

史友航, 吕青遥, 焦士蓉. 响应面法优化微波辅助提取芦荟蒽醌类物质工艺及其抗氧化活性分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 174-181. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100192

SHI Youhang, LÜ Qingyao, JIAO Shirong. Optimization of Microwave-assisted Extraction Process of Anthraquinones from *Aloe vera* by Response Surface Method and Analysis of Its Antioxidant Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 174-181. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100192

· 工艺技术 ·

# 响应面法优化微波辅助提取芦荟蒽醌类物质 工艺及其抗氧化活性分析

史友航, 吕青遥, 焦士蓉\*

(西华大学食品与生物工程学院, 四川成都 610039)

**摘要:**为提高芦荟皮中的蒽醌类物质的提取量, 本研究采用微波辅助提取法对芦荟蒽醌类物质进行提取, 考察不同乙醇浓度、提取时间、微波功率、料液比对提取的影响, 以单因素实验为基础, 对提取工艺进行响应面优化, 并通过其对 DPPH 自由基清除能力、ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力、超氧阴离子自由基清除能力、铁离子还原能力和抑制脂质过氧化物活性的测定, 研究芦荟蒽醌类物质的体外抗氧化性。结果表明, 微波辅助提取芦荟蒽醌类物质的最优条件为: 乙醇浓度为 80%、提取时间为 60 s、微波功率为 406 W、料液比为 1:19 g/mL, 在此条件下得到的芦荟蒽醌类物质的提取量为 12.29 mg/g; 其体外抗氧化性的 IC<sub>50</sub> 值分别为 0.431±0.003、0.400±0.005、0.443±0.012、0.417±0.007、0.441±0.008 mg/mL。

**关键词:** 芦荟, 蒽醌类物质, 微波辅助提取, 响应面优化, 抗氧化

中图分类号: TS218

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)19-0174-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100192



本文网刊:

## Optimization of Microwave-assisted Extraction Process of Anthraquinones from *Aloe vera* by Response Surface Method and Analysis of Its Antioxidant Activity

SHI Youhang, LÜ Qingyao, JIAO Shirong\*

(College of Food and Bioengineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** In order to improve the extraction amount of anthraquinones from *Aloe vera* peel, this study used microwave-assisted extraction method to extract anthraquinones from *Aloe vera*, and investigated the effects of different ethanol concentrations, extraction time, microwave power, and material-to-liquid ratio on the extraction, and carried out response surface optimization of the extraction process based on single-factor experiments, and studied the *in vitro* antioxidant properties of *Aloe vera* anthraquinones by its effects on DPPH radical scavenging ability, ABTS<sup>+</sup> radical scavenging ability, superoxide anion radical scavenging ability, iron ion reducing ability and lipid peroxidation inhibiting activity. The results showed that the optimal conditions for the extraction of *Aloe vera* anthraquinones by microwave were: Ethanol concentration of 80%, extraction time of 60 s, microwave power of 406 W, and material-to-liquid ratio of 1:19 g/mL. The extracted amount of *Aloe vera* anthraquinones was 12.29 mg/g, and the *in vitro* antioxidant IC<sub>50</sub> values were 0.431±0.003, 0.400±0.005, 0.443±0.012, 0.417±0.007 and 0.441±0.008 mg/mL, respectively.

**Key words:** *Aloe vera*; anthraquinones; microwave-assisted extraction; response surface optimization; antioxidant

芦荟(*Aloe vera*)是一种多年生常绿肉质草本植物, 属百合科。芦荟的原产地为非洲的干燥沙漠地

带, 在热带和亚热带地区都有广泛分布<sup>[1]</sup>。它的种类繁多, 高达 500 多种<sup>[2]</sup>。根据其使用途径的不同, 可

收稿日期: 2022-10-19

作者简介: 史友航 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1579493577@qq.com。

\* 通信作者: 焦士蓉 (1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 微生物学, E-mail: 1216447131@qq.com。

以分为三种类型,分别是药用芦荟、食用芦荟和观赏芦荟<sup>[3]</sup>。芦荟中含有许多种活性成分<sup>[4-6]</sup>,比如蒽醌类化合物、多糖类、有机酸、氨基酸和维生素等,具有提高人体免疫系统的功能<sup>[7-9]</sup>,能够有效阻止癌因子的活动和防止癌细胞扩散,并杀死癌细胞和中和外毒素<sup>[10-11]</sup>,还能够使皮肤白嫩、有弹性,有防皱和延缓衰老等作用<sup>[12]</sup>。

芦荟中的蒽醌类物质主要包括芦荟素、芦荟大黄酸、芦荟大黄素、芦荟泻素等 20 多种成分<sup>[13-14]</sup>。这些物质使芦荟具有抑菌、消炎、解毒、增强免疫力、润肠通便和抗肿瘤等功效<sup>[15-19]</sup>。因此对芦荟蒽醌类物质的提取研究具有良好的社会效益。目前从芦荟中提取蒽醌类物质的方法有很多,如刘太平<sup>[20]</sup>用乙醇浸提法提取芦荟皮中的蒽醌类物质,其提取量为 0.0323 mg/mL,曹颖<sup>[21]</sup>用超声波辅助提取法提取芦荟皮中的蒽醌类物质,其提取量为 18.58 μg/mL,但这些方法所提取的蒽醌类物质很少,且目前鲜有采用微波辅助提取芦荟中蒽醌类物质的文献。而微波提取法具有提取时间短、微波穿透力强、溶剂消耗少等优点<sup>[22]</sup>。

因此,本文以库拉索芦荟为原料,对微波辅助提取芦荟蒽醌类物质工艺进行响应面优化,并研究芦荟蒽醌类物质的体外抗氧化活性,为进一步提高芦荟资源的利用和功能性食品的开发提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

库拉索芦荟干粉 云南芦野生物科技有限公司; 1,8-二羟基蒽醌 四川省维克奇生物科技有限公司; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH) 四川省维克奇生物科技有限公司; 2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS) 上海源叶生物科技有限公司; 1,4-二硫代苏糖醇(TPTZ) 上海源叶生物科技有限公司; 维生素 C 天津市致远化学试剂有限公司; 茶多酚 上海源叶生物科技有限公司; 其余试剂均为分析纯试剂。

