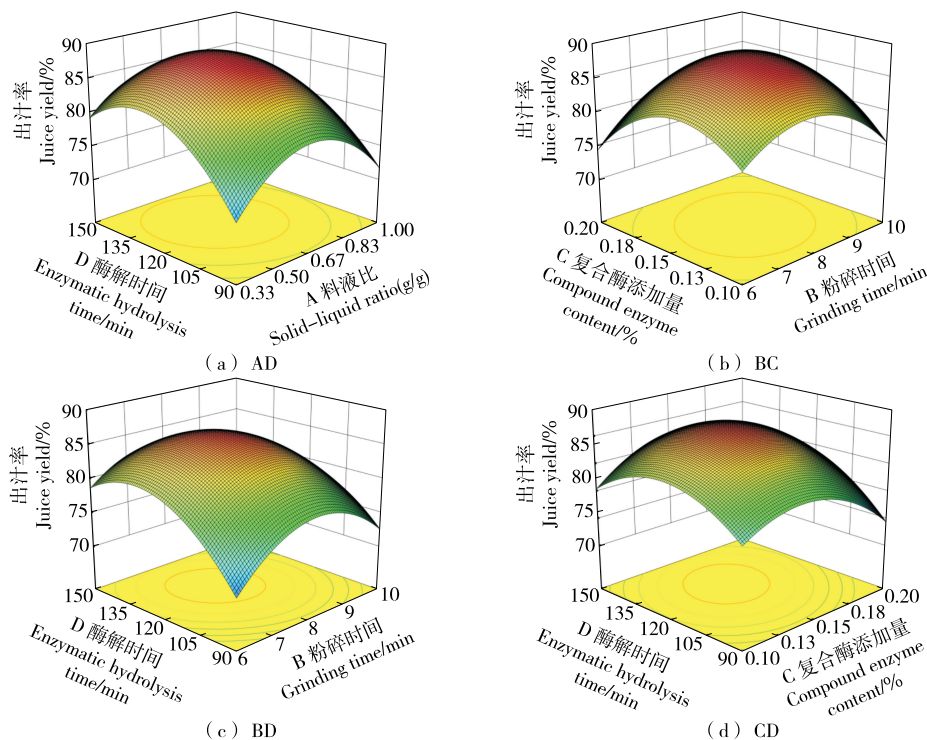


图 5 各两因素交互作用对蓝莓出汁率与花色苷含量影响

Figure 5 Effects of the interaction of two factors on juice yield and anthocyanin content

2.5.3 最优条件及验证实验 根据 Design Expert 10.0 得到湿法超微粉碎—复合酶法最佳工艺参数为料液比 1 : 1.66 (g/g)、粉碎时间 7.81 min、复合酶添加量 0.15%，酶解时间 126.94 min。考虑到实际操作情况,将工艺条件改为料液比 1 : 1.7 (g/g)、粉碎时间 8.00 min、复合酶添加量 0.15%，酶解时间 127 min,在该工艺条件下蓝莓出汁率预测值为 89.00%、花色苷含量预测值为 614.95 mg/L。在以上最佳组合工艺条件下设置验证实

验($n = 3$),蓝莓出汁率为 87.89%、花色苷含量为 612.04 mg/L、总黄酮含量 2.96 g/L、总酚含量 3.43 g/L,与预测值基本一致,说明响应面分析得到的蓝莓果汁湿法超微粉碎—复合酶法工艺参数可靠。

2.6 湿法超微粉碎—复合酶法蓝莓汁抗氧化能力分析

由图 6 可知,蓝莓汁的 DPPH 自由基清除能力随样品用量增加而显著增加,在样品量为 1.2~2.0 mL 时趋于平稳且高于 0.3% V_C ,分别达到 98.18%,98.71%,

