DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250823002
**引用格式**: 牟佳勤, 杨文玺, 叶亮, 等. 中国沙棘雄花花被及花粉总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 216–226.
MU JQ, YANG WX, YE L, *et al*. Optimization of total flavonoids extraction process and study on antioxidant activities from the perianth and pollen of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi male flower [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 216–226. (in Chinese with English abstract).

# 中国沙棘雄花花被及花粉总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性研究

牟佳勤[1], 杨文玺[1,2,3], 叶　亮[1], 成春亚[1], 刘彩霞[1], 李　妙[1], 崔秋圆[1], 张启立[1,2,3], 崔治家[1,2,3*], 邵　晶[1,2,3*]

(1. 甘肃中医药大学药学院, 兰州　730000; 2. 甘肃省中医药研究中心, 兰州　730000; 3. 西北中藏药省部共建协同创新中心, 兰州　730000)

**摘　要: 目的**　优化中国沙棘雄花花被及花粉总黄酮的提取工艺, 并比较其抗氧化活性。**方法**　采用超声辅助醇提法提取花被和花粉的总黄酮, 利用分光光度法测定总黄酮含量, 结合单因素实验和响应面优化二者最佳提取工艺, 同时开展体外实验, 对中国沙棘雄花花被和花粉的总黄酮开展 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和 2,2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical cation, ABTS]阳离子自由基清除能力进行研究。**结果**　花被的最佳提取工艺为 60%的乙醇体积分数, 液料比 10:1 (mL:g), 61 ℃超声提取 39 min, 此条件下花被总黄酮提取率为(4.59±0.12)%; 花粉最佳提取工艺为乙醇浓度 70%, 液料比 10:1 (mL:g), 52 ℃超声提取 62 min, 此条件下花粉的总黄酮提取率为(1.88±0.06)%。在质量浓度为 4.0 mg/mL 时, 花被、花粉总黄酮 DPPH 自由基清除率分别为(84.87±0.03)%、(82.53±0.11)%, 在质量浓度为 0.80 mg/mL 时, 花被、花粉 ABTS 阳离子自由基清除率分别为(83.21±0.13)%、(79.37±0.06)%。**结论**　本研究分析了中国沙棘雄花花被和花粉在总黄酮含量和抗氧化能力方面的差异, 结果表明花被的总黄酮含量和抗氧化能力均高于花粉, 且二者均表现出较好的抗氧化能力, 二者的差异性为花被花粉分别开发利用提供了思路, 同一性为中国沙棘雄花整体资源的开发利用提供了数据支持。

**关键词:** 中国沙棘雄花; 花粉; 花被; 总黄酮; 提取工艺; 抗氧化活性

**收稿日期:** 2025-08-23
**基金项目:** 甘肃省自然科学基金项目(22JRRA1724); 甘肃省中医药研究中心开放课题项目(zyzx-2023-17); 甘肃省现代农业产业技术体系建设专项(GSARS06)
**第一作者:** 牟佳勤(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为中药资源保护、评价与可持续利用。E-mail: moujiaq@163.com
***通信作者:** 崔治家(1980—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为药用植物多样性及中药资源开发利用。E-mail: zhijiacui@126.com
邵晶(1978—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为中药药效物质基础及其质量控制与产品开发研究。E-mail: cn221@163.com

# Optimization of total flavonoids extraction process and study on antioxidant activities from the perianth and pollen of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi male flower

MU Jia-Qin[1], YANG Wen-Xi[1,2,3], YE Liang[1], CHENG Chun-Ya[1], LIU Cai-Xia[1], LI-Miao[1], CUI Qiu-Yuan[1], ZHANG Qi-Li[1,2,3], CUI Zhi-Jia[1,2,3*], SHAO Jing[1,2,3*]

(1. *School of Pharmaceutical Sciences*, *Gansu University of Chinese Medicine*, *Lanzhou* 730000, *China*; 2. *Research Center of Chinese Medicine of Gansu*, *Lanzhou* 730000, *China*; 3. *Northwest Collaborative Innovation Center for Traditional Chinese Medicine Co-constructed by Gansu Province & Ministry of Education of the People's Republic of China*, *Lanzhou* 730000, *China*)

**ABSTRACT: Objective** To establish the optimal extraction process of total flavonoids from the perianth and pollen of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi male flowers and compare their antioxidant activity. **Methods** The total flavonoids of perianth and pollen were extracted by ultrasonic-assisted alcohol extraction method. The content of total flavonoids was determined by spectrophotometry. The optimal extraction process of both was optimized by single factor experiment and response surface optimization. Additionally, *in vitro* experiments were conducted to evaluate the 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical and the 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) cationic radical scavenging activities of total flavonoids from the calyx and pollen. **Results** The optimal extraction process for the perianth was 60% ethanol by volume, a solid-to-liquid ratio of 10:1 (mL:g), ultrasonic extraction at 61 °C for 39 min, under which the total flavonoid yield was (4.59±0.12)%. The optimal extraction process for pollen was 70% ethanol, solid-to-liquid ratio of 10:1 (mL:g), ultrasonic extraction at 52 °C for 62 min, under which the total flavonoid yield was (1.88±0.06)%. At a mass concentration of 4.0 mg/mL, the DPPH radical scavenging rates of total flavonoids from perianth and pollen were (84.87 ± 0.03)% and (82.53 ± 0.11)%, respectively. At a mass concentration of 0.80 mg/mL, the ABTS cationic radical scavenging rates of total flavonoids from perianth and pollen were (83.21 ± 0.13)% and (79.37 ± 0.06)%, respectively. **Conclusions** This study analyzes the differences in total flavonoid content and antioxidant capacity between the perianth and pollen of male flowers from *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi. The results showes that the total flavonoid content and antioxidant capacity of the perianth were higher than those of the pollen, and both exhibited good antioxidant capacity. The differences provide ideas for the separate development and utilization of the perianth and pollen, while the similarities offer data support for the overall development and utilization of male flowers from *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi resources.

