

芦荟炒制品中总黄酮提取工艺优化 及抗氧化活性研究

Optimization of extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from *Aloe vera* stir-fry products

曾令琴 郭江涛 刘杰 陈正远 徐佳红

ZENG Lingqin GUO Jiangtao LIU Jie CHEN Zhengyuan XU Jiahong

(贵州中医药大学药学院, 贵州 贵阳 550025)

(School of Pharmacy, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang, Guizhou 550025, China)

摘要:目的:优化芦荟炒制品中总黄酮提取工艺,并探讨其抗氧化活性。方法:采用单因素试验和响应面法优化提取工艺,运用紫外分光光度法测定不同产地芦荟生品与炒制品中总黄酮含量,通过 DPPH $\cdot$ 、ABTS $^{+}$ $\cdot$ 、 $\cdot$ OH 及 FRAP 法研究其抗氧化活性,并通过 Pearson 相关系数分析总黄酮得率与抗氧化活性的相关性。结果:芦荟炒制品中总黄酮的最佳提取工艺为浸泡时间 3 h、超声时间 15 min、乙醇体积分数 60%、料液比 1:10 (g/mL)。炒制后,芦荟中总黄酮含量有所提高,8 个产地芦荟生品与炒制品总黄酮对 4 种自由基均具有一定的清除作用,且与其浓度呈正相关,具有良好的抗氧化活性。相关性分析表明抗氧化能力与总黄酮得率均呈显著相关性。结论:优选的芦荟炒制品中总黄酮提取工艺合理可行,且具有较强的抗氧化活性。

关键词:芦荟;炒制品;总黄酮;提取工艺;响应面优化;抗氧化活性

Abstract: Objective: To optimize the extraction process of total flavonoids from *Aloe vera* stir-fry products and investigate its antioxidant activity. Methods: Single factor test and response surface method were used to optimize the extraction process. The content of total flavonoids in *Aloe vera* raw and fried products from different areas was determined by UV spectrophotometry. The antioxidant activity was studied by DPPH $\cdot$, ABTS $^{+}$ $\cdot$,

$\cdot$ OH and FRAP methods. The correlation between total flavonoids yield and antioxidant activity was analyzed by Pearson correlation. Results: The optimal extraction conditions were as follows soaking time 3 h, ultrasonic time 15 min, ethanol volume fraction 60% and solid-liquid ratio 1:10 (g/mL). The content of total flavonoids in *Aloe vera* increased. The total flavonoids of *Aloe vera* raw and fried products from 8 producing areas had certain scavenging effect on four kinds of free radicals, and the concentration was positively correlated with that of *Aloe vera*, showing good antioxidant activity. Correlation analysis showed that antioxidant capacity was significantly correlated with total flavonoid yield. Conclusion: The optimized extraction process of total flavonoids from *Aloe vera* stir-fried products is reasonable and feasible, and has strong antioxidant activity.

Keywords: *Aloe vera*; fried products; total flavonoids; extraction process; response surface optimization; antioxidant activity

芦荟(*Aloe vera*)为百合科多年生常绿草本植物,富含多糖、有机酸、蛋白质等多种营养物质,被誉为“21 世纪最佳保健食品之一”和纯天然抗氧化剂^[1]。芦荟种类繁多,具有代表性品种有库拉索芦荟(*Aloe barbadensis* Miller)、中华芦荟[*Aloe vera* L. var. *chinensis* (Haw.) Berger]和好望角芦荟(*Aloe ferox* Miller)^[2]等。研究^[3-6]发现,芦荟具有抗氧化、抗癌、抑菌、降血糖等药理作用,含有丰富的生物活性成分,具有较高的药用价值和市场开发前景,被广泛应用于医药、食品工业、化妆品、绿化等领域。

黄酮类化合物是一类多酚类物质,抗氧化能力显著,同时具有抗衰老、抗癌、降低胆固醇、降血糖及抗炎等多种功效,能有效缓解机体内因自由基过量造成的氧化损伤,预防多种疾病^[7-8]。芦荟中黄酮类化合物主要包括

基金项目:国家自然科学基金委员会—贵州省人民政府联合基金(编号:U1812403-2);贵州省科技计划项目(课题)(编号:黔科合基础-ZK[2022]—一般 463)

作者简介:曾令琴,女,贵州中医药大学在读硕士研究生。

通信作者:郭江涛(1987—),男,贵州中医药大学副教授,博士。

E-mail:605149529@qq.com

刘杰(1985—),女,贵州中医药大学副教授,博士。

E-mail:271247239@qq.com

收稿日期:2022-11-11 **改回日期:**2023-06-01

槲皮素和芦丁^[9]。目前,有关芦荟总黄酮提取工艺与抗氧化活性的研究主要集中在单个产地芦荟^[6,10-11],但芦荟产地来源广泛,单产地工艺优化代表性不强,而对不同产地不同品种芦荟炒制品中总黄酮含量及抗氧化的研究尚未见报道。研究拟采用响应面法优化不同产地芦荟炒制品中总黄酮提取工艺,同时通过比较不同产地芦荟炒制品与生品的抗氧化能力,探讨芦荟炒制品与生品抗氧化能力的差异,以期为芦荟抗氧化产品的研究开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

芦荟药材:产地信息见表 1;

芦丁对照品:批号 AF0022322,纯度 $\geq 98\%$,成都埃法生物科技有限公司;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):分析纯,上海梯希爱化成工业发展有限公司;

2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS):分析纯,湖北正兴源精细化工有限公司;

2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

硫酸亚铁、过氧化氢、过硫酸钾、三氯化铁、醋酸钠、冰醋酸、硝酸铝、氢氧化钠、亚硝酸钠、水杨酸等均为国产分析纯。

表 1 芦荟药材产地信息

Table 1 Origin information of *Aloe vera*

序号	样品	产地
1	非洲库拉索	非洲
2	非洲好望角	非洲
3	印尼好望角	印尼
4	望津山好望角	望津山
5	印度库拉索	印度
6	广东好望角	广东
7	四川库拉索	四川
8	委内瑞拉库拉索	委内瑞拉