PTOD20TL-D4 微波炉 广东格兰仕; UV2400 紫外可见光度计 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; TGL-16 高速冷冻离心机 四川蜀科仪器有限公司; FDU-1200 真空冷冻干燥机 上海爱朗仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 芦荟蒽醌类物质的提取工艺 芦荟干粉→微波辅助提取→抽滤→浓缩→真空冷冻干燥

操作要点: 准确称取芦荟干粉 2.500 g, 加入 250 mL 烧杯中, 按照设定的乙醇浓度、微波时间、微波功率、料液比下进行微波提取, 将所得的提取液进行真空抽滤, 再用旋转蒸发器浓缩, 浓缩液用真空冷冻干燥机制成冻干粉, 避光放置。

1.2.2 蒽醌类物质含量测定 参照梁永洁<sup>[23]</sup>的方法, 以 1,8-二羟基蒽醌浓度(mg/mL)为横坐标, 吸光度 A 为纵坐标, 绘制标准曲线, 得到线性回归方程  $y=34.3543x+0.0059$ ,  $R^2=0.9997$ , 表明在 0~0.025 mg/mL 浓度范围内, 1,8-二羟基蒽醌标准样品与吸光度呈现良好线性关系。将待测液按标曲同样操作在 510 nm 处测定吸光度, 根据 1,8-二羟基蒽醌的标准曲线计算出样品中蒽醌类物质的浓度, 芦荟中蒽醌类物质提取量计算公式为:

$$\text{总蒽醌提取量(mg/g)} = \frac{C \times V \times N}{M}$$

式中: C 为样品中蒽醌类物质的浓度, mg/mL; V 为提取液体积, mL; N 为稀释倍数; M 为粉末样品质量, g。

1.2.3 单因素实验 参考杨浩<sup>[24]</sup>的方法及参数, 本实验选取对提取效果影响相对较大的 4 个因素即乙醇浓度、提取时间、微波功率和料液比进行单因素实验。

1.2.3.1 乙醇浓度的选择 准确称取芦荟干粉 2.500 g, 加入 250 mL 烧杯中, 分别采用浓度为 50%、60%、70%、80%、90% 的乙醇溶液进行提取, 在微波提取时间为 60 s、微波功率为 406 W、料液比为 1:20 g/mL 的条件下进行实验, 确定最佳乙醇浓度。

1.2.3.2 提取时间的选择 准确称取芦荟干粉 2.500 g, 加入 250 mL 烧杯中, 分别采用提取时间为 50、60、70、80、90 s 进行实验, 在乙醇浓度为 80%、微波功率为 406 W、料液比为 1:20 g/mL 的条件下进行实验, 确定最佳提取时间。

1.2.3.3 微波功率的选择 准确称取芦荟干粉 2.500 g, 加入 250 mL 烧杯中, 分别采用微波功率为 252、350、406、567、700 W 进行实验, 在乙醇浓度为 80%、微波提取时间为 60 s、料液比为 1:20 g/mL 的条件下进行实验, 确定最佳微波功率。

1.2.3.4 料液比的选择 准确称取芦荟干粉 2.500 g, 加入 250 mL 烧杯中, 分别采用料液比为 1:15、1:20、1:25、1:30、1:35 g/mL 进行实验, 在乙醇浓度为 80%、微波提取时间为 60 s、微波功率为 406 W 的条件下进行实验, 确定最佳料液比。

1.2.4 响应面分析法试验设计 综合单因素实验得出的结果, 选取乙醇浓度、提取时间、料液比这 3 个因素, 根据 Box-Behnken 试验设计<sup>[25]</sup>, 利用 Design-Expert 软件设计进行多元回归分析, 如表 1 所示。

表 1 Box-Behnken 设计试验因素水平  
Table 1 Factor level of Box-Behnken design test

因素	水平		
A 乙醇浓度(%)	70	80	90
B 提取时间(s)	50	60	70
C 料液比(g/mL)	1:15	1:20	1:25

### 1.3 芦荟蒽醌类物质的抗氧化能力分析

1.3.1 样品预处理 采用响应面分析法确定的最佳工艺条件提取芦荟中的蒽醌类物质并进行冷冻干燥,并将冻干样制成浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8 mg/mL 的待测样品溶液。

1.3.2 DPPH 自由基清除能力的测定 参考 Kop 等<sup>[26]</sup>的方法,计算 DPPH 自由基清除率  $E_1(\%)$  的公式如下:

$$E_1(\%) = [1 - (A_1 - A_2) / A_3] \times 100$$

式中:  $A_1$  为 0.2 mL 样品+3.8 mL DPPH 的吸光度;  $A_2$  为 0.2 mL 样品+3.8 mL 无水乙醇的吸光度;  $A_3$  为 0.2 mL 无水乙醇+3.8 mL DPPH 的吸光度。

1.3.3 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力的测定 参考 Ozarowski 等<sup>[27]</sup>的方法,计算 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率  $E_2(\%)$  的公式如下:

$$E_2(\%) = (1 - A_1 / A_0) \times 100$$

式中:  $A_1$  为 0.1 mL 样品+3.9 mL ABTS<sup>+</sup>的吸光度;  $A_0$  为 0.1 mL 无水乙醇+3.9 mL ABTS<sup>+</sup>的吸光度。

1.3.4 FRAP 法(还原铁离子)抗氧化活性的测定 参考简梨娜等<sup>[28]</sup>的方法,得到 FRAP 的标准曲线为  $y=0.91x-0.0037$ (其中  $y$  为  $FeSO_4$  的浓度,  $x$  为在波长 593 nm 处测定的吸光度),  $R^2=0.9966$ , 线性范围为 0~1 mmol/L。再根据线性回归方程,计算得到  $FeSO_4$  的浓度。