**KEY WORDS:** *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi male flower; pollen; perianth; total flavonoids; extraction process; antioxidant activity

## 0　引　言

中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi)系胡颓子科沙棘属中国特有沙棘亚种植株, 广泛分布于我国青海、甘肃、宁夏、山西、陕西、内蒙古、河北等地[1–2]。中国沙棘是一种集生态、药用和食用价值于一体的重要植株资源[3–7], 其茎、叶、果实及种子中均富含黄酮类、多酚类、植物多糖、维生素及萜类等天然活性物质[8–10], 具有抗氧化应激、抗炎、抗衰老、诱导肿瘤细胞凋亡、降血糖、保肝解毒、改善血管内皮功能等药理活性[11–14], 在功能性食品、天然药物、营养保健品及日化护肤等领域得到广泛应用与开发[15]。

黄酮类成分是中国沙棘的主要活性成分之一, 分布于中国沙棘各个部位, 具有抗氧化、降血脂、降血糖抗炎、抗菌等多种生物活性[16–17], 研究中国沙棘黄酮类物质, 对中国沙棘资源的开发利用具有重要价值。在天然沙棘林中, 沙棘雌雄比相近, 且雄株雄花花序密集, 花粉量大, 资源丰富, 具有可观的发展前景, 目前对中国沙棘雄花的研究主要在形态结构方面[18], 缺乏对其营养物质和化学成分的研究。课题组前期研究发现中国沙棘雄花氨基酸含量丰富、种类齐全, 具有开发前景[19]。抗氧化是中国沙棘突出的活性之一, 在其叶片、果实、种子中均有研究[20], 但雄花部位的抗氧化研究鲜见。本研究聚焦于中国沙棘雄花, 研究关键因素对中国沙棘雄花花被和花粉总黄酮提取的影响, 基于单因素结果, 采用 Box-Behnken 设计-响应面法优化提取工艺, 对花被和花粉进行体外抗氧化活性研究, 以期为

中国沙棘的多元化利用提供新思路, 进一步扩大对沙棘资源的利用。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

中国沙棘雄花采自兰州市榆中县和平镇, 将采集到的雄花干燥除杂后, 过 120 目筛, 分离出花粉, 将花被粉碎, 过 80 目筛, 分别置于–20 ℃储存备用。

芦丁对照品(纯度≥98%)、维生素 C 对照品(纯度≥99.8%)(成都埃法生物科技有限公司); 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)和 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS](分析纯, 上海易恩化学技术有限公司); 无水乙醇、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、过硫酸钾(分析纯, 天津市大茂化学试剂厂)。

### 1.2 仪器与设备

DHG-9123A 型电热鼓风干燥箱(上海齐欣科学仪器有限公司); Multiskan GO 型多功能酶标仪、UV-power 型紫外可见分光光度计(北京来伯特科仪器股份有限公司); KH-5200B 数控超声波处理器(昆山禾创超声仪器有限公司); Legend Micro 17R 型高速冷冻离心机[赛默飞世尔科技(中国)有限公司]; XS105 型十万分之一电子分析天平[飞宏(东莞)电子有限公司]; HH-4 型数显恒温水浴锅(江苏金坛市环宇科学仪器厂)。

### 1.3 方 法

#### 1.3.1 总黄酮含量的测定

参照李东香等[21]的方法并稍加修改, 配制 0.2 mg/mL 的芦丁标准溶液, 于 510 nm 处测定吸光度值, 并绘制标准曲线。

#### 1.3.2 总黄酮提取率的测定

采用超声提取法提取样品溶液, 将样品溶液按 1.3.1 方法进行总黄酮浓度测定, 进一步按公式(1)测定总黄酮提取率。

$$W/\%=(C\times V\times N/M)\times 100\% \quad (1)$$

式中: $W$ 为总黄酮提取率, %; $C$ 为待测溶液的总黄酮质量浓度, mg/mL; $V$ 为待测液体积, mL; $N$ 为稀释倍数; $M$ 为中国沙棘雄花花被和花粉的质量, mg。

#### 1.3.3 单因素实验

(1)乙醇体积分数的确定: 精密称取各样品 1 g, 液料比为 12:1 (mL:g), 于 50 ℃超声提取 50 min, 分别以 40%、50%、60%、70%、80%乙醇体积分数提取, 测定总黄酮得率, 确定中国沙棘雄花花被和花粉总黄酮提取最适乙醇体积分数。

(2)液料比的确定: 精密称取各样品 1 g, 乙醇体积分数为 60%, 超声温度为 50 ℃, 超声时间为 50 min, 液料比分别选择 8:1、10:1、12:1、14:1、16:1 (mL:g), 测定总黄酮得率, 确定中国沙棘雄花花被和花粉总黄酮提取最适液料比。

(3)超声温度的确定: 精密称取各样品 1 g, 乙醇体积分数为 60%, 液料比为 12:1 (mL:g), 提取时间为 50 min, 超声温度分别选择 30、40、50、60、70 ℃, 测定总黄酮得率, 确定中国沙棘雄花花被和花粉总黄酮提取最适超声温度。

(4)超声时间的确定: 精密称取各样品 1 g, 12 mL 的 60%乙醇溶液, 于 50 ℃分别超声提取 30、40、50、60、70 min, 测定总黄酮得率, 确定中国沙棘雄花花被和花粉总黄酮提取最适超声时间。