1.2 仪器与设备

紫外可见分光光度计:TU-1810 型,北京普析通用仪器有限公司;

超声波清洗仪:SK8200H 型,上海科导超声仪器有限公司;

真空干燥箱:DZF-6020 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;

万分之一电子天平:FA2204N 型,上海菁海仪器有限公司;

数显恒温水浴锅:DRHH-S4 型,上海双捷试验设备

有限公司;

高速多功能粉碎机:RRH-A400 型,上海缘沃工贸有限公司。

1.3 方法

1.3.1 芦荟炒制品制备 称取芦荟粉末 80.0 g,用中火炒至表面焦黑色,并透出焦香气,取出、放凉,研制成粉末并过 3 号筛,得芦荟炒制品,备用。

1.3.2 芦丁标准曲线绘制 精密称取芦丁对照品适量,无水乙醇溶解,配制成 0.4 mg/mL 芦丁对照品溶液。精密吸取芦丁对照品系列浓度于 25 mL 容量瓶,加入 6.0 mL 无水乙醇,1 mL 质量分数为 5% 的 NaNO_2 溶液和 1 mL 质量分数为 10% 的 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液,反应 6 min,加入 10 mL 1 mol/L 的 NaOH 溶液,无水乙醇定容,测定 510 nm 处吸光度,绘制标准曲线 $Y = 11.88X + 0.0876$, $R^2 = 0.9998$ 。

1.3.3 总黄酮含量测定 将浸泡好的芦荟生品与炒制品超声 15 min,过滤,用相应体积分数乙醇定容,取 0.5 mL,以等体积无水乙醇为对照,测定溶液中总黄酮含量,并按式(1)计算总黄酮得率。

$$Y = \frac{c \times N \times V}{m \times 100} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y——总黄酮得率,%;

c——总黄酮质量浓度,mg/mL;

N——稀释倍数;

V——取样体积,mL;

m——样品质量,g。

1.3.4 单因素试验 称取芦荟炒制品 1.0 g 于锥形瓶中,在超声频率 40 kHz 下,固定浸泡时间 3 h,料液比 1:10 (g/mL),超声时间 15 min,乙醇体积分数 60%,分别考察浸泡时间(1,2,3,4,5 h)、超声时间(10,15,20,25,30 min)、乙醇体积分数(50%,60%,70%,80%,90%)、料液比[1:5,1:10,1:15,1:20,1:25 (g/mL)]对总黄酮得率的影响。

1.3.5 响应面优化试验 基于单因素试验结果,选取乙醇体积分数、浸泡时间、超声时间、料液比为自变量,总黄酮得率为响应值,利用 Design-Expert V8.0.6.1 进行试验设计,优化总黄酮提取工艺。

1.3.6 抗氧化活性测定

(1) 待测样品溶液配制:分别称取芦荟生品与炒制品 0.4 g,无水乙醇稀释,配制质量浓度为 16 mg/mL 的母液。量取 0.2,0.3,0.4,0.5,0.6 mL 母液,用无水乙醇稀释成 0.32,0.48,0.64,0.80,0.96 mg/mL 5 个浓度待测样品溶液,以维生素 C 溶液作为阳性对照。

(2) DPPH·清除能力测定:取 2 mL 系列浓度样品于 10 mL 容量瓶中,加入 3 mL 1 mmol/mL 的 DPPH 溶

液,反应 30 min,测定 517 nm 处吸光度;用无水乙醇代替样品溶液为空白,无水乙醇代替 DPPH 溶液为对照,并按式(2)计算 DPPH·清除率。

$$D = \frac{A_c - (A_i - A_j)}{A_c} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

D ——DPPH·清除率,%;

A_c ——空白对照吸光度;

A_i ——样品组吸光度;

A_j ——样品对照组吸光度。

(3) ABTS⁺·清除能力测定:将 7 mmol/L 的 ABTS⁺溶液和 2.45 mmol/L 的 K₂S₂O₈ 溶液混合,避光 16 h,稀释 ABTS⁺,使其在 734 nm 处吸光度为 0.7 ± 0.02,得 ABTS⁺母液。取 0.5 mL 待测样品于 10 mL 棕色容量瓶中,加入 3.5 mL ABTS⁺溶液,反应 6 min 后测定 734 nm 处吸光度,以无水乙醇为空白调零,平行 3 次,维生素 C 为阳性对照组,按式(3)计算 ABTS⁺·清除率。

$$A = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

A ——ABTS⁺·清除率,%;

A_0 ——空白对照吸光度;

A_1 ——样品吸光度;

A_2 ——样品对照吸光度。

(4) 铁还原抗氧化能力测定:取 1.0 mL 不同浓度 (0.031 25, 0.062 5, 0.125 0, 0.250 0, 0.500 0, 1.000 0 mmol/L) 的 FeSO₄ 标准溶液于 5 mL 容量瓶中,加入 3.0 mL FRAP 溶液混匀,37 °C 水浴 30 min,空白溶液为无水乙醇,测定 593 nm 处吸光度,建立 FeSO₄ 浓度与吸光度值的回归方程为 $y = 2.022 3x + 0.377 9$ ($R^2 = 0.998 7$)。另取 1 mL 样品溶液按标准曲线法操作,每个样品测定 3 次,计算其总抗氧化能力。

(5) OH·清除能力测定:取 1.0 mL 待测样品溶液,加入 7.0 mmol/L FeSO₄ 和 7.0 mmol/L 水杨酸—乙醇溶液,8.8 mmol/L H₂O₂ 溶液各 1.0 mL,反应 30 min,测定 510 nm 处吸光度,以蒸馏水为空白对照,维生素 C 为阳性对照组,并按式(4)计算 OH·清除率。

$$H = \frac{A_0 - (A_x - A_{x0})}{A_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

H ——OH·清除率,%;

A_0 ——空白对照组吸光度;

A_x ——样品组吸光度;

