

超声波协同高剪切法高效提取树莓果渣黄酮及其对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用

赵云韵, 杨心怡, 王申萌, 符群

(东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 为了提高树莓果渣的综合利用率以及高效制备树莓果渣中降血糖成分, 本研究以黄酮提取量和 α -葡萄糖苷酶抑制率为指标, 优化了超声波协同高剪切法辅助乙醇提取树莓果渣中降血糖成分的工艺。采用响应面法对主要工艺参数进行优化, 方差分析结果表明: 回归模型较好地反映了黄酮提取量与乙醇浓度比、提取温度、超声波处理时间之间的关系。最佳工艺条件: 高速剪切乳化机转速为 14000 r/min, 提取温度为 55 °C, 超声时间为 26 min, 剪切时间为 40 s, 超声功率为 210 w, 此时提取物的 α -葡萄糖苷酶抑制率 (65.6±0.11)%; 黄酮提取量为 (39.11±0.16) mg/g。该法在提取效率及活性保持方面具备优势, 与单独使用超声波工艺、高剪切工艺相比, 树莓果渣黄酮提取量分别增多 117.45%、112.17%; 提取物 α -葡萄糖苷酶抑制率分别提升 47.85%、43.79%, 而树莓果渣中黄酮类物质的高效提取也为降糖物质的制备提供了新途径。

关键词: 树莓果渣; 黄酮; 超声波; 高速剪切; α -葡萄糖苷酶抑制率

文章编号: 1673-9078(2019)05-220-227

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.5.031

Efficient Extraction of Flavonoids from *Rubus idaeus* Residue by Ultrasonic Wave Combined with High Shear Method and Its Inhibition of α -glucosidase

ZHAO Yun-yun, YANG Xin-yi, WANG Shen-meng, FU Qun

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to improve the comprehensive utilization rate of *Rubus idaeus* pmace and extract the hypoglycemic components of *Rubus idaeus* pmace efficiently, in this study, flavonoid extraction and inhibition rate of α -glucosidase were used as indexes to optimize the extraction technology of hypoglycemic components in *Rubus idaeus* pmace assisted by high speed shear ultrasonography. The response surface method was used to optimize the main process parameters. The results of ANOVA showed that the regression model reflected the relationship between flavonoid extraction amount and ethanol concentration ratio, extraction temperature and ultrasonic treatment time. The best process conditions: high-speed shear emulsifying machine speed of 14000 r/min, extracting temperature of 55 °C, ultrasonic time of 26 min, shear time of 40 s, ultrasonic power of 210 w. Under this condition, the inhibition rate of α -glucosidase was (65.56±0.11)%; the content of flavonoids in *Rubus idaeus* pmace was (39.11±0.16) mg/g. The method has an advantage in extracting efficiency and activity retention. Comparing to the use of the ultrasound process and the high shear technique, this method increased by 117.45% and 112.17% of the flavonoids contents in *Rubus idaeus* pmace, respectively; and increased by 47.85% and 43.79% of α -glucosidase inhibition, respectively. The efficient extraction of flavonoids from *Rubus idaeus* pmace also provided a new way for the extraction of hypoglycemic substances.

Key words: raspberry seeds; flavonoids; ultrasonic; high-speed shear; α -glucosidase inhibition

红树莓 (*Rubus idaeus* L.) 为蔷薇科 (*Rosaceae*) 悬钩子属 (*Rubus*) 植物, 俗称“覆盆子”, 果实为聚合
收稿日期: 2018-12-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFC0500307-07)

作者简介: 赵云韵 (1998-), 女, 本科, 研究方向: 食品科学与工程

通讯作者: 符群 (1974-), 博士, 高级工程师, 研究方向: 天然产物成分制备与活性研究

类浆果, 柔嫩多汁, 甜而芳香, 富含营养物质, 尤其富含黄酮类、SOD、鞣化酸等活性物质^[1]。目前对其研究和开发主要集中于树莓引种栽培和果实的加工利用^[2], 而其果汁、果酒等产品加工过程中产生大量的副产物果渣尚未被人们充分利用^[3]。若按 25%的果实出渣率核算, 据不完全统计, 单就辽宁省每年将有万吨左右的树莓果渣被丢弃造成资源浪费^[4]。树莓果渣

主要为果籽, 果籽占树莓果实质量的 9%~12%, 果籽成分为膳食纤维、有机酸、脂类以及花色苷、黄酮类化合物等^[5], 可变废为宝从中发掘多种功能性活性成分。

近年来, 随着人们生活水平的提高, 我国的高血糖症发病率已跃居全球首位。研究表明^[6,7], 引起餐后血糖升高的主要原因之一是 α -葡萄糖苷酶在小肠内催化蔗糖和麦芽糖分解成单糖, 便于人体吸收, 而黄酮类化合物可以抑制 α -葡萄糖苷酶的活性, 减少人体对碳水化合物的吸收, 从而有效控制血糖升高^[8], 缓解高血糖症状^[9]。传统降糖药物长期服用带来人体抗药性、低血糖或肝肾损伤, 研究天然食源中活性成分的降糖功效, 不仅可以促进林下经济植物的高值化利用, 同时为探求新的降糖靶点活性成分、开发降糖保健食品具有现实意义。