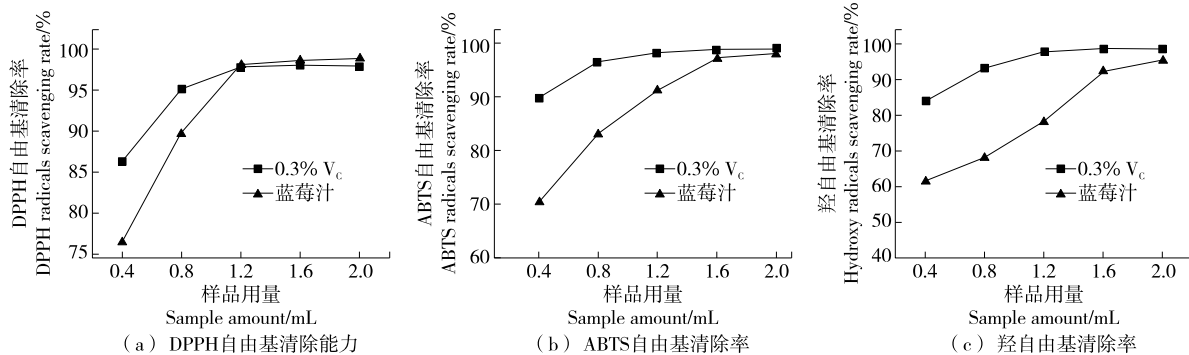


图 6 蓝莓汁与 V_C 抗氧化能力比较

Figure 6 Comparison of antioxidant capacity between blueberry juice and V_C

98.98%。蓝莓汁的 ABTS 自由基清除能力随样品用量增加而逐渐增加,在样品量为 1.6~2.0 mL 时 DPPH 自由基清除率接近 0.3% V_c ,均达到 97% 以上。相比 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力,蓝莓汁的羟自由基清除能力较弱,在样品量为 0.4~1.2 mL 时羟自由基清除率仅为 61.47%~78.35%,但在 1.6~2.0 mL 时较接近 0.3% V_c 。综上,湿法超微粉碎—复合酶法蓝莓汁具有较强的抗氧化能力,当样品量高于 1.6 mL 时其抗氧化能力与 0.3% V_c 相当。

3 结论

通过响应面试验优化湿法超微粉碎—复合酶法制备蓝莓汁的工艺,得到最优工艺参数为料液比 1:1.7 (g/g)、粉碎时间 8.00 min、复合酶添加量 0.15%、酶解时间 127 min,此条件下蓝莓出汁率为 87.89%、花色苷含量为 612.04 mg/L、总黄酮含量 2.96 g/L、总酚含量 3.43 g/L,样品量为 1.6 mL 时其抗氧化能力与 0.3% 维生素 C 相当。后续将基于湿法超微粉碎—复合酶法进一步探究蓝莓汁加工和贮藏过程中酚类物质组成与风味品质变化规律。