A_{x0} ——样品对照组吸光度。

1.3.7 数据统计与分析 采用 Excel 2016 与 Origin 2021 软件作图,采用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 浸泡时间 由图 1 可知,总黄酮得率随浸泡时间的延长呈先上升后下降趋势,3 h 时总黄酮得率最高,可能是前期初始阶段溶剂充分迅速包裹样品,有助于黄酮类物质溶出,提取液中总黄酮得率上升;但浸泡时间过长,样品在提取液中逐渐沉降,也可能存在黄酮类物质结构被破坏或其他杂质类物质渗出竞争溶剂,影响黄酮类物质溶出^[12-13]。因此,最佳浸泡时间为 3 h。

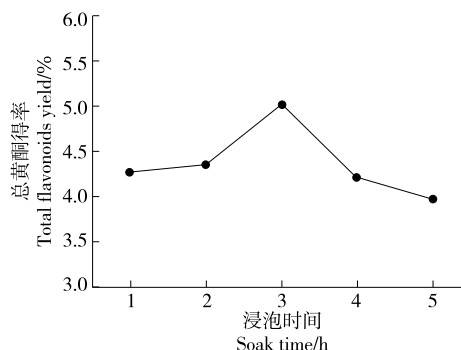


图 1 浸泡时间对总黄酮得率的影响

Figure 1 The effect of total flavonoids yield on soak time

2.1.2 超声时间 由图 2 可知,总黄酮得率随超声时间的延长先增大后减小,超声 15 min 时最高,可能是黄酮类物质大多存在于芦荟炒制品的细胞膜中,在超声波的作用下,植物细胞壁作用增强,其细胞结构被破坏,有利于总黄酮的溶出^[14]。继续延长超声时间,总黄酮得率缓慢下降,可能是长时间的空化效应和机械作用造成黄酮化合物结构被损坏^[15],或是在长时间的超声波作用下,提取物分子结构被破坏,导致其降解转化不再溶出,也有可能是黄酮的溶出率达到了动态平衡,溶出的总黄酮物质发生的氧化、分解速度逐渐增加所致^[16]。因此,选择最佳超声时间为 15 min。

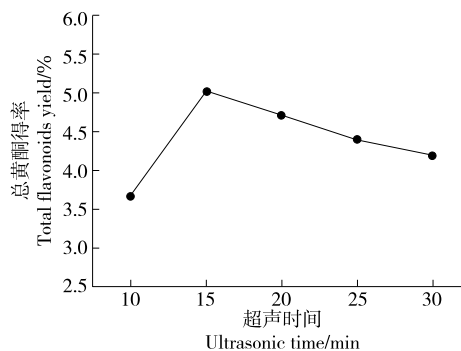


图 2 超声时间对总黄酮得率的影响

Figure 2 The effect of total flavonoids yield on ultrasonic time

2.1.3 乙醇体积分数 由图 3 可知,总黄酮得率随乙醇体积分数的增加呈先上升后下降趋势,当乙醇体积分数为 60%时,总黄酮得率最高。这可能与物质溶出和溶剂极性有关,样品中物质的极性与 60%乙醇溶液的接近,当乙醇体积分数为 60%时溶出总黄酮类物质较多,其得率较高;当乙醇体积分数>60%时,溶剂极性减小,导致某些物质沉淀,阻碍了部分黄酮苷的溶解,并造成其他醇溶性杂质及色素等物质的溶出逐渐增多,从而加速醇溶性物质与黄酮类物质竞争溶出,抑制总黄酮物质的溶出^[17],导致总黄酮得率降低^[18]。因此,选择最佳乙醇体积分数为 60%。

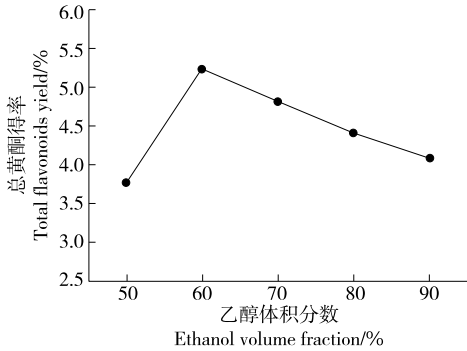


图 3 乙醇体积分数对总黄酮得率的影响

Figure 3 The effect of total flavonoids yield on ethanol volume fraction

2.1.4 料液比 由图 4 可知,总黄酮得率随料液比的增大呈先上升后下降趋势,当料液比为 1:10 (g/mL)时,总黄酮得率最大,随后略有下降。这可能是前期料液比太小,溶剂不足,固液接触面积较少,芦荟炒制品中黄酮类物质溶出不充分;当料液比为 1:10 (g/mL)时能充分包裹样品,利于总黄酮类物质的溶出,总黄酮得率提高;当料液比达到一定程度时,总黄酮类物质基本溶出,扩散达到平衡,此时若继续增加溶剂剂量,不仅容易造成非黄酮类杂质溶出量增加,阻碍总黄酮物质的溶出,还会造成溶剂浪费,从而加重后续浓缩负担^[19]。因此,选取最佳液料比为 1:10 (g/mL)。

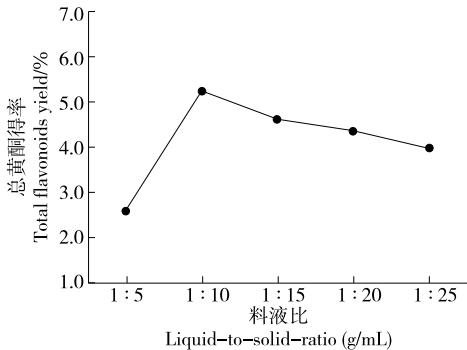


图 4 料液比对总黄酮得率的影响

Figure 4 The effect of total flavonoids yield on liquid-to-solid-ratio

2.2 响应面优化

2.2.1 响应面优化试验结果分析 在单因素试验基础上,选取乙醇体积分数、浸泡时间、超声时间、料液比为自变量,总黄酮得率为响应值,进行四因素三水平响应面优化试验,试验因素水平见表 2,试验设计及结果见表 3。

表 2 响应面试验因素与水平

Table 2 Response surface test factors and levels				
水平	A 乙醇体积分数/%	B 浸泡时间/h	C 超声时间/min	D 料液比 (g/mL)
-1	50	2	10	1:5
0	60	3	15	1:10
1	70	4	20	1:15