常见的黄酮化合物提取方法有: 溶剂萃取法^[10,11]、超高压辅助提取法^[12]、纤维素酶辅助提取法^[13]等, 单一使用存在提取效率低、提取物活性降低等弊端。超声波产生空化效应、机械振动、热效应、乳化扩散多级效应, 剪切分散乳化机转子使物料底部形成微负压, 转子高速旋转产生强烈机械剪切效应^[14,15]。两者协同作用下物料受到剪切、摩擦、冲击, 使破壁效果显著, 以期获得高得率、强活性的提取物。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与主要试剂

红树莓果渣, 黑龙江省农科院园艺分院提供。

芦丁标准品 ($\geq 98\%$)、 α -葡萄糖苷酶 (70 U/mL)、4-硝基苯基- α -D-吡喃葡萄糖苷 (PNPG), 上海源叶生物科技有限公司; 乙醇、碳酸钠等均为国产分析纯。

1.2 主要仪器设备

全波长酶标仪, BioTek Instruments Inc; 超声波清洗器 (SB25-12 DTD); 紫外可见分光光度仪 (UV-5500PC), 上海元析仪器有限公司; FA25 高剪切分散乳化机, 上海弗鲁克流体机械制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 树莓果渣黄酮提取量的测定方法

1.3.1.1 黄酮标准曲线的绘制

准确称取芦丁 0.0140 g 定容于 50 mL 容量瓶中, 得浓度 0.28 mg/mL 的芦丁标准溶液。准确吸取芦丁标准溶液 0.0、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mL 于 25 mL 容

量瓶中, 加入 5% NaNO₂ 溶液 0.75 mL, 摇匀, 放置 6 min 再加入 10% 的 Al(NO₃)₃ 溶液 0.75 mL, 摇匀, 放置 6 min 再加入 4% NaOH 溶液 10 mL, 70% 乙醇定容, 摇匀, 静置 10~15 min 后于 510 nm 处测量吸光度 A, 以芦丁浓度 X (mg/mL) 对吸光度 Y 进行线性回归方程计算得标准曲线 $y=0.4367x-0.0006$, 相关系数 $R^2=0.9996$, 标准方程可用。

1.3.1.2 黄酮提取量的计算

吸取适量提取液于 5 mL 比色管中, 于 510 nm 波长处比色定量测定提取液的 OD 值, 代入标准曲线方程, 计算出提取液中总黄酮的含量, 根据公式 (1) 计算黄酮提取量 (mg/g)。

$$\text{黄酮提取量(mg/g)} = \frac{\text{提取液中黄酮质量(mg)}}{\text{原料(g)}} \quad (1)$$

1.3.2 原料预处理

树莓果渣经漂洗、低温干燥、粉碎过 140 目筛获得红树莓果渣粉, 备用。

1.3.3 单因素试验

准确称取 1.00 g 树莓果渣粉, 选取因素: 乙醇浓度 (60%、65%、70%、75%、80%)、提取温度 (40、45、50、55、60 °C)、根据超声功率 (180、210、240、270、300 W)、剪切频率 (10000、14000、18000、22000 r/min)、超声时间 (10、15、20、25、30 min) 进行单因素实验, 研究不同因素水平对树莓果渣黄酮提取量及其对 α -葡萄糖苷酶的抑制率影响。

1.3.4 响应面优化实验

在单因素实验的基础上, 选取显著影响因素为自变量, 以树莓果渣黄酮提取量为响应值, 采用中心组合 Box-Behnken Design 设计试验, 优化工艺条件。

1.3.5 α -葡萄糖苷酶抑制率的测定方法

参照文献方法^[16], 稍加修改。取树莓果渣黄酮提取物 400 μ L, 乙醇稀释 10 倍, 取稀释液 100 μ L 于 96 孔板中, 加入 500 U/mL 的 α -葡萄糖苷酶溶液 50 μ L, 37 °C 条件下孵育使酶活化, 15 min 后加入 10 mg/mL 的底物 PNPG 溶液 50 μ L, 于 37 °C 水浴 10 min 后, 加入 1 mol/L 的 Na₂CO₃ 溶液 10 μ L 终止反应, 高速震荡混合均匀, 用酶标仪在波长 405 nm 处测定吸光度为样品组; 测定只有树莓果渣黄酮提取物反应体系的吸光度 A₂ 为对照组, 再取 100 μ L 的磷酸盐缓冲溶液代替树莓果渣黄酮提取物, 测定其吸光度 A₀ 为空白组。每组实验做 5 组平行, 按照公式 (2) 计算抑制率。

$$\text{抑制率(\%)} = \frac{[A_0 - (A_1 - A_2)]}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

2 结果与amp;讨论

2.1 超声协同高剪切提取树莓果渣黄酮单因素试验结果

2.1.1 超声时间对黄酮提取量及 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

在料液配比 1:30, 剪切频率 14000 r/min, 每 5 min 剪切 10 s, 提取温度 55 °C, 超声功率 210 W 的条件下, 不同的超声处理时间对黄酮提取量及 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响。结果如图 1 所示。