1.3.5 超氧阴离子自由基清除能力的测定 参考张雯雯等<sup>[29]</sup>的方法,计算超氧阴离子自由基清除率  $E_3(\%)$  的公式如下:

$$E_3(\%) = [1 - (A_1 - A_2) / A_3] \times 100$$

式中:  $A_1$  为 5 mL 样品+0.3 mL 邻苯三酚的吸光度;  $A_2$  为 5 mL 样品+0.3 mL 蒸馏水的吸光度;  $A_3$  为 5 mL 蒸馏水+0.3 mL 邻苯三酚的吸光度。

1.3.6 抑制脂质过氧化物的作用 参考宋晨光<sup>[30]</sup>的方法,计算脂质过氧化抑制率  $E_4(\%)$  的公式如下:

$$E_4(\%) = (1 - A_{\text{样品}} / A_{\text{空白}}) \times 100$$

式中:  $A_{\text{样品}}$  为样品管的吸光度;  $A_{\text{空白}}$  为空白管的吸光度。

### 1.4 数据处理

本实验采用 SPSS 软件进行显著性分析,  $P < 0.05$  则表示有显著性差异, Design Expert 软件进行响应面设计与分析, OriginPro 软件进行绘图,所有实验均重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果分析

分别以乙醇浓度、微波提取时间、微波功率、料液比为变化因素,以蒽醌类物质的含量为评价指标进行单因素实验,结果如图 1 所示。

由图 1 可知,乙醇浓度为 50%~80% 时,芦荟中蒽醌类物质的含量随乙醇浓度的增加而增大,在乙醇浓度为 80% 时达到峰值,与其他水平存在显著性差

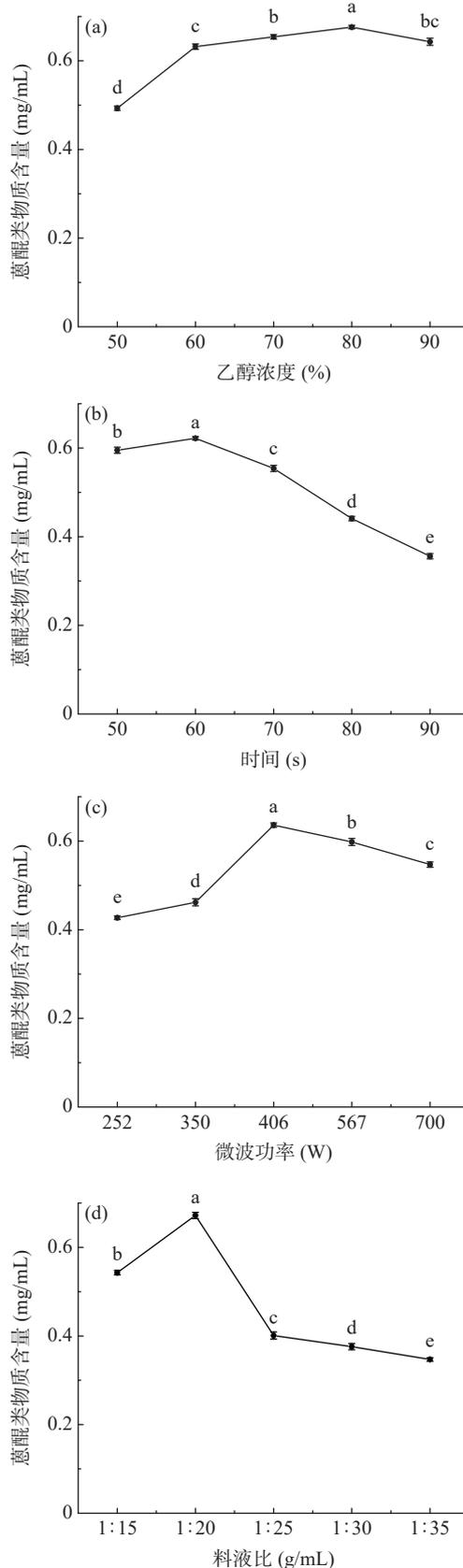


图 1 各因素对蒽醌类物质含量的影响

Fig.1 Effects of various factors on the content of anthraquinones

注: a 为乙醇浓度对蒽醌类物质含量的影响; b 为提取时间对蒽醌类物质含量的影响; c 为微波功率对蒽醌类物质含量的影响; d 为料液比对蒽醌类物质含量的影响; 图中不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

异( $P<0.05$ ),故选择乙醇浓度为 80%。这可能是由于蒽醌类物质种类多,极性范围广,不同浓度乙醇的极性也不同。而 80% 乙醇溶液的极性与芦荟总蒽醌的极性相近,有利于目标产物在溶剂中的溶解。

在 50~60 s 内,蒽醌类物质的含量随时间的增加而增加,在提取时间为 60 s 时达到峰值,与其他水平存在显著性差异( $P<0.05$ )。当提取时间继续增加时,提取的蒽醌类物质的含量减少,这可能是由于当蒽醌类物质提取饱和后,蒽醌类物质不再被提取出来,时间延长后,提取出的杂质也会增多<sup>[31]</sup>。

微波功率在 252~406 W 时,芦荟中蒽醌类物质的含量随微波功率增大呈递增趋势;继续增大功率,含量呈递减趋势。这可能是由于微波产生的电磁场加速了被萃取成分由物料内部向萃取溶剂界面的扩散速率,蒽醌类物质提取率也增高,但微波功率的增大,可能会导致不均匀或急速受热,破坏芦荟蒽醌的分子结构,降低提取效果<sup>[32]</sup>。

随着料液比的增大,提取的蒽醌类物质的含量增大,当料液比为 1:20 g/mL 时含量达到峰值,与其他水平存在显著性差异( $P<0.05$ ),故选取料液比 1:20 g/mL 进行后续实验。适当的料液比使得物料与溶剂间有好的浓度差,有利于提高蒽醌类物质的提取率,降低成本。随着溶剂用量的增加,其含量呈先升后降的趋势,其降低的原因可能是其中的蒽醌类物质大部分已被溶出,溶剂用量不再对提取率有促进作用,溶剂用量的继续增加干扰了其含量的测定。