表 3 响应面设计及结果

Table 3 Response surface design scheme and results					
试验号	A	B	C	D	总黄酮得率/%
1	-1	-1	0	0	4.28
2	1	-1	0	0	4.21
3	-1	1	0	0	4.05
4	1	1	0	0	4.29
5	0	0	-1	-1	3.92
6	0	0	1	-1	3.59
7	0	0	-1	1	4.60
8	0	0	1	1	4.52
9	-1	0	0	-1	3.67
10	1	0	0	-1	3.83
11	-1	0	0	1	4.23
12	1	0	0	1	4.56
13	0	-1	-1	0	3.97
14	0	1	-1	0	4.23
15	0	-1	1	0	4.19
16	0	1	1	0	4.05
17	-1	0	-1	0	4.25
18	1	0	-1	0	3.55
19	-1	0	1	0	4.04
20	1	0	1	0	3.93
21	0	-1	0	-1	4.03
22	0	1	0	-1	3.92
23	0	-1	0	0	4.70
24	0	1	0	0	4.56
25	0	0	0	-1	5.33
26	0	0	0	-1	5.37
27	0	0	0	-1	5.11
28	0	0	0	-1	5.26
29	0	0	0	-1	5.37

对响应面试验数据进行回归分析,得各因素与响应值的多元回归方程:

$$Y=5.29-0.012\ 5A-0.023\ 3B-0.016\ 7C+0.350\ 8D+0.077\ 5AB+0.147\ 5AC+0.042\ 5AD-0.100\ 0BC-0.007\ 5BD+0.062\ 5CD-0.664\ 8A^2-0.466\ 1B^2-0.671\ 1C^2-0.509\ 8D^2。$$

2.2.2 回归模型方差分析 由表 4 可知,回归模型 $P<0.000\ 1$,极显著;失拟项 $P=0.159\ 0>0.05$,不显著,表明方程模型与试验拟合程度好。一次项 D 极显著($P<0.001$),二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 和 D^2 均极显著($P<0.001$)。由 F 值可知,各因素对芦荟炒制品中总黄酮得率的影响顺序为 $A<C<B<D$ 。

由图 5 可知,交互项 AB、AC、AD、BC、BD 和 CD 的响应曲面坡度较陡峭,且等高线呈椭圆形或马鞍形,说明各因素交互作用均显著,对总黄酮得率的影响较大,与方差分析结果吻合。

2.2.3 工艺验证 根据响应面回归模型,以最大得率为目标,预测最佳总黄酮提取工艺条件为浸泡时间 2.97 h,超声时间 15.03 min,乙醇体积分数 60.00%,料液比 1:11.72 (g/mL),此条件下总黄酮得率为 5.3%。为了验证预测值的准确性,同时兼顾操作的方便性,将最佳工艺条件调整为浸泡时间 3 h、超声时间 15 min、乙醇体积分数 60%、料液比 1:10 (g/mL),在此工艺条件下进行 3 次平行验证实验,测得芦荟炒制品中总黄酮得率为 5.37%,与

表 4 方差分析[†]

Table 4 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	7.460	14	0.533	19.02	<0.000 1	* *
A	0.002	1	0.002	0.07	0.799 6	
B	0.006	1	0.006	0.23	0.636 6	
C	0.003	1	0.003	0.12	0.735 3	
D	1.480	1	1.480	52.72	<0.000 1	* *
AB	0.024	1	0.024	0.86	0.370 1	
AC	0.087	1	0.087	3.11	0.099 8	
AD	0.007	1	0.007	0.26	0.619 5	
BC	0.040	1	0.040	1.43	0.252 0	
BD	0.000	1	0.000	0.01	0.929 9	
CD	0.016	1	0.016	0.56	0.467 5	
A ²	2.870	1	2.870	102.35	<0.000 1	* *
B ²	1.410	1	1.410	50.30	<0.000 1	* *
C ²	2.920	1	2.920	104.28	<0.000 1	* *
D ²	1.690	1	1.690	60.19	<0.000 1	* *
残差	0.392	14	0.028			
失拟项	0.345	10	0.035	2.89	0.159 0	不显著
纯误差	0.048	4	0.012			
总和	7.850	28				

[†] * 为差异显著($P<0.05$); * * 为差异极显著性($P<0.001$); $R^2=0.950\ 0$; $R_{adj}^2=0.900\ 1$; $CV=3.86\ %$ 。