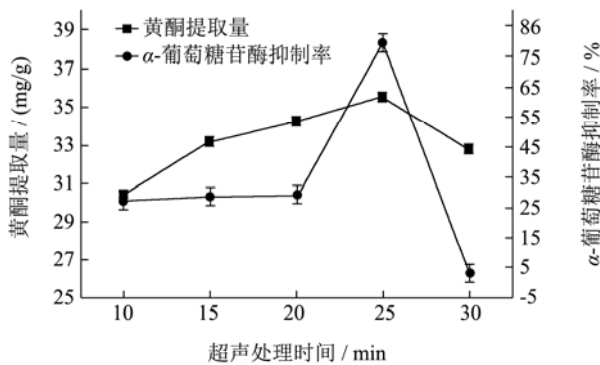


图 1 超声时间对树莓果渣黄酮提取量及酶抑制率影响

Fig.1 Effect of ultrasonic time on flavonoids extraction and enzyme inhibition rate of *Rubus idaeus pmace*

由图 1 可知, 在设定的超声处理时间范围内, 随着超声处理时间的增多, 黄酮提取量呈现先上升后下降的变化趋势, 在 25 min 时获得最大值。较长的处理时间能够有效破坏树莓果渣的细胞壁, 使其中黄酮类物质分散溶出, 同时会带来黄酮结构的破坏; 随着超声处理时间的延长, α -葡萄糖苷酶抑制率呈现先上升后下降的变化趋势, 抑制率在超声处理时间为 25 min 时达到最高值, 为 79.45%。长时间的超声处理将影响成分的活性, 同时浪费能源^[17]。

2.1.2 超声功率对黄酮提取量及 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

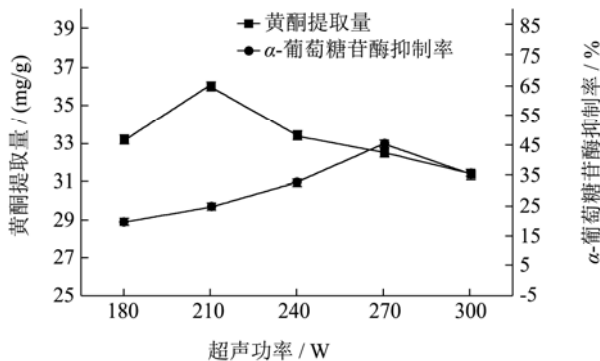


图 2 超声功率对树莓果渣黄酮提取量及酶抑制率影响

Fig.2 Effect of ultrasonic power on flavonoids extraction and enzyme inhibition of *Rubus idaeus pmace*

在剪切转速 14000 r/min, 每间隔 5 min 剪切 10 s, 超声时间 20 min, 提取温度 55 °C, 料液比 1:30 的条件下研究不同的超声功率对树莓果渣黄酮提取量及 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响。结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 随着超声功率增加, 黄酮提取量呈现先上升后下降变化趋势, 在超声功率为 210 W 时, 黄酮提取量达到最大值 36.04 mg/g。超声功率增加, 细胞破碎程度加剧, 有利于黄酮的溶出。而当功率超过 210 W 后, 细胞进一步破碎, 胞内其他物质也随之溶出, 纤维断裂程度增大, 体系易糊化, 对黄酮的继续溶出造成阻碍^[18]; 随着超声功率的增加, 葡萄糖苷酶抑制率呈现先上升后下降变化趋势, 且在超声功率为 270 W 时, 对葡萄糖苷酶的抑制率最大达到 45.85%。超声功率的逐步增大, 在加强超声波对细胞膜破碎作用的同时, 也加快了物料内部温度上升的速度^[19], 因此过高的功率将使物料内部温度升高, 导致物质失活, 因此体现为 α -葡萄糖苷酶抑制率降低。

2.1.3 剪切频率对黄酮提取量及 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

在料液比 1:30 g/mL, 超声时间 20 min, 提取温度 55 °C, 超声功率 210 W, 每间隔 5 min 剪切 10 s 的条件下研究不同的剪切频率对树莓果渣黄酮提取量及 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响。结果如图 3 所示。

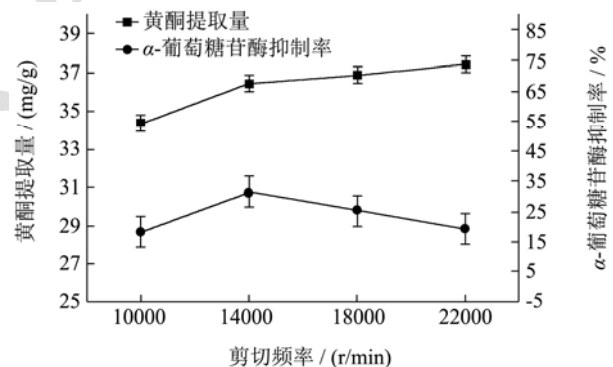


图 3 剪切频率对树莓果渣黄酮提取量及酶抑制率影响

Fig.3 Effect of shear frequency on extraction of flavonoid and enzyme inhibition rate of *Rubus idaeus pmace*

由图 3 可知, 在设定的剪切频率范围内, 随着剪切频率增大, 机械剪切效应增大, 气蚀作用增强, 有利于黄酮物质的溶出, 黄酮提取量呈现持续上升变化趋势; 剪切频率的增加, 同时也易造成物料升温, 活性衰减, 从而导致酶的抑制活性下降。

2.1.4 提取温度对黄酮提取量及 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

在剪切转速 14000 r/min, 每间隔 5 min 剪切 10 s, 超声时间 20 min, 超声功率 210 W, 料液比 1:30 的条件下研究不同的温度对树莓果渣黄酮提取量及 α -葡