以花被为实验对象, 基于单因素实验结果, 乙醇体积分数($A$)、液料比($B$)、超声温度($C$)、超声时间($D$)为影响因素, 总黄酮提取率($Y$)为评价指标, 采用 Design-Expert 13 软件优化提取工艺。花被因素水平见表 1。

**表 1 花被 Box-Behnken 响应面法因素水平**

**Table 1 Factor levels of Box-Behnken response surface methodology for perianth**

| 水平 | $A$(乙醇体积)/% | $B$(液料比)(mL:g) | $C$(超声温度)/℃ | $D$(超声时间)/min |
|---|---|---|---|---|
| –1 | 50 | 8:1 | 50 | 30 |
| 0 | 60 | 10:1 | 60 | 40 |
| 1 | 70 | 12:1 | 70 | 50 |

#### 1.3.4 中国沙棘雄花花粉中总黄酮的提取工艺优化

以单因素实验研究结果为基础, 乙醇体积分数($A$')、液料比($B$')、超声温度($C$')、超声时间($D$')为影响因素, 总黄酮提取率($Y$')为评价指标, 采用 Design-Expert 13 软件优化提取工艺。花粉因素水平见表 2。

**表 2 花粉 Box-Behnken 响应面法因素水平**

**Table 2 Factor levels of Box-Behnken response surface methodology for pollen**

| 水平 | $A$'(乙醇体积)/% | $B$'(液料比)(mL:g) | $C$'(超声温度)/℃ | $D$'(超声时间)/min |
|---|---|---|---|---|
| –1 | 50 | 8:1 | 40 | 50 |
| 0 | 60 | 10:1 | 50 | 60 |
| 1 | 70 | 12:1 | 60 | 70 |

#### 1.3.5 抗氧化活性研究

(1) DPPH 自由基清除能力

参考文献[22–23]的测定方法, 在 517 nm 的波长下测定溶液的吸光度值 $A_1$, 用无水乙醇加 DPPH 溶液制备空白溶液测吸光度 $A_0$, 根据公式(2)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\%=[(A_0-A_1)/A_0]\times 100\% \quad (2)$$

(2) ABTS 阳离子自由基清除能力

参照文献[22–23]的测定方法并稍加修改, 于 734 nm 处测定吸光度值 $A_r$, 以水为参比测定 ABTS 空白溶液吸光度值为 $A_t$, 根据公式(3)计算 ABTS 阳离子自由基清除率。

ABTS 阳离子自由基清除率/%=[($A_t$–$A_r$)/$A_r$]×100%　(3)

### 1.4　数据处理

各项数据测定均重复 3 次。本研究采用 Excel 2019、Origin 2024 等软件进行数据处理, Design-Expert 13 软件进行响应面处理分析, SPSS 27.0 进行显著性分析($P$<0.05)。

## 2　结果与分析

### 2.1　单因素实验结果分析

单因素实验结果如图 1、图 2 所示。

#### 2.1.1　乙醇体积分数对总黄酮提取率的影响

图 1A 和图 2A 表明, 花被和花粉总黄酮提取率在 40%~60%乙醇体积分数范围内逐渐增加, 当乙醇体积分数达到 60%时, 花粉和花被的总黄酮提取率均达到峰值, 其中花粉的总黄酮提取率为(3.88±0.16)%, 花被的总黄酮提取率为(1.97±0.05)%, 当乙醇体积分数大于 60%时, 总黄酮提取率降低, 分析其原因可能是乙醇浓度过高会导致醇溶性杂质成分溶出, 与总黄酮形成竞争性溶出, 降低总黄酮的溶出率[24]。因此选择 50%、60%、70%乙醇提体积分数作为花被花粉响应面乙醇浓度条件。

#### 2.1.2　液料比对总黄酮提取率的影响

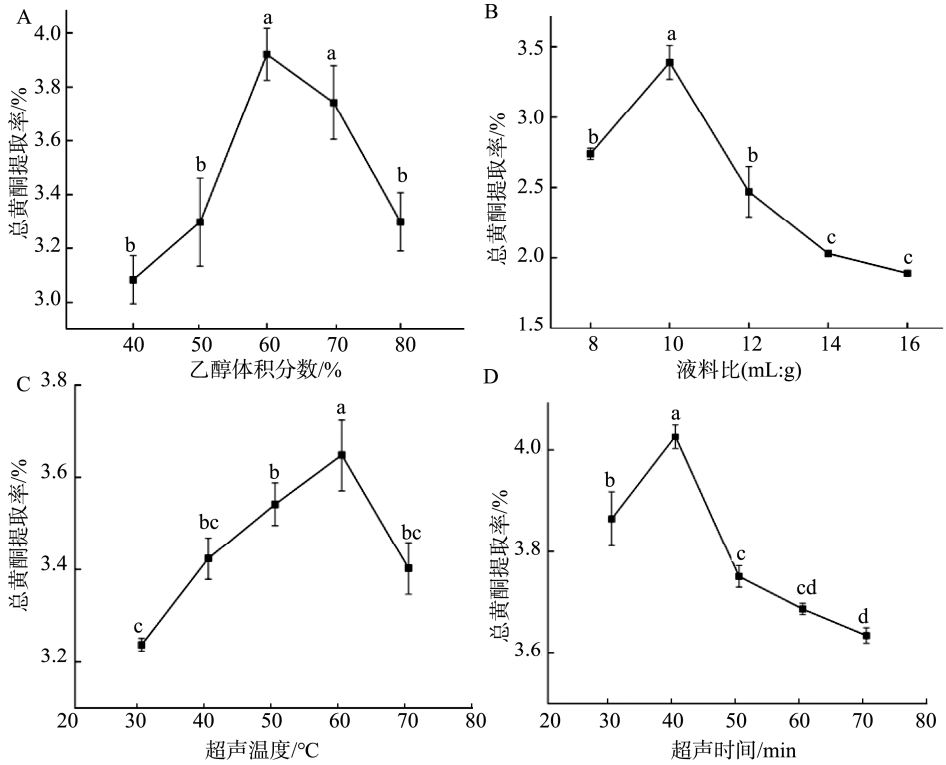
图 1B 和图 2B 所示, 随着液料比增加, 花被和花粉总黄酮提取率先增加后下降, 均在液料比 1:10 (mL:g)时达到最大值, 分别为(3.38±0.25)%和(2.16±0.06)%。可能是因为在液料比 8:1~10:1 (mL:g)时, 溶剂用量不足, 提取率随溶剂增加而增加, 当达到 10:1 (mL:g)时, 黄酮成分已基本提取完, 继续增加溶剂, 会有更多的杂质析出[25], 使得总黄酮提取率下降。综上选择 8:1、10:1、12:1 (mL:g)作为花被和花粉响应面液料比条件。