通过单因素实验得到优化条件为:提取溶剂为 80% 的乙醇溶液,提取时间为 60 s,微波功率为 406 W,料液比为 1:20 g/mL。其中乙醇浓度、提取时间和料液比对蒽醌类物质的含量影响较为显著,组间差异明显,所以在后续响应面试验中选择乙醇浓度、提取时间和料液比三个因素分析。

## 2.2 响应面试验结果及分析

2.2.1 响应面分析因素水平的设计及分析 根据 Box-Behnken 的中心组合试验设计原理,在单因素基础上,选取乙醇浓度、提取时间、料液比 3 个因素,以蒽醌类物质含量为响应值,采用 3 因素 3 水平的响应面分析方法优化微波提取芦荟蒽醌类物质的工艺参数,其结果如表 2 所示。

根据表 3 可知,该模型的  $F=50.78$ ,  $P=0.0001<0.05$ ,表明该模型极其显著,说明该试验方法是合理且可靠的。失拟项  $P$  值为  $0.0696>0.05$ ,不显著,表明试验结果受所选因素及其他因素影响很小,方程式成立方法可靠。

通过对试验数据进行回归拟合得到蒽醌类物质含量( $Y$ )对乙醇浓度( $A$ )、提取时间( $B$ )、料液比( $C$ )的二元多次回归模型方程如下:

$$Y=0.6484-0.009875A-0.009875B-0.05325C-0.00275AB+0.0035AC+0.0045BC-0.082325A^2-0.117325B^2-0.147075C^2$$

表 2 微波提取芦荟蒽醌类物质响应面分析试验设计及结果

Table 2 Experimental design and results of response surface analysis for microwave extraction of anthraquinones from aloe

试验号	乙醇浓度 (%)	时间 (s)	料液比 (g/mL)	蒽醌类物质含量 (mg/mL)
1	90	50	1:20	0.436±0.012
2	80	60	1:20	0.653±0.007
3	70	60	1:25	0.348±0.014
4	70	50	1:20	0.484±0.009
5	80	60	1:20	0.648±0.021
6	70	70	1:20	0.467±0.014
7	80	70	1:15	0.417±0.004
8	80	70	1:25	0.334±0.011
9	70	60	1:15	0.476±0.016
10	80	50	1:15	0.443±0.005
11	90	70	1:20	0.408±0.009
12	80	60	1:20	0.642±0.012
13	80	50	1:25	0.342±0.015
14	80	60	1:20	0.632±0.008
15	80	60	1:20	0.667±0.013
16	90	60	1:25	0.369±0.008
17	90	60	1:15	0.483±0.016

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.22	9	0.025	50.78	0.0001	极显著
A	7.801E-004	1	7.801E-004	1.61	0.0024	
B	7.801E-004	1	7.801E-004	1.61	0.0024	
C	0.023	1	0.023	46.83	0.0002	
AB	3.025E-005	1	3.025E-005	0.062	0.8098	
AC	4.900E-005	1	4.900E-005	0.10	0.7597	
BC	8.100E-005	1	8.100E-005	0.17	0.6948	
A <sup>2</sup>	0.029	1	0.029	58.91	0.0001	
B <sup>2</sup>	0.058	1	0.058	119.64	0.0001	
C <sup>2</sup>	0.091	1	0.091	188.01	0.0001	
残差	3.391E-003	7	4.844E-004			
失拟项	2.714E-003	3	9.046E-004	5.34	0.0696	不显著
纯误差	6.772E-004	4	1.693E-004			
总和	0.22	16				
R <sup>2</sup> (决定系数)				0.9949		
C.V.%(变异系数)				4.54		

模型的决定系数  $R^2=0.9949$ ,说明了该模型拟合程度良好,变异系数  $C.V.\%=4.54\%$ ,说明了该模型的可靠性良好,即可以用该模型优化微波提取芦荟蒽醌类物质的工艺。

2.2.2 各因素之间的交互作用 该模型各因素之间的交互作用的响应曲面图如图 2~图 4 所示。

由图 2 可知,当提取时间不变,乙醇浓度为 80% 时,蒽醌类物质含量最大;当浓度不变,时间为 60 s 时,含量最大。由图 3 可知,当料液比不变,乙醇浓度为 80% 时,含量最大;当乙醇浓度不变时,料液比为 1:20 g/mL 时,含量最大。由图 4 可知,当料液比不变,时间为 60 s 时,含量最大;当提取时间不变时,料液比为 1:20 g/mL 时,含量最大。

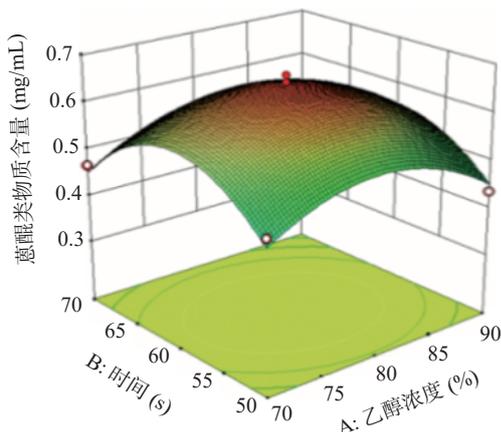


图2 乙醇浓度和提取时间对芦荟蒽醌类物质含量的响应曲面图

Fig.2 Response curve map of ethanol concentration and extraction time to the content of anthraquinones in aloe

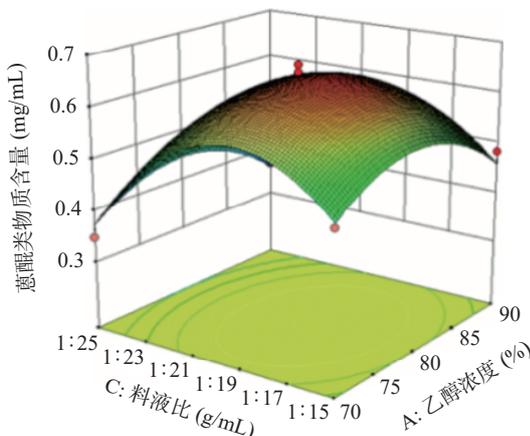


图3 乙醇浓度和料液比对芦荟蒽醌类物质含量的响应曲面图

Fig.3 Response curve map of ethanol concentration and material-liquid ratio to the content of anthraquinones in aloe