糖苷酶抑制率的影响。如图 4 所示。

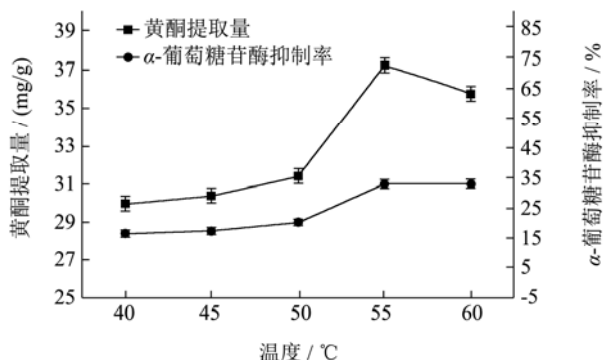


图 4 提取温度对树莓果渣黄酮提取量及酶抑制率影响

Fig.4 Effect of extraction temperature on extraction of flavonoids and enzyme inhibition rate of *Rubus idaeus* pmace

由图 4 可知，随着温度增加，黄酮提取量呈先上升后下降的趋势，在温度为 55 °C 时，达到最大为 37.28 mg/g。这是因为温度增加，物料体系内部温度上升，加快了分子运动速率，促进黄酮物质的溶出。当温度超过 55 °C 以后，黄酮提取量下降，这可能是由于温度过高，导致部分黄酮类物质被氧化^[20]；随着温度上升，葡萄糖苷酶抑制率呈显著上升趋势。当温度到达 55 °C 后，抑制率变化不显著，这可能由于温度过高限制了葡萄糖苷酶本身的活性。

2.1.5 乙醇浓度对黄酮提取量及 α-葡萄糖苷酶抑制率的影响

在剪切频率 14000 r/min，每间隔 5 min 剪切 10 s，在超声处理时间 25 min，提取温度 55 °C，超声功率 210 W 的条件下研究提取液中不同的乙醇溶液对树莓果渣黄酮提取量及 α-葡萄糖苷酶抑制率的影响。结果如图 5 所示。

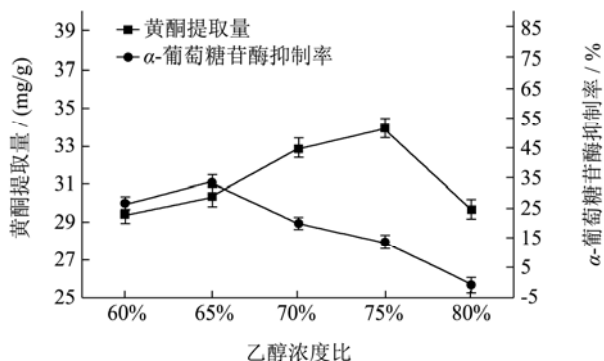


图 5 乙醇浓度对树莓果渣黄酮提取量及酶抑制率影响

Fig.5 Effect of ethanol concentration on extraction of flavonoids and enzyme inhibition rate of *Rubus idaeus* pmace

由图 5 可知，黄酮提取量在乙醇体积浓度比在

75% 时达到最大值。该浓度能够有效将树莓黄酮浸出，该溶剂浓度对于黄酮提取而言极性适宜^[21]、细胞通透性良好^[22]；在设定的乙醇浓度范围内，随着乙醇浓度的升高，α-葡萄糖苷酶抑制率呈现先上升后下降的变化趋势，在 65% 时达到峰值，此时抑制率为 34.53%。随着活性物质的溶出，提取液密度增大，表面张力下降，削弱了超声波的作用，使得活性物质的溶出受到抑制^[23]。

2.2 响应面优化结果

2.2.1 Box-Behnken 中心组合设计试验结果

在单因素试验基础上，选取乙醇浓度 (A)、超声时间 (B)、提取温度 (C) 采用 Box-Behnken 中心组合设计试验，进行三因素三水平的响应面分析。各组树莓黄酮提取量见表 1。

表 1 响应面试验设计结果

Table 1 The results of response surface optimization

试验号	A 乙醇浓度比/%	B 超声时间/min	C 温度/°C	提取量/(mg/mL)
1	75.00	25.00	55.00	39.2046
2	70.00	25.00	50.00	37.9524
3	75.00	35.00	60.00	37.2001
4	70.00	15.00	55.00	36.2704
5	75.00	35.00	50.00	37.2159
6	75.00	25.00	55.00	39.2092
7	75.00	25.00	55.00	39.1756
8	80.00	25.00	50.00	38.1046
9	80.00	25.00	60.00	37.9892
10	70.00	25.00	60.00	38.2659
11	80.00	35.00	55.00	37.0679
12	70.00	35.00	55.00	37.3003
13	80.00	15.00	55.00	36.4648
14	75.00	25.00	55.00	39.3259
15	75.00	25.00	55.00	39.1526
16	75.00	15.00	50.00	36.5695
17	75.00	15.00	60.00	36.5758

利用 Design-Expert 软件进行优化，二次多项式回归拟合，得到综合抑制率对三个因素的回归方程，见下式：

$$Y = 39.21 - 0.020 \times A + 0.36 \times B + 0.023 \times C - 0.11 \times A \times B - 0.11 \times A \times C - 5.525E-003 \times B \times C - 0.62 \times A^2 - 1.81 \times B^2 - 0.51 \times C^2$$