#### 2.1.3　超声温度对总黄酮提取率的影响

图 1C 和图 2C 表明, 随着超声温度升高总黄酮提取率呈先升后降的趋势, 花被与花粉的总黄酮提取率分别在 60 ℃和 50 ℃时达到最大值为 (3.64±0.13)% 和 (2.15±0.05)%。推测其原因可能是, 随着温度的升高, 样品内部黄酮类分子的热运动速度明显加快, 分子动能增大, 从而增强了黄酮类成分与溶剂分子之间的相互作用, 使得黄酮类成分更易于溶解于溶剂之中, 当温度超过临界值后, 高温会使得分子具有更高的能量, 使得一些黄酮类物质分子内部的化学键发生断裂, 影响其在溶剂中的溶解性以及稳定性, 导致总黄酮提取率降低, 因此选择 50、60、70 ℃作为花被响应面的超声温度条件, 选择 40、50、60 ℃作为花粉响应面的超声条件。

#### 2.1.4　超声时间对总黄酮提取率的影响

图 1D 和图 2D 表明, 总黄酮提取率随着超声时间延长呈先升后降的趋势, 花被在 40 min 时达到最大值(4.02±0.04)%, 花粉在 60 min 时达到最大值为(2.32±0.07)%。究其原因, 可能是随着提取时间持续增加, 体系内的热效应与机械效应逐渐加剧, 致使黄酮结构受损.




注: 不同小字母表示具有显著性差异($P$<0.05), 图 2 同。

图 1　不同因素对花被总黄酮提取率的影响

Fig.1　Effects of different factors on the total flavonoid extraction for perianth

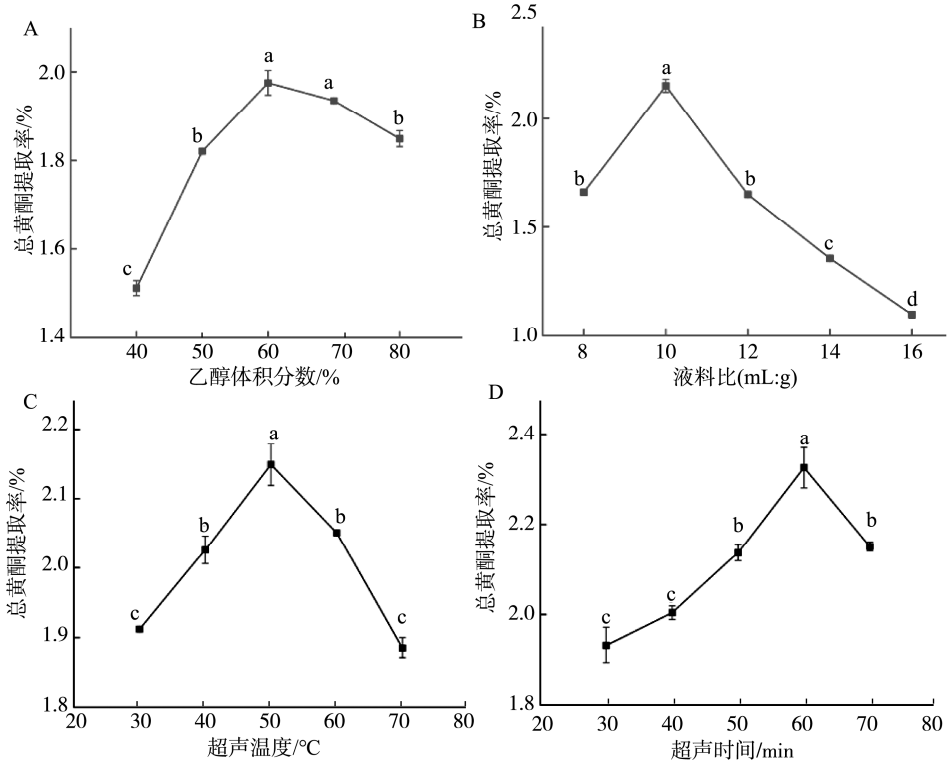



图 2 不同因素对花粉总黄酮提取率的影响

Fig.2 Effects of different factors on the total flavonoid extraction for pollen

总黄酮出现化学变化或失活现象; 此外, 其他杂质不断溶出并与黄酮竞争溶剂, 也进一步造成提取率降低[26]。花粉独特的耐酸、耐碱及耐热结构特性, 也可能是造成其黄酮类成分溶出速率较慢的重要原因。因此选择 30、40、50 min 为花被响应面的超声时间条件, 选择 50、60、70 min 为花粉响应面的超声时间条件。