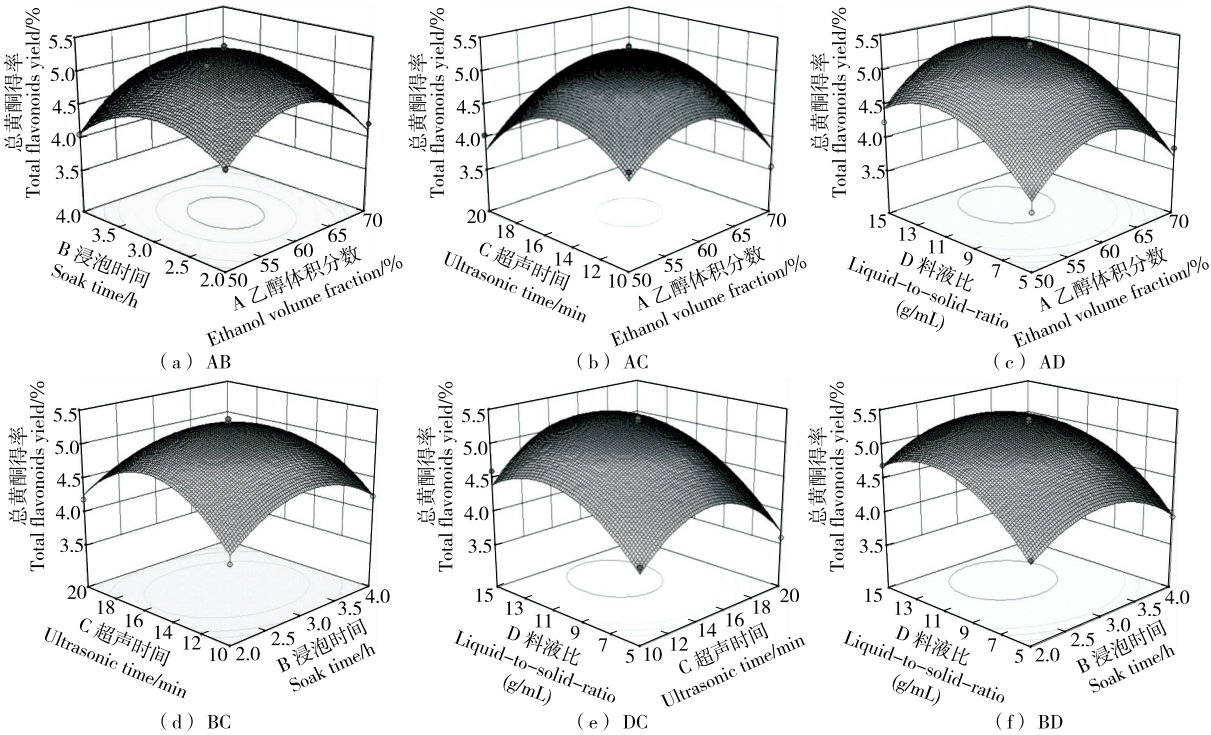


图 5 各因素交互作用的响应图

Figure 5 Response surface plots and contour plots of the interactive effects

预测值较近,进一步证明该模型的可信性较高,表明该工艺合理可靠。

2.3 芦荟炒制品及生品中总黄酮得率对比

由图 6 可知,芦荟经炒制后总黄酮含量有所提高,8 个产地芦荟炒制品中的总黄酮得率均高于生品的。各产地芦荟炒制品中总黄酮得率大小依次为印尼好望角芦荟>四川库拉索芦荟>广东好望角芦荟>望津山好望角芦荟>非洲库拉索芦荟>印度库拉索芦荟>委内瑞拉库拉索芦荟>非洲好望角芦荟。影响各批次芦荟炒制品中总黄酮含量高低的具体原因还有待于进一步研究。

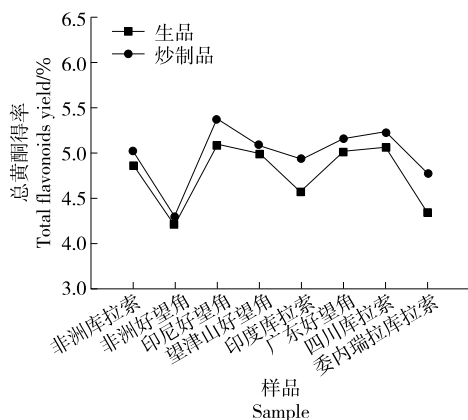


图 6 不同产地芦荟生品与炒制品中的总黄酮得率
Figure 6 Determination results of total flavonoids yield of *A. vera* raw and fried products from different producing areas ($n=5$)

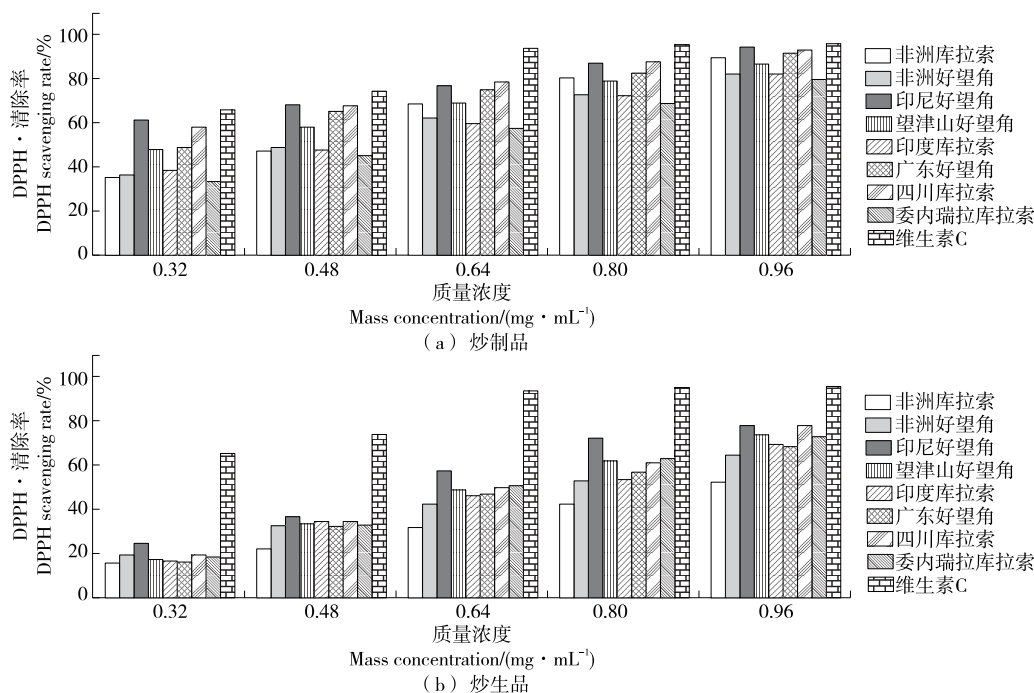


图 7 不同产地芦荟生品与炒制品对 DPPH · 的清除作用

Figure 7 DPPH free radical scavenging results of *A. vera* raw and fried products from different producing areas

2.4 抗氧化活性分析

2.4.1 DPPH · 清除能力 由图 7 可知,随着样品质量浓度的增加,DPPH · 清除能力逐渐增加。当样品质量浓度为 0.96 mg/mL 时,DPPH · 清除率最大,与等浓度维生素 C 的相近,说明 8 个产地芦荟中的总黄酮对 DPPH · 具有较强的清除能力,可能与维生素 C 和黄酮类—OH 供氢能力有关,从而表现较强抗氧化能力。其中,炒制品中印尼好望角芦荟的清除能力最好,委内瑞拉库拉索芦荟的最差;生品中印尼好望角芦荟的最好,非洲库拉索芦荟的最差,说明炒制品对 DPPH · 的清除作用明显强于生品的。