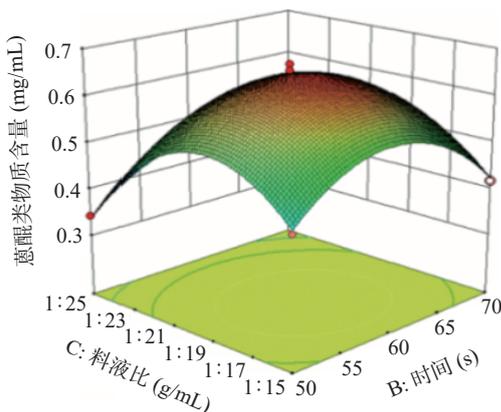


图4 提取时间和料液比对芦荟蒽醌类物质含量的响应曲面图

Fig.4 Response curve map of extraction time and material-liquid ratio to the content of anthraquinones in aloe

2.2.3 模型验证性实验 通过软件 Design-Expert 优化提取条件得到理论的最佳的提取条件和响应值如下:乙醇浓度为 79.4%,微波提取时间为 59.6 s,料液比为 1:19.1 g/mL,芦荟蒽醌类物质含量为

0.654 mg/mL。为提取工艺的可行性,将上述条件修改为:乙醇浓度为 80%,微波提取时间为 60 s,料液比为 1:19 g/mL,并以此来验证。验证三次后,得到芦荟蒽醌类物质的平均含量为 0.647±0.003 mg/mL,相对误差为 1.07%,小于 10%。证明响应面得到提取芦荟蒽醌类物质的最优实验条件是可行可靠的。

### 2.3 芦荟蒽醌类物质的抗氧化能力研究

2.3.1 DPPH 自由基清除能力的测定 由图 5 可知,当蒽醌类物质的浓度增加时,对 DPPH 自由基的清除率也随着增加,且浓度为 0.8 mg/mL 时,对 DPPH 自由基的清除率达到 58.13%,说明芦荟蒽醌类物质具有较好的清除 DPPH 自由基能力,其 IC<sub>50</sub>=0.431±0.003 mg/mL, V<sub>C</sub> 的 IC<sub>50</sub>=0.028±0.002 mg/mL,芦荟蒽醌类物质的 DPPH 自由基清除能力略次于 V<sub>C</sub>。研究表明<sup>[33]</sup>,芦荟的提取物有良好的 DPPH 自由基清除能力,而通过高效液相色谱-电喷雾质谱联用(HPLC-DAD-ESI-MS)分析得到提取物中的主要成分是蒽醌类物质。

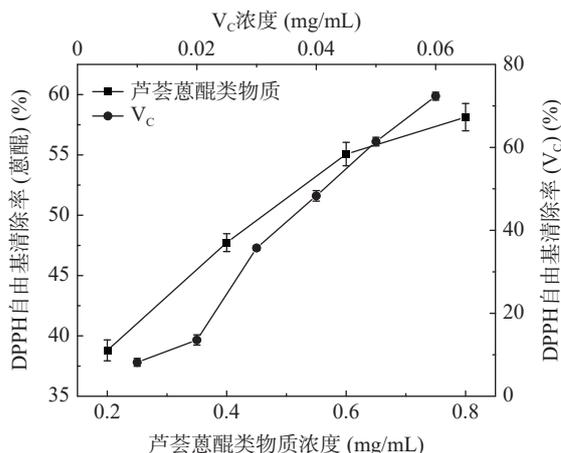


图5 芦荟蒽醌类物质及 V<sub>C</sub> 的 DPPH 自由基清除率  
Fig.5 DPPH free radical scavenging rate of *Aloe vera* anthraquinones and V<sub>C</sub>

2.3.2 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力的测定 由图 6 可知,

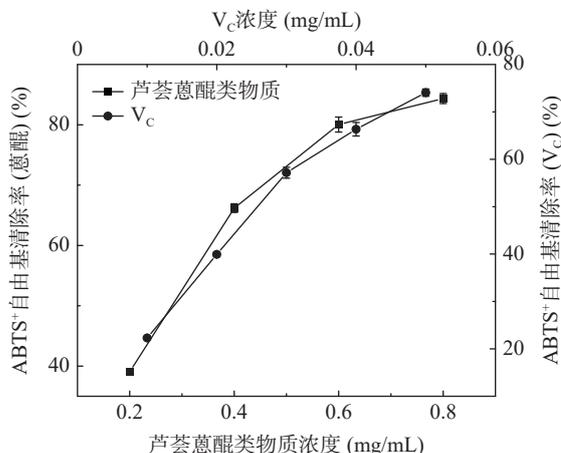


图6 芦荟蒽醌类物质及 V<sub>C</sub> 的 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率  
Fig.6 ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging rate of *Aloe vera* anthraquinones and V<sub>C</sub>

ABTS<sup>+</sup>自由基的清除率随蒽醌类物质的浓度增加而增加,且浓度为 0.8 mg/mL 时,对 ABTS<sup>+</sup>自由基的清除率达到 84.35%,说明芦荟蒽醌类物质具有较好的清除 ABTS<sup>+</sup>自由基能力,其 IC<sub>50</sub>=0.400±0.005 mg/mL, V<sub>C</sub> 的 IC<sub>50</sub>=0.026±0.006 mg/mL, 芦荟蒽醌类物质的 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力稍弱于 V<sub>C</sub>。研究表明<sup>[34]</sup>, 芦荟蒽醌类物质对 ABTS<sup>+</sup>自由基的清除能力很强,这是由于蒽醌类物质中的大黄素和大黄酚等物质的含量较高。