## 2.2 响应面法优化花被和花粉的总黄酮最佳提取工艺

### 2.2.1 花被响应面实验设计及结果

结合单因素实验结果, 以乙醇体积分数($A$)、液料比($B$)、超声温度($C$)和超声时间($D$)为自变量, 探索其对花被总黄酮提取率的影响, 根据表 3 响应面设计 29 组数据进行多元拟合建立以花被总黄酮提取率为目标的回归方程为 $Y$=4.65–0.037$A$+0.086$B$+0.091$C$–0.082$D$+0.047$AB$–0.015$AC$–0.0075$AD$+0.075$BC$+0.13$BD$+0.042$CD$–0.65$A^2$–0.47$B^2$–0.86$C^2$–0.53$D^2$。对表 3 结果进行方差分析, 结果见表 4, 模型 $P$<0.0001, 表明模型具有高度显著性; 失拟项 $P$=0.7188>0.05, 损失不显著, 表明模型具有较好的拟合度, 模型成立[27]; 模型的决定系数 $r^2$=0.9099, 表明拟合度较高; 校正系数 $R^2_{adj}$=0.8198, 表明该模型可以解释 81.98%变异。二次项 $A^2$、$B^2$、$C^2$、$D^2$ 均有极显著影响($P$<0.01), 其余因素影响均不显著($P$>0.05), 各因素影响程度依次为 $C$>$B$>$D$>$A$。

### 2.2.2 花被交互作用响应面分析

响应面坡度可作为交互作用显著性的判断依据, 坡度越陡, 交互作用越显著; 坡度越平缓, 交互作用越不显著[28]。从等高线分布来看, 图形越接近圆形, 交互作用越弱; 越趋近椭圆形, 则交互作用越强[29]。

结合方差分析结果, 进一步分析响应面图(图 3), 可知液料比/超声时间的交互作用响应曲面更加陡峭, 结合方差分析, 可知交互项 BD 影响效果最大。

### 2.2.3 花被总黄酮提取最优工艺以及验证实验

通过 Design-Expert 13 软件分析, 中国沙棘雄花总黄酮提取率最佳提取条件为: 乙醇体积分数 59.68%, 液料比 9.8:1 (mL:g), 提取温度 60.56 ℃, 提取时间 39.13 min, 总黄酮提取率为 4.66%。考虑到实际操作的局限性, 确定乙醇体积分数 60%, 液料比 10:1 (mL:g), 提取温度 61 ℃, 提取时间 39 min, 经 3 次平行实验验证, 总黄酮平均提取率为 (4.59±0.12)%, 该结果与理论预测值 4.66%高度接近, 证明本实验所优化的工艺具有良好的可靠性与实用性。

### 2.2.4 花粉响应面实验设计及结果

基于 2.1 单因素实验结果, 以乙醇体积分数($A$'), 液料比($B$')、超声温度($C$')和超声时间($D$')为变量, 分析其对花粉总黄酮提取率的影响, 通过 Design-Expert 13 软件对 29 组数据进行多元回归拟合, 得二次回归方程为 $Y$=2.05–0.018$A$'+0.050$B$'+0.036$C$'+0.031$D$'–0.010$A$'$B$'+0.015$A$'$C$'+0.025$A$'$D$'–0.018$B$'$C$'+0.057$B$'$D$'+0.11$C$'$D$'–0.13$A'^2$–0.18$B'^2$–0.22$C'^2$–0.19$D'^2$。对表 5 数据进行方差分析, 结果见表 6, 模型 $P$<0.0001, 说明实验达到极显著条件;

**表 3　花被 Box-Behnken 响应面法设计与结果**

**Table 3　Design and results of Box-Behnken response surface methodology for perianth**

| 序号 | *A*(乙醇体积分数)/% | *B*(液料比)(mL:g) | *C*(超声温度)/℃ | *D*(超声时间)/min | 总黄酮提取率/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | –1 | –1 | 0 | 0 | 3.83±0.12 |
| 2 | 1 | –1 | 0 | 0 | 3.48±0.02 |
| 3 | –1 | 1 | 0 | 0 | 3.57±0.23 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3.41±0.10 |
| 5 | 0 | 0 | –1 | –1 | 3.25±0.07 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | –1 | 3.38±0.18 |
| 7 | 0 | 0 | –1 | 1 | 3.14±0.12 |
| 8 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3.44±0.15 |
| 9 | –1 | 0 | 0 | –1 | 3.59±0.05 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | –1 | 3.63±0.07 |
| 11 | –1 | 0 | 0 | 1 | 3.52±0.12 |
| 12 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3.53±0.08 |
| 13 | 0 | –1 | –1 | 0 | 3.43±0.21 |
| 14 | 0 | 1 | –1 | 0 | 2.99±0.13 |
| 15 | 0 | –1 | 1 | 0 | 3.68±0.14 |
| 16 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3.54±0.09 |
| 17 | –1 | 0 | –1 | 0 | 3.03±0.07 |
| 18 | 1 | 0 | –1 | 0 | 3.07±0.20 |
| 19 | –1 | 0 | 1 | 0 | 2.99±0.11 |
| 20 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2.97±0.07 |
| 21 | 0 | –1 | 0 | –1 | 3.87±0.15 |
| 22 | 0 | 1 | 0 | –1 | 3.55±0.08 |
| 23 | 0 | –1 | 0 | 1 | 3.23±0.08 |
| 24 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3.43±0.16 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.76±0.09 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.32±0.06 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.93±0.11 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.83±0.12 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.43±0.07 |