2.4.2 ABTS⁺ · 清除能力 由图 8 可知,芦荟生品与炒制品中总黄酮对 ABTS⁺ · 的清除能力随样品质量浓度的增大而增强,但低于同等浓度维生素 C 的。总黄酮清除 ABTS⁺ · 的作用大小可能与清除自由基的分子结构有关,当样品质量浓度为 0.96 mg/mL 时,ABTS⁺ · 清除率最大,表明不同产地的芦荟炒制品中总黄酮具有较强的清除 ABTS⁺ · 能力。其中,炮制品中清除率最大为印尼好望角芦荟,最小的为非洲好望角芦荟;生品中印尼好望角芦荟的清除能力最强,印度库拉索芦荟的最弱,表明炒制品对 ABTS⁺ · 的清除率作用强于生品的。

2.4.3 铁还原能力 由图 9 可知,当样品质量浓度为 0.32~0.96 mg/mL 时,总黄酮对金属离子的整合能力与浓度呈量效关系,当 TPTZ 溶液过量或普鲁士蓝生成物产生沉淀,TPTZ 生成量可评价还原能力,吸光度值上升,

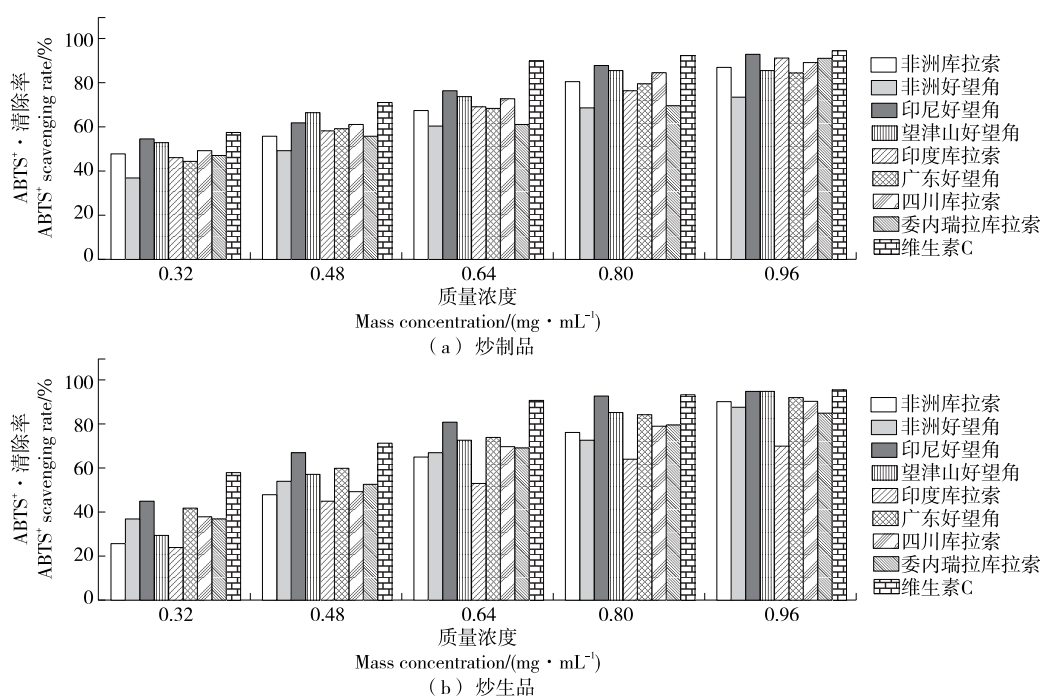
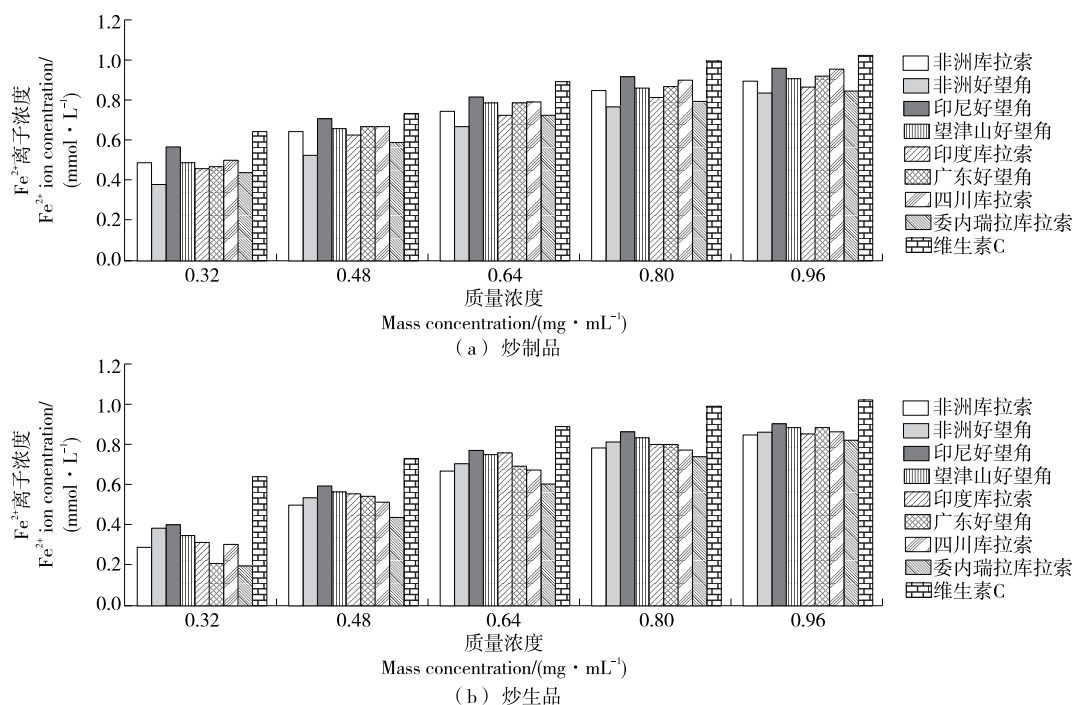


图8 不同产地芦荟生品与炒制品对 ABTS· 的清除作用

Figure 8 ABTS free radical scavenging results of *A. vera* raw and fried products from different producing areas图9 不同产地芦荟生品与炒制品对 Fe²⁺ 的还原能力Figure 9 Results of free radical reduction of FRAP by *A. vera* raw and fried products producing areas