表2 方差分析结果

Table 2 Analysis of variance for quadric regression mode

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	18.95	9	2.11	364.92	<0.0001	**
A	3.180E-003	1	3.180E-003	0.55	0.4820	
B	1.05	1	1.05	182.66	<0.0001	**
C	4.306E-003	1	4.306E-003	0.75	0.4163	
AB	0.046	1	0.046	7.89	0.0262	*
AC	0.047	1	0.047	8.08	0.0249	*
BC	1.221E-004	1	1.221E-004	0.021	0.8884	
A ²	1.64	1	1.64	284.73	<0.0001	**
B ²	13.84	1	13.84	2398.92	<0.0001	**
C ²	1.10	1	1.10	189.93	<0.0001	**
残差	0.040	7	5.770E-003			
失拟项	0.023	3	7.504E-003	1.68	0.3076	
纯误差	0.018	4	4.469E-003			
总和	18.99	16				
R ²	0.9979					
Adj.R ²	0.9951					
Pred.R ²	0.9796					
变异系数	0.20					

注: *表示差异显著, $p < 0.05$, **表示差异及其显著, $p < 0.01$ 。

2.2.2 Design-Expert 软件进行方差分析

方差分析结果如表 2 所示。由表 2 数据可知, P ($Pr > F$) < 0.0001 , 表明模型效应极显著, 且拟合度良好。且模型 $R^2 = 0.9979$, 说明该模型可解释绝大部分实验数据。此外, 失拟项 F 值相对于绝对误差不显著, 该回归模型合理, 可用此方程预测不同条件下的树莓果渣黄酮提取量。由 F 值可以看出, 影响树莓果渣黄酮提取工艺的各因素主效关系为超声时间 (B) $>$ 提取温度 (C) $>$ 乙醇浓度 (A), 其中, 超声时间的影响显著。AB、AC 的 P 值均小于 0.05, BC 大于 0.05, 说乙醇浓度与超声时间、乙醇浓度与提取温度对响应值交互作用明显 ($p < 0.05$), 超声时间与提取温度对响应值交互作用不明显 ($p > 0.05$)。

2.2.3 响应面图和等高线图分析

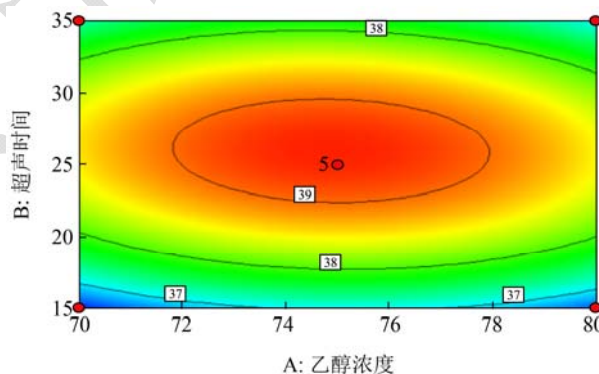
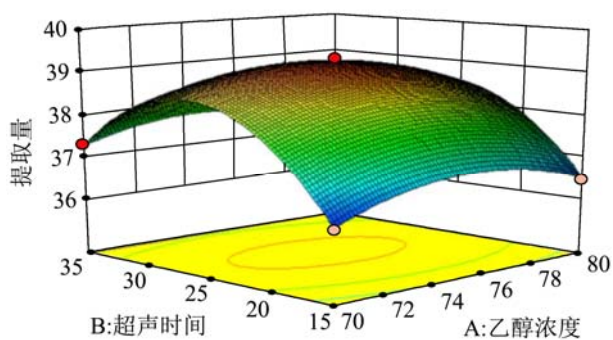


图 6 超声时间和乙醇浓度对黄酮提取量的交互影响

Fig.6 The interaction of ultrasonic time and ethanol concentration on flavonoid extraction

图 6~8 得出乙醇浓度(A)、超声时间(B)、温度(C)三因素的交互作用对树莓果渣黄酮提取量的影响。在所选两因素范围内响应面存在最高点, 即树莓果渣黄酮提取量极值^[24]。在超声时间 15~35 min、乙醇浓度 70%~80%范围内, 黄酮提取量在乙醇浓度 75%、超声时间 25 min 附近值对黄酮提取量有重要影响, 两因素交互作用显著, 超声时间对黄酮提取量作用比乙醇浓度更显著。结论与方差分析结果相符; 在温度 50~60 °C、乙醇浓度 70%~80%范围内, 黄酮提取量在温度 55 °C、乙醇浓度 75%附近值对黄酮提取量有重要影响, 两因素交互作用不显著; 在温度 50~60 °C、

超声时间 15~35 min 范围内, 黄酮提取量在温度 55 °C、超声时间 25 min 附近值对黄酮提取量有重要影响, 两因素交互作用显著, 且超声时间影响更显著。