参考文献

- [1] 金永学, 冯建国, 郑淘, 等. 蓝莓的功能成分、保健作用及其开发利用[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 231-236.
JIN Y X, FENG J G, ZHENG T, et al. Functional components, health function and utilization of blueberry[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 231-236.
- [2] LIU H N, WU H, WANG Y, et al. Enhancement on antioxidant and antibacterial activities of Brightwell blueberry by extraction and purification[J]. Applied Biological Chemistry, 2021, 64(1): 78.
- [3] 周宇益, 杨娜, 孟嫚, 等. 恒稳磁场辅助冷藏保鲜对蓝莓品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 161-165, 172.
ZHOU Y Y, YANG N, MENG M, et al. Effects of static magnetic field-assisted preservation on the quality of blueberry[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 161-165, 172.
- [4] 赵伟, 黄佳琪. 干燥方式对蓝莓花青素降解特性及抗氧化能力的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 147-152.
ZHAO W, HUANG J Q. Effects of different drying methods on degradation characteristics of anthocyanins and antioxidant capacity in blueberries[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 147-152.
- [5] 李亚辉, 周剑忠, 马艳弘, 等. 蓝莓酒澄清稳定处理中组分及抗氧化活性变化[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(6): 72-79.
LI Y H, ZHOU J Z, MA Y H, et al. Variation of composition and antioxidant activity during clarification and stabilization process of blueberry wine[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(6): 72-79.
- [6] 李亚东, 裴嘉博, 孙海悦. 全球蓝莓产业发展现状及展望[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(4): 421-432.
LI Y D, PEI J B, SUN H Y. Status and prospect of global blueberry industry[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(4): 421-432.
- [7] 阳翠, 董顺文, 陈昌琳, 等. 四川省蓝莓产业发展现状分析与对策建议[J]. 中国果树, 2022(1): 99-102, 108.
YANG C, DONG S W, CHEN C L, et al. Analysis of the current development situation of blueberry industry in Sichuan province and suggestions for countermeasures[J]. China Fruits, 2022(1): 99-102, 108.
- [8] 李洋, 冯鑫, 徐瞳晖, 等. 不同冻结温度及冻融循环处理对蓝莓品质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(5): 127-136.
LI Y, FENG X, XU T H, et al. Effects of different freezing temperatures and freeze-thaw cycles on quality characteristics of blueberries[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(5): 127-136.
- [9] 郭旭, 史官清, 吴黔川, 等. 贵州省蓝莓全产业链发展现状及对策建议[J]. 中国果树, 2022(9): 93-97.
GUO X, SHI G Q, WU Q C, et al. Current situation and countermeasures for the development of blueberry industry chain in Guizhou province[J]. China Fruits, 2022(9): 93-97.
- [10] 宁孔卯, 姜启兴, 余达威, 等. 杀菌工艺对蓝莓果汁品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(6): 60-64.
NING K L, JIANG Q X, YU D W, et al. Effects of sterilization process on blueberry juice quality[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(6): 60-64.
- [11] PILAND D, BROWNING L. Acceptability of 100% blueberry juice, fiber-fortified, antioxidant-rich rooibos tea containing sorbet developed to help prevent type 2 diabetes [J]. Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 2022, 122(9S): A13.
- [12] 卢薇. 榨汁工艺对蓝莓汁理化性质和抗氧化性的影响[J]. 饮料工业, 2022, 25(6): 33-37.
LU W. Effects of juicing process on the physicochemical properties and antioxidant activity of blueberry juice[J]. Beverage Industry, 2022, 25(6): 33-37.
- [13] WANG F, ZENG J, TANG X L, et al. Effect of ultrafine grinding technology combined with high-pressure, microwave and high-temperature cooking technology on the physicochemical properties of bean dregs [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112810.
- [14] 施锴云, 冯爱博, 益莎, 等. 超微粉碎技术粉碎竹笋壳的工艺参数优化及其黄酮溶出效果的研究[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(1): 20-26, 38.
SHI K Y, FENG A B, YI S, et al. Optimization of process parameters and study on flavonoid dissolution of bamboo shoot shell by ultrafine grinding technology[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2020, 56(1): 20-26, 38.
- [15] 朱丹丹. 湿法超微粉碎银杏果粉在面条中的应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 178-183.
ZHU D D. Study on the application of wet ultrafine crushing ginkgo powder in noodles[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 178-183.