即抗氧化能力增强。芦荟生品中的总黄酮对 Fe²⁺ 的还原力较强,较炒制品的有所提升。其中,炒制品中印尼好望角芦荟对 Fe²⁺ 的还原力最大,非洲好望角芦荟的最小;生品中印尼好望角芦荟的最大,委内瑞拉库拉索芦荟的最小。

2.4.4 ·OH 清除能力 由图 10 可知,随着样品质量浓度的增大,·OH 的清除率逐渐增大,各样品对 ·OH 的清除率与样品质量浓度存在一定量效关系。8 个产地芦荟对 ·OH 的清除效果较好,其炒制品对 ·OH 的清除率最大,当样品质量浓度为 0.96 mg/mL 时,·OH 清除率

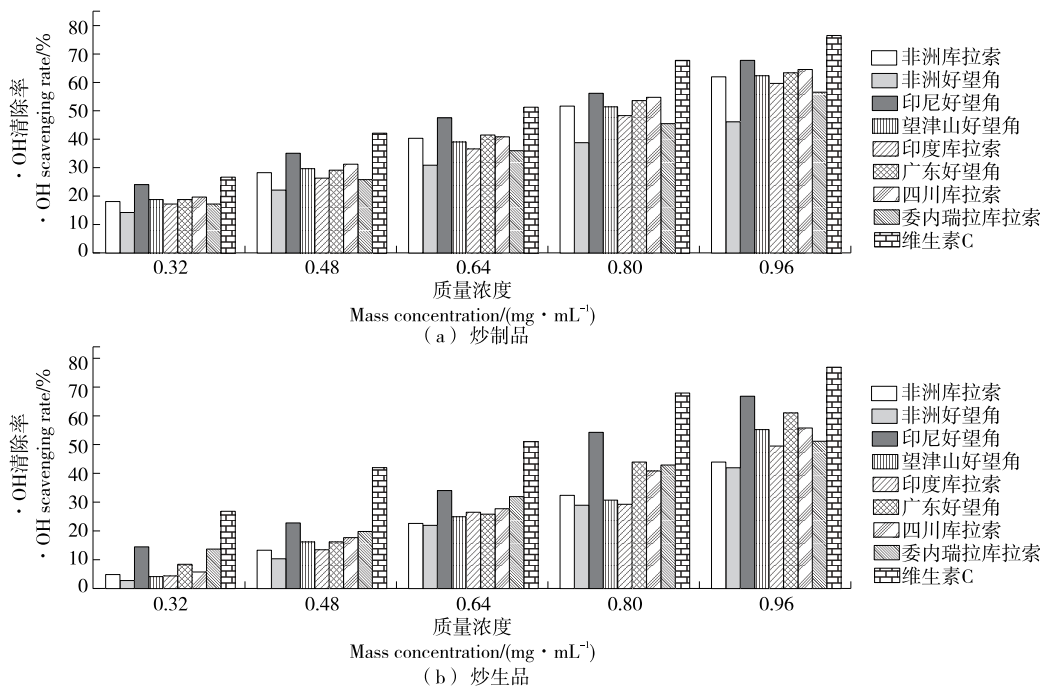


图 10 不同产地芦荟生品和炒制品对 ·OH 的清除作用

Figure 10 ·OH radical scavenging results of *A. vera* raw and fried products from different producing areas

达到最大,生品与炒制品的清除率略低于维生素 C 的,说明芦荟生品及炒制品中的总黄酮具有良好的抗氧化活性,且与其质量浓度呈正相关。黄酮化合物含有一OH、C₄酮羰基等结构提供的 H 与 ·OH 结合,产生自由基链会被干扰,终止氧化损伤反应,从而达到清除羟自由基的效果。炒制品中对 ·OH 清除能力最大的为印尼好望角芦荟,最小的为非洲好望角芦荟;生品中,最大的为印尼好望角芦荟,最小的为非洲好望角芦荟,炒制品的清除作用明显强于生品,说明芦荟在炒制后对 ·OH 的清除能力有所增强。

2.5 抗氧化能力与总黄酮含量的相关性分析

由表 5 可知,总黄酮得率与 DPPH ·、ABTS⁺ ·、FRAP、·OH 的清除率呈正相关性,其中与 FRAP、·OH 的清除率相关性极显著($P<0.01$);DPPH ·清除率与 ABTS⁺ ·、FRAP、·OH 的清除率相关性显著($P<0.05$);FRAP 与 ·OH 的清除率相关性极显著($P<0.01$)。总体来说,总黄酮得率与 4 种抗氧化性能指标相关性较好,采用这 4 种方法可综合评价不同产地芦荟炒制品的抗氧化活性。

表 5 总黄酮含量与抗氧化活性之间的相关性[†]

Table 5 Correlation analysis between total flavonoids content and antioxidant activity

项目	总黄酮含量	DPPH · 清除率	ABTS ⁺ · 清除率	FRAP	·OH 清除率
总黄酮含量	1.00	0.74 *	0.89 **	0.97 **	0.94 **
DPPH ⁺ · 清除率		1.00	0.73 *	0.81 *	0.86 *
ABTS ⁺ · 清除率			1.00	0.89 **	0.83 *
FRAP				1.00	0.92 **
·OH 清除率					1.00

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

3 结论

试验表明,芦荟总黄酮的最佳提取工艺为浸泡时间 3 h、超声时间 15 min、乙醇体积分数 60%、料液比 1 : 10 (g/mL),此条件下总黄酮提取率为 5.37%。芦荟经炒制后总黄酮含量提高。不同产地的芦荟生品与炒制品中总黄酮对 DPPH ·、ABTS⁺ ·、·OH、FRAP 均具有较强

的抗氧化性,炒制品较生品的抗氧化作用有显著提高,其中印尼好望角芦荟的抗氧化能力最强;不同产地的芦荟抗氧化活性存在一定的差异,可能是由于生长环境不同导致其总黄酮含量及组成不同。抗氧化性与总黄酮质量浓度有关,8 个不同产地芦荟生品与炒制品的抗氧化能力与总黄酮得率正相关,说明芦荟总黄酮具有较强的抗氧