失拟项 $P>0.05$, 说明模型拟合程度良好, 能够较准确地预测响应值。交互项 *CD*, 二次项 $A'^2$、$B'^2$、$C'^2$、$D'^2$ 均有极显著影响($P<0.05$); 一次项 *B'*, 交互项 *C'D'* 有显著影响($P<0.05$); 其余因素影响均不显著($P>0.05$), 各因素影响程度依次为 *B'*>*C'*>*D'*>*A'*。

**表 4　花被回归模型方差分析及显著性实验**

**Table 4　Analysis of variance and significance test for perianth regression model**

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | *F* | *P* |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 7.6300 | 14 | 0.5400 | 10.1000 | <0.0001 |
| *A* | 0.0160 | 1 | 0.0160 | 0.3000 | 0.5931 |
| *B* | 0.0880 | 1 | 0.0880 | 1.6400 | 0.2213 |
| *C* | 0.0990 | 1 | 0.0990 | 1.8400 | 0.1969 |
| *D* | 0.0800 | 1 | 0.0800 | 1.4800 | 0.2433 |
| *AB* | 0.0090 | 1 | 0.0090 | 0.1700 | 0.6887 |
| *AC* | 0.0009 | 1 | 0.0009 | 0.0170 | 0.8991 |
| *AD* | 0.0002 | 1 | 0.0002 | 0.0040 | 0.9494 |
| *BC* | 0.0230 | 1 | 0.0230 | 0.4200 | 0.5288 |
| *BD* | 0.0680 | 1 | 0.0680 | 1.2500 | 0.2818 |
| *CD* | 0.0072 | 1 | 0.0072 | 0.1300 | 0.7199 |
| $A^2$ | 2.7100 | 1 | 2.7100 | 50.4000 | <0.0001 |
| $B^2$ | 1.4600 | 1 | 1.4600 | 26.9800 | 0.0001 |
| $C^2$ | 4.8100 | 1 | 4.8100 | 89.1800 | <0.0001 |
| $D^2$ | 1.8200 | 1 | 1.8200 | 33.7700 | <0.0001 |
| 残差 | 0.7600 | 14 | 0.0540 | | |
| 失拟项 | 0.4800 | 10 | 0.0480 | 0.6800 | 0.7188 |
| 纯误差 | 0.2800 | 4 | 0.0700 | | |
| 总回归 | 8.3800 | 28 | | | |
| $r^2$=0.9099 | | | $R_{adj}^2$=0.8198 | | |