- [16] 邓凯波, 黄雅萍, 代亚萍, 等. 超微粉碎对南瓜粉物化及其粉糊流变性质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(11): 42-49.
DENG K B, HUANG Y P, DAI Y P, et al. Effect of ultrafine grinding on physicochemical and paste rheological properties of pumpkin powder[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(11): 42-49.
- [17] 刘子放, 张岩, 李俊, 等. 湿法超微粉碎程度对新鲜桑果浆理化特性及活性成分含量的影响[J]. 蚕业科学, 2017, 43(3): 472-478.
LIU Z F, ZHANG Y, LI J, et al. Effect of wet superfine grinding on physicochemical properties and active ingredient contents of fresh mulberry pulp[J]. Acta Sericologica Sinica, 2017, 43(3): 472-478.
- [18] ZHAO X Y, ZHU H T, ZHANG G X, et al. Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activity of red grape pomace powders[J]. Powder Technology, 2015, 286: 838-844.
- [19] 王晓慧, 姚茂君, 陈怡君, 等. 超声辅助复合酶法提取莓茶多糖的工艺优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 166-172.
WANG X H, YAO M J, CHEN Y J, et al. Research on extraction technology of *Ampelopsis grossedentata* polysaccharide by ultrasound-assisted enzymatic method[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 166-172.
- [20] 宁豫昌, 高俊杰, 袁艺萌. 复合酶处理对刺梨、苹果混合发酵果汁的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(8): 87-94.
NING Y C, GAO J J, YUAN Y M. Effect of compound enzyme treatment on mixed fermented juice of *Rosa roxburghii* Tratt and *Malus pumila* Mill[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(8): 87-94.
- [21] 朱金艳, 张俊鹏, 郑存娜, 等. 复合酶法制取蓝莓汁的工艺优化研究[J]. 中国果菜, 2020, 40(5): 2-6, 19.
ZHU J Y, ZHANG J P, ZHENG C N, et al. Study on optimization of blueberry juice preparation process by complex enzyme[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(5): 2-6, 19.
- [22] 贾鸿冰, 田继远, 于娟. 复合果胶酶酶解对蓝莓出汁率和花色苷溶出量的影响[J]. 食品科技, 2016, 41(6): 270-274.
JIA H B, TIAN J Y, YU J. Effect of enzymatic hydrolysis of compound pectinase on juice yield and anthocyanin extraction from blueberry[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(6): 270-274.
- [23] 程宏桢, 蔡志鹏, 王静, 等. 百香果全果酒发酵工艺优化及体外抗氧化性比较分析[J]. 中国酿造, 2020, 39(4): 91-97.
CHENG H Z, CAI Z P, WANG J, et al. Optimization of fermentation process for whole passion fruit wine and comparative analysis of antioxidant activity in vitro[J]. China Brewing, 2020, 39(4): 91-97.
- [24] 楚文靖, 张付龙, 孙悦, 等. 蓝莓鲜果酶法榨汁工艺的优化研究[J]. 现代食品, 2021(11): 100-103, 119.
CHU W J, ZHANG F L, SUN Y, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis technology for blueberry fruit[J]. Modern Food, 2021(11): 100-103, 119.
- [25] 汪晓琳, 谷绒, 胡晓涛, 等. 蓝莓汁复合酶法制取工艺的优化研究[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(6): 71-77.
WANG X L, GU R, HU X T, et al. Optimization technology of preparing blueberry juice by compound enzymolysis method[J]. Storage and Process, 2017, 17(6): 71-77.
- [26] ARNOUS A, MEYER A S. Discriminated release of phenolic substances from red wine grape skins (*Vitisvinifera* L.) by multicomponent enzymes treatment[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 49(1): 68-77.
- [27] JIANG J, PATERSON A, PIGGOTT J R. Short communication: Effects ofpectolytic enzyme treatments on anthocyanins in raspberry juice[J]. International Journal of Food Science and Technology, 1990, 25(5): 596-600.
- [28] BUCHERT J, KOPONEN J M, SUUTARINEN M, et al. Effect of enzyme-aided pressing on anthocyanin yield and profiles in bilberry and blackcurrant juices[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(15): 2 548-2 556.
- [29] 郭庆启, 张娜, 何娇, 等. 蓝靛果汁花色苷热降解动力学的研究[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(9): 74-78.
GUO Q Q, ZHANG N, HE J, et al. Thermal degradation dynamic of anthocyanins in *Lonicera edulis* turcz juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(9): 74-78.
- [30] 何婉莹, 黄展锐, 赵良忠, 等. 生浆法制豆腐的工艺优化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 188-196.
HE W Y, HUANG Z R, ZHAO Z L, et al. Optimization of tofu production from filtered raw soybean milk[J]. Modern Food Science & Technology, 2021, 37(10): 188-196.

(上接第 106 页)

- [16] LIU H, JIANG W B, CAO J K, et al. Effect of chilling temperatures on physiological properties, phenolic metabolism and antioxidant level accompanying pulp browning of peach during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 255: 175-182.
- [17] YANG X Z, CHEN J H, JIA L W, et al. Rapid and non-destructive detection of compression damage of yellow peach using an electronic nose and chemometrics[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1 866.
- [18] 张进, 胡芸, 周罗雄, 等. 近红外光谱分析中的化学计量学算法研究新进展[J]. 分析测试学报, 2020, 39(10): 1 196-1 203.
ZHANG J, HU Y, ZHOU L X, et al. Progress of chemometric algorithms in near-infrared spectroscopic analysis[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(10): 1 196-1 203.
- [19] ZHANG J, ZHOU X, LI B Y. PFCE2: A versatile parameter-free calibration enhancement framework for near-infrared spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 301: 122978.