化活性,是一种潜在的抗氧化剂。后续可对总黄酮提取液进行分离纯化并分析其组成成分,还可对提取工艺中的其他可能影响因素如超声功率和提取次数等进行优化,以更加深入研究芦荟炒制品中总黄酮的抗氧化功效。

参考文献

- [1] 姚立华, 何国庆, 陈启和. 芦荟活性成分的生物学作用研究进展[J]. 科技通报, 2007(6): 812-815.
YAO L H, HE G Q, CHEN Q H. Research progress on the biological role of aloe vera active ingredient [J]. Science and Technology Bulletin, 2007(6): 812-815.
- [2] 赖焯荣, 黄晓兰, 王艺菊, 等. 微波法提取芦荟黄酮及其含量测定的研究[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2015, 35(1): 30-36.
LAI X R, HUANG X L, WANG Y J, et al. Microwave extraction of aloe vera flavonoids and determination of their content[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences(Natural Science Edition), 2015, 35(1): 30-36.
- [3] HES M, DZIEDZIC K, GÓRCEKA D, et al. Aloe vera (L.) Webb.: Natural sources of antioxidants-a review[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2019, 74(3): 255-265.
- [4] SÁNCHEZ M, GONZÁLEZ-BURGOS E, IGLESIAS I, et al. Pharmacological update properties of Aloe vera and its major active constituents[J]. Molecules, 2020, 25(6): 1-324.
- [5] SHEN N, WANG T, GAN Q, et al. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132531.
- [6] 马艳弘, 刘晨, 黄开红, 等. 响应面法优化微波提取芦荟皮多糖及其抗氧化活性[J]. 中国食品学报, 2016, 16(6): 96-104.
MA Y H, LIU C, HUANG K H, et al. Optimization of microwave extraction of aloe barbadensis peel polysaccharides and their antioxidant activity by response surface method[J]. Chinese Journal of Food Science, 2016, 16(6): 96-104.
- [7] REN W, QIAO Z, WANG H, et al. Flavonoids: Promising anticancer agents[J]. Medicinal Research Reviews, 2003, 23(4): 519-534.
- [8] BUBOLS G B, VIANNA DDA R, MEDINA-REMON A, et al. The antioxidant activity of coumarins and flavonoids[J]. Mini Reviews in Medicinal Chemistry, 2013, 13(3): 318-334.
- [9] 王文君, 蔡教英, 蒋艳, 等. 芦荟黄酮体内抗氧化活性及对 CAT mRNA 表达的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(10): 13-18.
WANG W J, CAI J Y, JIANG Y, et al. Antioxidant activity of aloe vera flavonoids in vivo and their effects on CAT mRNA expression [J]. Chinese Journal of Food Science, 2013, 13(10): 13-18.
- [10] 李亮曜, 谢丽芳, 邓小林, 等. 星点设计-响应面法优化芦荟多糖超声波提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 化学工程与装备, 2017(9): 45-49.
LI L Y, XIE L F, DENG X L, et al. Optimization of ultrasonic extraction process of aloe vera polysaccharide and its antioxidant activity by star point design-response surface method[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2017(9): 45-49.
- [11] 唐远谋, 焦士蓉, 冷鹏, 等. 响应面法优化芦荟中抗氧化活性成分的提取工艺[J]. 生物加工过程, 2011, 9(1): 24-28.
TANG Y M, JIAO S R, LENG P, et al. Optimization of extraction process of antioxidant active ingredients from aloe vera by response surface method[J]. Bioprocessing Technology, 2011, 9(1): 24-28.
- [12] 蔡邦宏, 涂先科, 莫乔斐. 超声波辅助萃取柠檬皮渣中的总黄酮[J]. 化学研究与应用, 2018, 30(5): 684-688.
CAI B H, TU X K, MO Q F. Ultrasonic assisted extraction of total flavonoids from lemon peel pomace[J]. Chemical Research and Application, 2018, 30(5): 684-688.
- [13] 黄琼, 谢向机, 林嘉丽, 等. 洛神花总黄酮提取工艺及其稳定性研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 102-108.
HUANG Q, XIE X J, LIN J L, et al. Study on extraction process and stability of total flavonoids from Roselle[J]. Preservation and Processing, 2021, 21(2): 102-108.
- [14] 罗磊, 张冰洁, 朱文学, 等. 响应面法优化超声辅助提取金银花叶黄酮工艺及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 13-19.
LUO L, ZHANG B J, ZHU W W, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of honeysuckle leaf flavonoids and their antioxidant activity by response surface test[J]. Food Science, 2016, 37(6): 13-19.
- [15] 张东峰. 响应面法优化罗汉松总黄酮提取工艺及其抗氧化性研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 63-67.
ZHANG D F. Study on extraction process and antioxidant property of total flavonoids of Luo Han Song optimized by response surface [J]. Grain and Oil, 2020, 33(7): 63-67.
- [16] 陈建福, 彭敏. 芦柑叶总黄酮的提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(4): 117-122.
CHEN J F, PENG M. Optimization of extraction process of total flavonoids from aloe mandarin leaf and its antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2021, 42(4): 117-122.
- [17] YU M, WANG B, QI Z, et al. Response surface method was used to optimize the ultrasonic assisted extraction of flavonoids from *Crinum asiaticum*[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(8): 2 079-2 084.
- [18] 葛瑞宏, 李鹏冲, 王永, 等. 黑苦荞黄酮提取工艺及其胶囊制备研究[J]. 农产品加工, 2020(5): 36-42, 45.
GE R H, LI P C, WANG Y, et al. Study on extraction process and capsule preparation of buckwheat buckwheat [J]. Agricultural Products Processing, 2020(5): 36-42, 45.
- [19] 赖慧宁, 陈雨滢, 王莹莹, 等. 黑树莓总黄酮的醇提工艺优化及对黄嘌呤氧化酶的抑制作用[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 175-182.
LAI H N, CHEN Y T, WANG Y Y, et al. Optimization of alcohol extraction process of total flavonoids in black raspberry and its inhibitory effect on xanthine oxidase [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(2): 175-182.