### 2.3.3 FRAP 法(还原铁离子)抗氧化活性的测定

由图 7 可知,蒽醌类物质的浓度增加时,FRAP 还原力也随着增加,且浓度为 0.8 mg/mL 时,FeSO<sub>4</sub> 的浓度为 0.812 mmol/L,说明芦荟蒽醌类物质具有较好 FRAP 还原力。采用 OriginPro 软件进行回归拟合,计算得到 FRAP 法测定的芦荟蒽醌类物质的 IC<sub>50</sub>=0.443±0.012 mg/mL, V<sub>C</sub> 的 IC<sub>50</sub>=0.052±0.007 mg/mL, 所以芦荟蒽醌类物质的抗氧化性弱于 V<sub>C</sub>,与文献 [35] 所得结论一致。

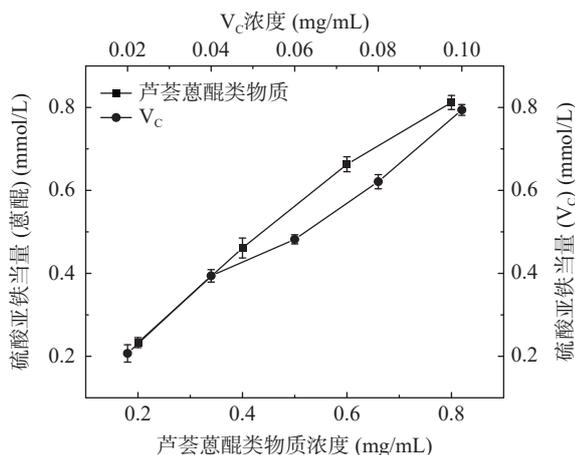


图 7 芦荟蒽醌类物质及 V<sub>C</sub> 的 FRAP 还原力

Fig.7 FRAP reducing power of *Aloe vera* anthraquinones and V<sub>C</sub>

### 2.3.4 超氧阴离子自由基清除能力的测定 由图 8

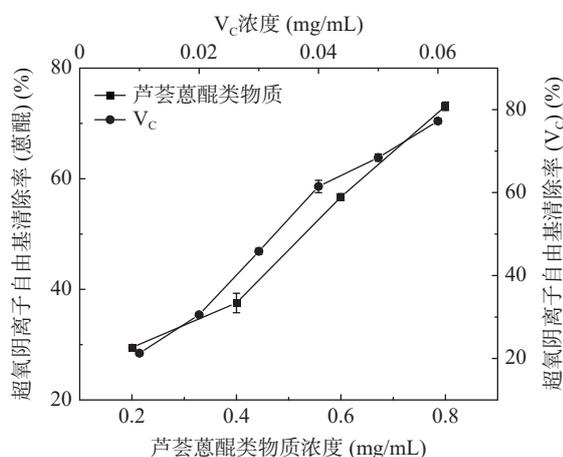


图 8 芦荟蒽醌类物质及 V<sub>C</sub> 的超氧阴离子自由基清除率

Fig.8 Superoxide anion free radical scavenging rate of *Aloe vera* anthraquinones and V<sub>C</sub>

可知,蒽醌类物质的浓度增加时,超氧阴离子自由基的清除率也随着增加,且浓度为 0.8 mg/mL 时,对超氧阴离子自由基的清除率达到 73.11%,说明芦荟蒽醌类物质具有较好的清除超氧阴离子自由基能力,其 IC<sub>50</sub>=0.417±0.007 mg/mL, V<sub>C</sub> 的 IC<sub>50</sub>=0.028±0.003 mg/mL, 芦荟蒽醌类物质的超氧阴离子清除能力弱于 V<sub>C</sub>。有研究同样表明<sup>[36]</sup> 蒽醌类物质具有较好的清除超氧阴离子的能力,但是比 V<sub>C</sub> 的能力弱。

2.3.5 抑制脂质过氧化物产生的作用 由图 9 可知,当蒽醌类物质的浓度为 0.8 mg/mL 时,抑制率达到 57.83%,说明芦荟蒽醌类物质具有较好的抑制脂质过氧化能力,其 IC<sub>50</sub>=0.441±0.008 mg/mL, V<sub>C</sub> 的 IC<sub>50</sub>=0.028±0.001 mg/mL, 有研究表明<sup>[37]</sup>, 芦荟蒽醌类物质能够有效降低脂质过氧化物的产生,显著增强抗氧化防御系统,保护小鼠肾脏。

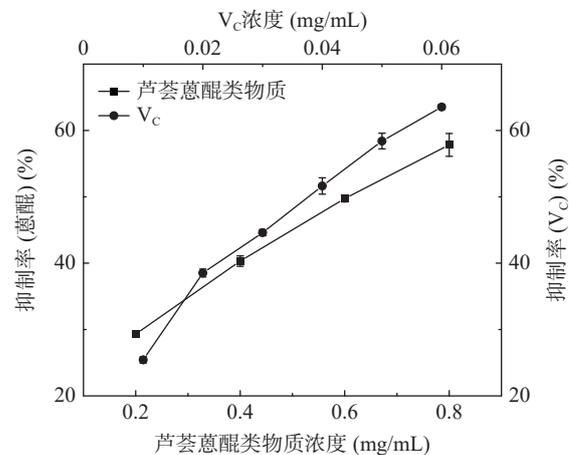


图 9 芦荟蒽醌类物质及 V<sub>C</sub> 的抑制脂质过氧化能力

Fig.9 Lipid peroxidation inhibiting ability of *Aloe vera* anthraquinones and V<sub>C</sub>

## 3 结论

通过响应面优化试验,运用 Box-Behnken 试验设计,确定了芦荟中蒽醌类物质提取的最佳条件为:乙醇浓度为 80%、微波提取时间为 60 s、微波功率为 406 W、料液比为 1:19 g/mL。以此条件提取的芦荟蒽醌类物质的提取量为 12.29 mg/g。