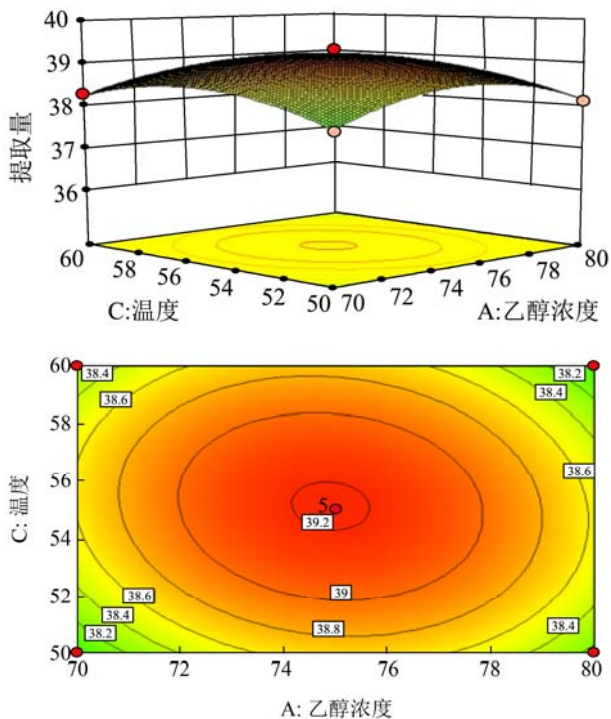


图7 提取温度和乙醇浓度对黄酮提取量的交互影响

Fig.7 The interaction of extraction temperature and ethanol concentration on flavonoids extraction

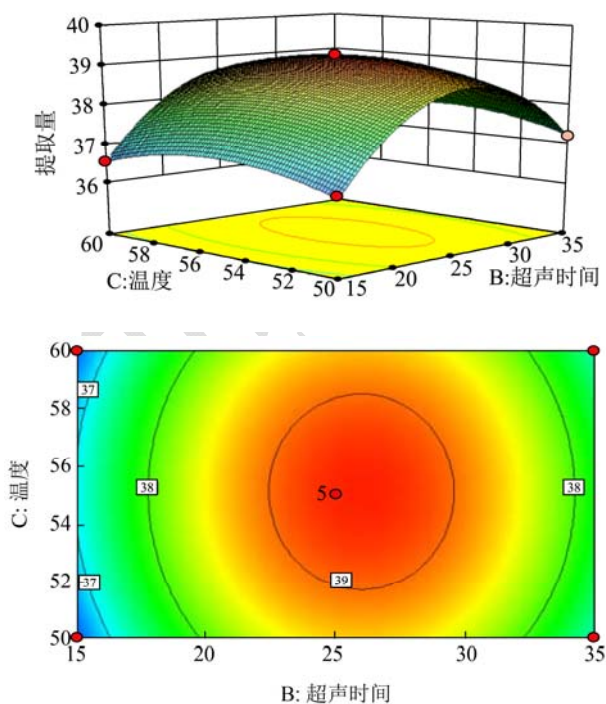


图8 提取温度和超声时间对黄酮提取量的交互影响

Fig.8 The interaction of extraction temperature and ultrasonic time on flavonoid extraction

2.3 最佳提取工艺条件的确定和回归模型验证试验结果

据所建立的数学模型进行参数最优分析, 得到预测最佳工艺条件: 乙醇浓度为 74.87%, 超声时间为 26.01 min, 温度为 55.12 °C, 此时黄酮的提取量可达 39.2324 mg/g。考虑到实际操作可行性, 将工艺条件修正为乙醇浓度为 75%, 超声时间为 26 min, 温度为 55 °C, 此时黄酮的提取量为 39.27±0.16 (mg/g), 与理论值接近; α-葡萄糖苷酶抑制率为(65.56±0.11)%。

2.4 超声协同高剪切法与其他方法的提取效果比较

在其他条件一致的条件下, 比较超声波协同高剪切法与其他方法的提取, 结果如图9所示。

由图9可知, 就黄酮提取量而言, 超声波与高剪切两种工艺共同使用时, 提取量较单一使用时有显著提高, 但不成加和关系, 两种工艺的协同作用能使提取量及α-葡萄糖苷酶抑制率均显著提高, 与单独使用超声波工艺、高剪切工艺及双工艺顺次进行相比, 树莓果渣黄酮提取量分别增多 117.45%、112.17%、88.44%; 提取物α-葡萄糖苷酶抑制率分别提升 47.85%、43.79%、12.62%。两工艺的协同使用, 既加速了破壁效果, 促进了黄酮类物质的溶出, 又避免了长时间使用高剪切机所造成的局部过热对黄酮类物质的破坏, 该法是一种可有效节约能源、成本, 提高产品质量的提取方法。

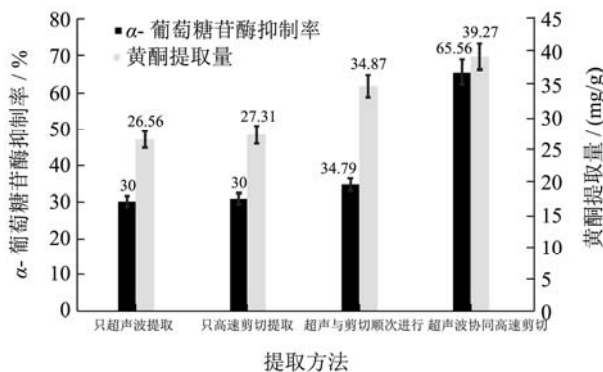


图9 几种方法提取结果的对比柱状图

Fig.9 Comparison of several methods to extract the results of the histogram

3 结论

3.1 响应面优化实验以及回归模型综合分析得出超声波协同高剪切法提取树莓果渣黄酮的最优工艺为:

乙醇浓度为 75%，超声时间为 26 min，温度为 55 ℃，超声功率 210 W，剪切频率 14000 r/min，料液配比 1:30。此工艺条件下黄酮提取量为(39.27±0.16) mg/g， α -葡萄糖苷酶抑制率为(65.56±0.11)%，通过方法间比较验证了该法在提取效率及活性保持方面具备显著优势。

3.2 果渣中黄酮类物质的高效提取，为降糖物质制备提供新途径。目前高剪切乳化技术及超声波辅助提取技术成熟，均已独立运用于食品领域中，两者的协同使用，效果显著，工业实现程度高。本研究考察二者协同作用对于树莓果渣黄酮提取量及降血糖活性的影响，发现提升树莓黄酮的提取量及对 α -葡萄糖苷酶的抑制率的同时，显著地降低了能耗，缩短了提取时间。通过双工艺组合设计超声与高速剪切型非标设备，可高效获得活性较强的提取产物，对树莓加工产业链延长，残渣高效利用的产业化推广应用具有良好的指导意义。

参考文献

- [1] 赵文琦,曲长福,王翠华,等.树莓的营养保健价值与市场前景浅析[J].北方园艺,2007,6:114-115
ZHAO Wen-qi, QU Chang-fu, WANG Cui-hua, et al. Analysis on the nutritional health value and market prospect of raspberry [J]. Northern Gardening, 2007, 6: 114-115
- [2] Dvaranauskaitė A, Venskutonispr, Labokas J. Radical scavenging activity of raspberry (*Rubus idaeus* L.) fruit extracts [J]. Acta Alimentaria, 2006, 35(1): 73-83
- [3] 王竹,阳淑.树莓开发前景巨大[J].四川农业科技,2008,12:13
WANG Zhu, YANG Shu. Raspberry development prospects are huge [J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2008, 12: 13
- [4] 李萌萌,焦天慧,吕长鑫.红树莓籽中黄酮提取工艺及抗氧化活性研究[J].中国食品学报,2017,17(2):101-109
LI Meng-meng, JIAO Tian-hui, LYU Chang-xin. Extraction technology and antioxidant activity of flavonoids from red raspberry seeds [J]. Chinese Journal of Food Sciences, 2017, 17(2): 101-109
- [5] 旷慧,王金玲,姚丽敏,等.6种东北地区红树莓果渣提取物的抗氧化活性差异[J].食品科学,2016,37(1):63-68
KUANG Hui, WANG Jin-ling, YAO Li-min, et al. differences in antioxidant activities of six extracts from red raspberry pulp in northeast China [J]. Food Science, 2016, 37(1): 63-68
- [6] 曾岚.甘草中 α -葡萄糖苷酶抑制物质的提取、纯化和结构研究[D].广州:华南理工大学,2012
ZENG Lan. Extraction, purification and structure of α -glucosidase inhibitors in licorice [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012
- [7] 孟志芬,董彩霞,人多胜.酶法提取香椿叶中总黄酮的工艺研究[J].光谱实验室,2005,22(5):1086-1089
MENG Zhi-fen, DONG Cai-xia, REN Duo-sheng. Enzymatic extraction of total flavonoids from *Toona sinensis* leaves [J]. Spectroscopic Laboratory, 2005, 22(5): 1086-1089
- [8] 陈海敏,严小军,林伟. α -葡萄糖苷酶抑制剂类药物的研究进展[J].海洋科学,2005,11:73-76
CHEN Hai-min, YAN Xiao-jun, LIN Wei. Research progress of α -glucosidase inhibitors [J]. Ocean Science, 2005, 11: 73-76
- [9] 俞浩,毛斌斌,周国梁,等.白背三七总黄酮对糖尿病大鼠的降血糖作用[J].食品科学,2013,34(15):295-298
YU Hao, MAO Bin-bin, ZHOU Guo-liang, et al. Hypoglycemic effect of total flavonoids from *Panax notoginseng* on diabetic rats [J]. Food Science, 2013, 34(15): 295-298
- [10] 芦宇,纪秀凤,吕长鑫,等.大孔树脂纯化红树莓籽黄酮及其体外结合胆酸盐能力评价[J].食品工业科技,2018,39(23):7-11
LU Yu, JI Xiu-feng, LYU Chang-xin, et al. Purification of flavonoids from red raspberry seeds by macroporous resin and its ability to bind cholate *in vitro* [J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(23): 7-11
- [11] 纪秀凤,吕长鑫,芦宇.红树莓籽黄酮微胶囊工艺优化及其体外模拟胃肠消化[J].食品工业科技: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20180919.0938.010.html>
JI Xiu-feng, LYU Chang-xin, LU Yu. Optimization of red raspberry seed flavonoid microcapsules and its *in vitro* simulated gastrointestinal digestion [J]. Food Industry Technology: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20180919.0938.010.html>
- [12] 李萌萌,焦天慧,吕长鑫,等.红树莓籽中黄酮提取工艺及抗氧化活性研究[J].中国食品学报,2017,17(2):101-109
LI Meng-meng, JIAO Tian-hui, LYU Chang-xin, et al. Study on extraction process and antioxidant activity of flavonoids from red raspberry seeds [J]. Chinese Journal of Food Science, 2017, 17(2): 101-109
- [13] 李萌萌,吕长鑫,芦宇,等.纤维素酶辅助提取红树莓籽黄酮及其对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制作用[J].中国食品学报,2017,17(11):99-107
LI Meng-meng, LYU Chang-xin, LU Yu, et al.