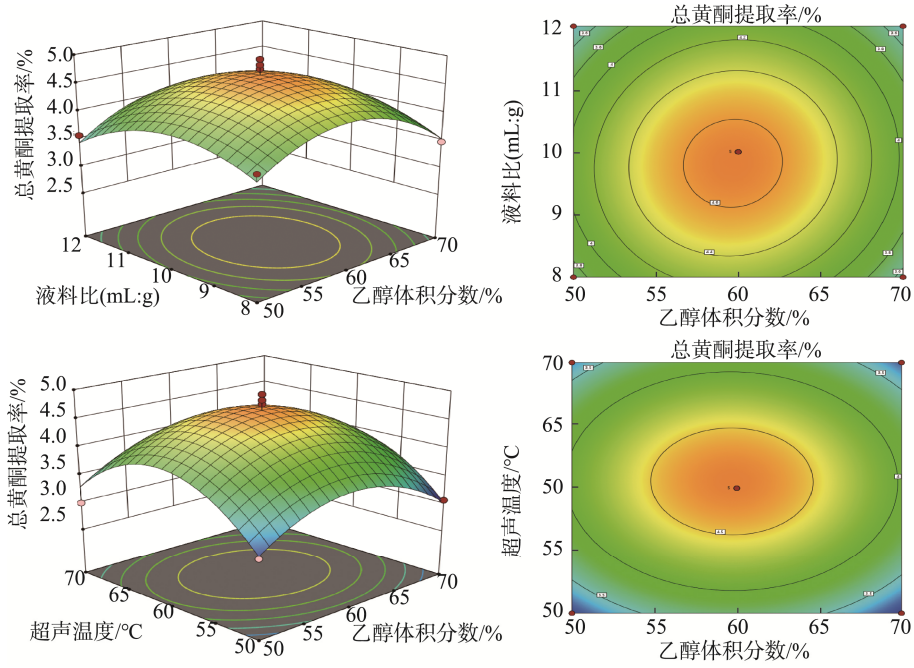



图 3　花被各因素响应面图

Fig.3　Response surface plots of various factors of for perianth

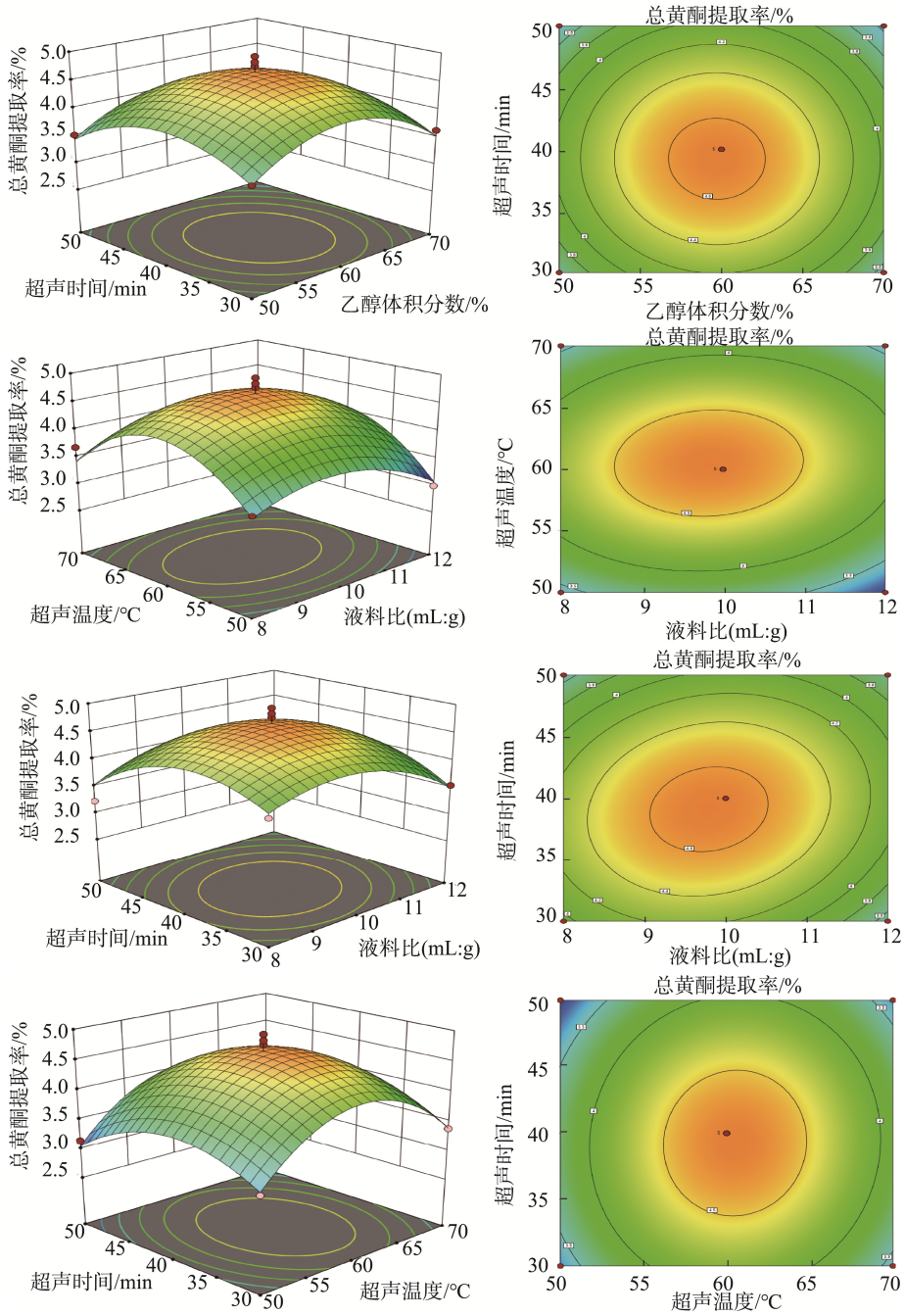



图 3(续) 花被各因素响应面图

Fig.3 Response surface plots of various factors of for perianth

2.2.5 花粉响应面分析

响应曲面图的凸出程度，与各因素是否显著影响中国沙棘花粉总黄酮提取率有密切关系。响应曲面图越凸出，相应各因素的影响越显著；反之则影响越小。此外，等高线图可直观反映两因素间交互作用的显著程度。结合方差试验结果和响应面图，*C*’*D*’交互影响最显著，*A*’*B*’交互影响最不显著。各交互因素影响程度依次为 *C*’*D*’>*B*’*D*’>*A*’*D*’>*B*’*C*’>*A*’*C*’>*A*’*B*’(图 4，表 6)。

2.2.6 花粉优工艺条件确定以及验证

通过运用 Design-Expert 13 软件进行分析与优化，确定中国沙棘花花粉总黄酮的最优提取工艺参数为：69.28%乙醇体积分数，液料比 10.28:1 (mL:g)，超声温度 51.67 ℃，超声时间 62.18 min。考虑到实验操作的实际可行性与便捷性，对上述参数进行适当调整，确定实际采用的提取工艺为：乙醇浓度 70%，液料比调整为 10:1 (mL:g)，超声温度为 52 ℃，超声时间为 62 min。

按照优化后的工艺条件，平行开展 3 次实验。实验结果显示，中国沙棘花粉总黄酮的平均提取率为(1.88±0.06)%，该结果与软件预测值 1.94%较为接近，表明本次通过设计优化所得到的工艺条件具有较高的准确性。

表 5　花粉 Box-Behnken 响应面法设计与结果

Table 5　Design and results of Box-Behnken response surface methodology for pollen

| 实验号 | *A*’(乙醇浓度)/% | *B*’(液料比)(mL:g) | *C*’(提取温度)/℃ | *D*’(提取时间)/min | 总黄酮提取率/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | –1 | –1 | 0 | 0 | 1.68±0.08 |
| 2 | 1 | –1 | 0 | 0 | 1.70±0.02 |
| 3 | –1 | 1 | 0 | 0 | 1.80±0.21 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1.78±0.11 |
| 5 | 0 | 0 | –1 | –1 | 1.68±0.17 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | –1 | 1.59±0.21 |
| 7 | 0 | 0 | –1 | 1 | 1.47±0.08 |
| 8 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1.84±0.14 |
| 9 | –1 | 0 | 0 | –1 | 1.82±0.19 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | –1 | 1.63±0.13 |
| 11 | –1 | 0 | 0 | 1 | 1.80±0.10 |
| 12 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1.71±0.09 |
| 13 | 0 | –1 | –1 | 0 | 1.56±0.16 |
| 14 | 0 | 1 | –1 | 0 | 1.74±0.11 |
| 15 | 0 | –1 | 1 | 0 | 1.60±0.14 |
| 16 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1.71±0.17 |
| 17 | –1 | 0 | –1 | 0 | 1.68±0.07 |
| 18 | 1 | 0 | –1 | 0 | 1.68±0.11 |
| 19 | –1 | 0 | 1 | 0 | 1.72±0.07 |
| 20 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1.78±0.16 |
| 21 | 0 | –1 | 0 | –1 | 1.65±0.13 |
| 22 | 0 | 1 | 0 | –1 | 1.59±0.14 |
| 23 | 0 | –1 | 0 | 1 | 1.67±0.07 |
| 24 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1.84±0.06 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.05±0.04 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.07±0.15 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.02±0.12 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.99±0.17 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.13±0.07 |