通过 5 种抗氧化实验的测定,结果显示芦荟蒽醌类物质对 DPPH 自由基、ABTS<sup>+</sup>自由基、超氧阴离子自由基的清除率和还原铁离子和脂质抗氧化的能力在一定范围内都随浓度的增大而增大。IC<sub>50</sub> 值分别为 0.431±0.003、0.400±0.005、0.443±0.012、0.417±0.007、0.441±0.008 mg/mL。说明芦荟蒽醌类物质具有较好的抗氧化能力。虽然比 V<sub>C</sub> 的抗氧化能力弱,但可通过提升纯度或与其他抗氧化成分结合进一步增强其抗氧化能力。

### 参考文献

- [1] FIORDALISI S D A L, HONORATO L A, KUHNEN S. *Aloe barbadensis* miller leaf exudate is a potential treatment for bovine mastitis[J]. *F1000 Research*, 2018, 7: 1285.
- [2] 周沫霖,上官新晨,湛亚琼,等. 响应面分析法优化超声波提

- 取芦荟总蒽醌工艺[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(5): 1055-1062. [ZHOU Molin, SHANGGUAN Xinchun, ZHAN Yaqiong, et al. Response surface analysis was used to optimize the ultrasonic extraction of total anthraquinones from aloe[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2013, 35(5): 1055-1062.]
- [3] 孙世琦. 芦荟的生物活性成分及其作用研究进展[J]. 当代化工研究, 2019(1): 166-167. [SUN Shiqi. Research progress on bioactive components and effects of aloe[J]. Contemporary Chemical Research, 2019(1): 166-167.]
- [4] BEPPU H, KAWAI K, SHIMPO K, et al. Studies on the components of aloe arborescens from Japan-monthly variation and differences due to part and position of the leaf[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2004, 32(9): 783-795.
- [5] 杨柳冬, 汪朝云, 田茂盛, 等. 芦荟生物特性及药理学活性的研究进展[J]. 农家参谋, 2019(23): 82-87. [YANG Liudong, WANG Chaoyun, TIAN Maosheng, et al. Research progress on biological properties and pharmacological activity of *Aloe vera*[J]. Farm Staff, 2019(23): 82-87.]
- [6] 黄凤兰, 高鸿蒙, 李娜娜, 等. 芦荟的研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2012, 27(5): 553-556. [HUANG Fenglan, GAO Hongmeng, LI Nana, et al. Research progress of aloe[J]. Journal of Inner Mongolia University for nationalities (Natural Science Edition), 2012, 27(5): 553-556.]
- [7] 陈梦婷, 罗秉俊, 杨芳芳. 芦荟多糖的功效研究综述[J]. 广东化工, 2020, 47(22): 65-66. [CHEN Mengting, LUO Bingjun, YANG Fangfang. Review on the efficacy of aloe polysaccharides[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(22): 65-66.]
- [8] 刘畅, 成玉梁, 郭亚辉, 等. 芦荟多糖联合茶多酚对小鼠酒精性肝损伤的预防作用[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 300-305. [LIU Chang, CHENG Yuliang, GUO Yahui, et al. Preventive effect of aloe polysaccharide combined with tea polyphenols on alcoholic liver injury in mice[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(22): 300-305.]
- [9] 刘钦凡, 胡乔松, 代磊, 等. 芦荟多糖研究进展综述[J]. 现代食品, 2019(23): 48-51. [LIU Qinfan, HU Qiaosong, DAI Lei, et al. Review on the research progress of aloe polysaccharide[J]. Modern Food, 2019(23): 48-51.]
- [10] MURUGESAN M P, RATNAM M V, MENGITSU Y, et al. Evaluation of anti-cancer activity of phytosomes formulated from *Aloe vera* extract[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 42(P2).
- [11] 胡云, 杨方美, 胡秋辉, 等. 芦荟生物活性成分及功能研究新进展[J]. 食品科学, 2003(6): 158-161. [HU Yun, YANG Fangmei, HU Qiuhui, et al. New progress in the study of bioactive components and functions of aloe[J]. Food Science, 2003(6): 158-161.]
- [12] SADGROVE N J, SIMMONDS M S J. Pharmacodynamics of *Aloe vera* and acemannan in therapeutic applications for skin, digestion, and immunomodulation[J]. *Phytotherapy Research: PTR*, 2021, 35(12): 6572-6584.
- [13] 蔡健. 芦荟的功能成分与保健功效[J]. *食品与药品*, 2006(8): 27-30. [CAI Jian. Functional components and health care efficacy of aloe[J]. *Food and Medicine*, 2006(8): 27-30.]
- [14] 湛亚琼. 芦荟蒽醌的降血脂、降血糖和抑菌功能研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014. [ZHAN Yaqiong. Study on hypolipidemic, hypoglycemic and bacteriostatic function of aloe anthraquinone[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014.]
- [15] 杨正和. 芦荟成分的生理功能与功效[J]. *畜牧与饲料科学*, 2012, 33(7): 8-10. [YANG Zhenghe. Physiological function and efficacy of *Aloe vera*[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2012, 33(7): 8-10.]
- [16] PAWAR H A. Preparation and analysis of aloe emodin: A review[J]. *International Journal of Chemical and Pharmaceutical Analysis*, 2018, 5(2): 1-4.
- [17] BORGES-ARGÁEZ R, CHAN-BALAN R, CETINA-MONTEJO L, et al. *In vitro* evaluation of anthraquinones from *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* miller) roots and several derivatives against strains of influenza virus[J]. *Industrial Crops & Products*, 2019, 132: 468-475.
- [18] 李宝玉, 黄静, 赵炫, 等. 响应面-频数法优化芦荟大黄素提取工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(17): 6228-6234. [LI Baoyu, HUANG Jing, ZHAO Xuan, et al. Optimization of extraction process of aloe emodin by response surface-frequency method[J]. Journal of Food Safety and quality Inspection, 2020, 11(17): 6228-6234.]
- [19] 邹平, 邹超君. 芦荟的保健功效及产业开发前景[J]. *湖南农业科学*, 2009(1): 98-100, 103. [ZOU Ping, ZOU Chaojun. Health care effect and industrial development prospect of aloe[J]. *Hunan Agricultural Science*, 2009(1): 98-100, 103.]
- [20] 刘太平. 芦荟中蒽醌类化合物的提取、分离及纯化工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008. [LIU Taiping. Study on extraction, separation and purification of anthraquinones from aloe[D]. Changsha: Central South University, 2008.]
- [21] 曹颖. 芦荟皮中蒽醌类抗菌剂的提取工艺研究[J]. *印染助剂*, 2017, 34(5): 46-49. [CAO Ying. Study on the extraction process of anthraquinone antibacterial agent from *Aloe vera* peel[J]. *Printing and Dyeing Auxiliaries*, 2017, 34(5): 46-49.]
- [22] 李东, 姚氏丽, 张小勤, 等. 微波辅助萃取法提取葛根总黄酮工艺优化[J]. 食品工业, 2022, 43(10): 19-23. [LI Dong, YAO Shili, ZHANG Xiaoqin, et al. Process optimization of extraction of total flavonoids from *Pueraria lobata* by microwave-assisted extraction[J]. Food Industry, 2022, 43(10): 19-23.]
- [23] 梁永洁. 望江南种子中蒽醌类成分的提取及其抗氧化活性[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021. [LIANG Yongjie. Extraction and antioxidant activity of anthraquinones from the seeds of South Hope[D]. Harbin: Northeastern Forestry University, 2021.]
- [24] 杨浩. 腊梅花总多酚辅助血脂调节作用及抗氧化机制研究[D]. 成都: 西华大学, 2022. [YANG Hao. Study on the effect of total polyphenols of *Fructus chinensis* on blood lipid regulation and antioxidative mechanism[D]. Chengdu: Xihua University, 2022.]
- [25] ZENG Weimin, LI Fang, WU Chenchen, et al. Optimization of ultrasound-assisted aqueous extraction of polyphenols from *Psidium guajava* leaves using response surface methodology[J]. *Separation Science and Technology*, 2020, 55(4): 728-738.
- [26] KOP T J, JAKOVLJEVIĆ D M, ŽIVKOVIĆ L S, et al. Polysaccharide-fullerene supramolecular hybrids: Synthesis, characterization and antioxidant activity[J]. *European Polymer Journal*, 2020, 123(C): 109461.
- [27] OŻAROWSKI M, RADOSAW K, PRZEMYSAW M, et al. Comparison of antioxidant activities of fractionated extracts from seedlings and herb of *Chelidonium majus* L. using DPPH, ABTS and FRAP methods[J]. *Herba Polonica*, 2016, 62(4): 22-38.
- [28] 简梨娜, 郭江涛, 刘耀, 等. 大果木姜子醇提物及不同萃取物体外抗氧化能力研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(1): 139-143. [JIAN Lina, GUO Jiangtao, LIU Yao, et al. Study on antioxidant activity of alcohol extract of *Zingiber officinalis* and different extracts *in vitro*[J]. Grain and Fats and Oils, 2022, 35(1): 139-143.]
- [29] 张雯雯, 张艳妮, 杨丽荣, 等. 4种天然物质抗氧化能力的研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(2): 43-50. [ZHANG Wenwen, ZHANG Yanni, YANG Lirong, et al. Study on the antioxidant ca-