- Cellulase-assisted extraction of red raspberry seed flavonoids and their inhibition on α -glucosidase and α -amylase [J]. Chinese Journal of Food Science, 2017, 17(11): 99-107
- [14] 杨诗斌,徐凯,张志森.高剪切及高压均质机理研究及其在食品工业中的应用[J].粮油加工与食品机械,2002,4:33-35
YANG Shi-bin, XU Kai, ZHANG Zhi-sen. Research on homogeneity mechanism of high shear and high pressure and its application in food industry [J]. Grain and Oil Processing and Food Machinery, 2002, 4: 33-35
- [15] 赵玉红,林洋,张立钢,等.黑木耳多糖高剪切分散乳化法与酶法提取的比较研究[J].食品与机械,2016,32(4):181-186
ZHAO Yu-hong, LIN Yang, ZHANG Li-gang, et al. Comparative study on high shear dispersion emulsification and enzymatic extraction of polysaccharide from *Auricularia auriculata* [J]. Food and Machinery, 2016, 32(4): 181-186
- [16] 符群,王梦丽,李卉,等.高速剪切-超声联合提取鸡树条菜蒎果降血糖成分的工艺研究[J].现代食品科技,2018,34(11): 157-164
FU Qun, WANG Meng-li, LI Hui, et al. Study on the technology of high-speed shear-ultrasonic extraction of hypoglycemic components from viburnum [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(11): 157-164
- [17] 符群,李卉,王振宇,等.减压-超声辅助醇法提取薇菜黄酮及其对抗氧化活性的影响[J].现代食品科技,2018,34(3):113-120,130
FU Qun, LI Hui, WANG Zhen-yu, et al. Extraction of flavonoids from *Osmanthus chinensis* by decompression and ultrasonic assisted alcohol method and its antioxidative activity [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(3): 113-120, 130
- [18] 黄国霞,黄姿梅,汪青,等.高剪切乳化技术在柚子皮总黄酮提取中的应用[J].中国食品添加剂,2017,10:124-129
HUANG Guo-xia, HUANG Zi-mei, WANG Qing, et al. Application of high shear emulsification technology in extraction of total flavonoids from grapefruit peel [J]. Chinese Food Additives, 2017, 10: 124-129
- [19] 苏尧尧,童群义.超声微波协同萃取垂柳叶中 α -葡萄糖苷酶抑制剂的研究[J].食品工业科技,2014,35(2):235-238,241
SU Yao-yao, TONG Qun-yi. Ultrasonic-microwave synergistic extraction of α -glucosidase inhibitors from weeping willow leaves [J]. Food Industry Technology, 2014, 35(2): 235-238, 241
- [20] 黄国霞,黄姿梅,汪青,等.高剪切乳化技术在柚子皮总黄酮提取中的应用[J].中国食品添加剂,2017,10:124-129
HUANG Guo-xia, HUANG Zi-mei, WANG Qing, et al. Application of high shear emulsification technology in extraction of total flavonoids from grapefruit peel [J]. China Food Additives, 2017, 10: 124-129
- [21] 范铭,刘哲,曹艳,等.不同干燥方式对桑葚渣提取物主要活性成分及 α -淀粉酶抑制活性的影响[J].浙江农业科学,2018, 59(10):1911-1914,1916
FAN Ming, LIU Zhe, CAO Yan, et al. Effects of different drying methods on main active components and α -amylase inhibitory activity of mulberry extracts [J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(10): 1911-1914, 1916
- [22] 阙淼琳,蒋玉蓉,曹美丽,等.响应面试验优化藜麦种子多酚提取工艺及其品种差异[J].食品科学,2016,37(4):7-12
QUE Miao-lin, JIANG Yu-rong, CAO Mei-li, et al. Optimization of polyphenol extraction process and variety of buckwheat seeds by response surface methodology [J]. Food Science, 2016, 37(4): 7-12
- [23] 苏尧尧.垂柳叶 α -葡萄糖苷酶抑制剂的分离及活性研究[D].无锡:江南大学,2014
SU Yao-yao. Isolation and activity of α -glucosidase inhibitor from weeping willow leaf [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014
- [24] 刘帅,高丽莉,潘丹阳,等.响应面法优化薏苡仁油微波辅助提取工艺[J].食品工业科技,2015,8:145-150
LIU Shuai, GAO Li-li, PAN Dan-yang, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of *Coix* seed oil by response surface methodology [J]. Food Industry Technology: 2015, 8: 145-150

(上接第 252 页)

- [27] 王永菲,王成国.响应面法的理论与应用[J].中央民族大学学报(自然科学版),2005,14(3):236-240
WANG Yong-fei, WANG Cheng-guo. Theory and application of response surface methodology [J]. Journal of Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2005, 14(3): 236-240
- [28] 顾仁勇,杨万根.响应面试验优化低盐湘西腊肉复配防腐剂的配方[J].食品科学,2015,36(22):46-50
GU Ren-yong, YANG Wan-gen. Optimizing the formulation of low salt preservatives for Xiangxi bacon by response test [J]. Food Science, 2015, 36(22): 46-50