capacity of four natural substances[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(2): 43–50. ]

[ 30 ] 宋晨光. 植物多糖抗氧化活性研究进展[J]. *中国果菜*, 2022, 42(4): 25–33. [ SONG Chenguang. Research progress on antioxidant activity of plant polysaccharides[J]. *Chinese Fruits and Vegetables*, 2022, 42(4): 25–33. ]

[ 31 ] 包善思, 姚瑶, 孙博瑞, 等. 腊梅花抗氧化活性物质微波辅助提取的响应面优化研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(10): 229–234.

[ BAO Shanshi, YAO Yao, SUN Bolui, et al. Study on response surface optimization of microwave-assisted extraction of antioxidant substances from *Prunus mume*[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(10): 229–234. ]

[ 32 ] 刘全德, 唐仕荣, 宋慧, 等. 芦荟蒽醌类化合物的超声提取及其抗氧化性研究[J]. *食品与机械*, 2011, 27(5): 68–71. [ LIU Quande, TANG Shirong, SONG Hui, et al. Study on ultrasonic extraction and antioxidant activity of anthraquinones from aloe[J]. *Food and Machinery*, 2011, 27(5): 68–71. ]

[ 33 ] AMRI A, BOURAQUI Z, BALBUENA-PECINO S, et al. Dietary supplementation with *Aloe vera* induces hepatic steatosis and oxidative stress together with a disruption of cellular signaling

pathways and lipid metabolism related genes' expression in gilthead sea bream (*Sparus aurata*)[J]. *Aquaculture*, 2022, 559: 738433.

[ 34 ] ALAM P, NOMAN O M, HERQASH R N, et al. Response surface methodology (RSM)-based optimization of ultrasound-assisted extraction of sennoside A, sennoside B, aloe-emodin, emodin, and chrysophanol from senna alexandrina (aerial parts): HPLC-UV and antioxidant analysis[J]. *Molecules*, 2022, 27(1): 298.

[ 35 ] AL-TAMIMI M, AL-MASSARANI S M, EL-GAMAL A A, et al. Vacillantins A and B, new anthrone C-glycosides, and a new dihydroisocoumarin glucoside from *Aloe vacillans* and its antioxidant activities[J]. *Plants*, 2020, 9(12): 1632.

[ 36 ] 彭东, 罗志锋, 陶倩, 等. 发酵巴戟天中蒽醌提取及其抗氧化与降血糖活性[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 214–223. [ PENG Dong, LUO Zhifeng, TAO Qian, et al. Extraction of anthraquinone and its antioxidant and hypoglycemic activities from fermented *Bacopa monniera*[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(7): 214–223. ]

[ 37 ] LEE W, JEONG G-S, BAEK M-C, et al. Renal protective effects of aloin in a mouse model of sepsis[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2019, 132: 110651.