## 2.3　中国沙棘花被和花粉总黄酮的抗氧化活性分析

DPPH 自由基作为亲脂性自由基的代表, 被广泛用于评价脂质性物质的抗氧化活性[30], 除 DPPH 自由基外, ABTS 阳离子自由基也多用来评价抗氧化活性, ABTS 可以产生稳定的自由基阳离子, 这种阳离子可溶于水相和有机

表 6　花粉回归模型方差分析及显著性实验

Table 6　Analysis of variance and significance test for pollen regression models

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | *F* | *P* |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 0.6900 | 14 | 0.0490 | 13.9700 | <0.0001 |
| *A*’ | 0.0040 | 1 | 0.0040 | 1.1400 | 0.3028 |
| *B*’ | 0.0300 | 1 | 0.0300 | 8.5100 | 0.0112 |
| *C*’ | 0.0150 | 1 | 0.0150 | 4.3700 | 0.0552 |
| *D*’ | 0.0110 | 1 | 0.0110 | 3.2400 | 0.0936 |
| *A*’*B*’ | 0.0004 | 1 | 0.0004 | 0.1100 | 0.7412 |
| *A*’*C*’ | 0.0090 | 1 | 0.0090 | 0.2600 | 0.6212 |
| *A*’*D*’ | 0.0025 | 1 | 0.0025 | 0.7100 | 0.4138 |
| *B*’*C*’ | 0.0012 | 1 | 0.0012 | 0.3500 | 0.5649 |
| *B*’*D*’ | 0.0130 | 1 | 0.0130 | 3.7500 | 0.0732 |
| *C*’*D*’ | 0.0530 | 1 | 0.0530 | 15.0100 | 0.0017 |
| *A*’$^2$ | 0.1000 | 1 | 0.1000 | 28.8400 | <0.0001 |
| *B*’$^2$ | 0.2200 | 1 | 0.2200 | 61.4100 | <0.0001 |
| *C*’$^2$ | 0.3000 | 1 | 0.3000 | 86.2100 | <0.0001 |
| *D*’$^2$ | 0.2300 | 1 | 0.2200 | 63.9600 | <0.0001 |
| 残差 | 0.0490 | 14 | 0.0035 | | |
| 失拟项 | 0.0380 | 10 | 0.0038 | 1.3500 | 0.4147 |
| 纯误差 | 0.0110 | 4 | 0.0028 | | |
| 总回归 | 0.7400 | | | | |
| $r^2$=0.9332 | | | $R_{adj}^2$=0.8664 | | |

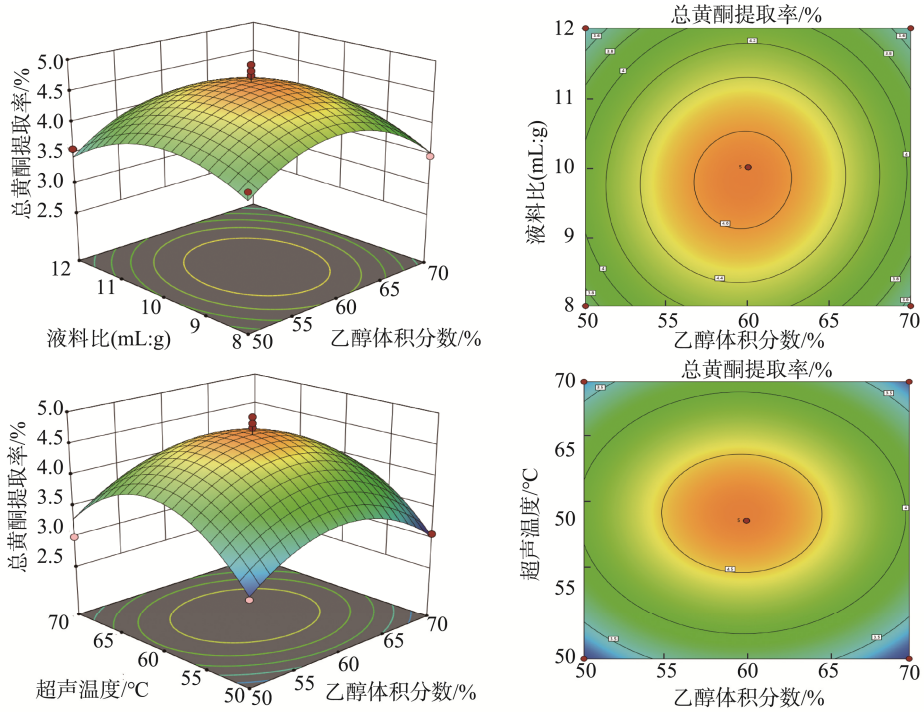



图 4　花粉各因素响应面图

Fig.4　Response surface plots of various factors for pollen

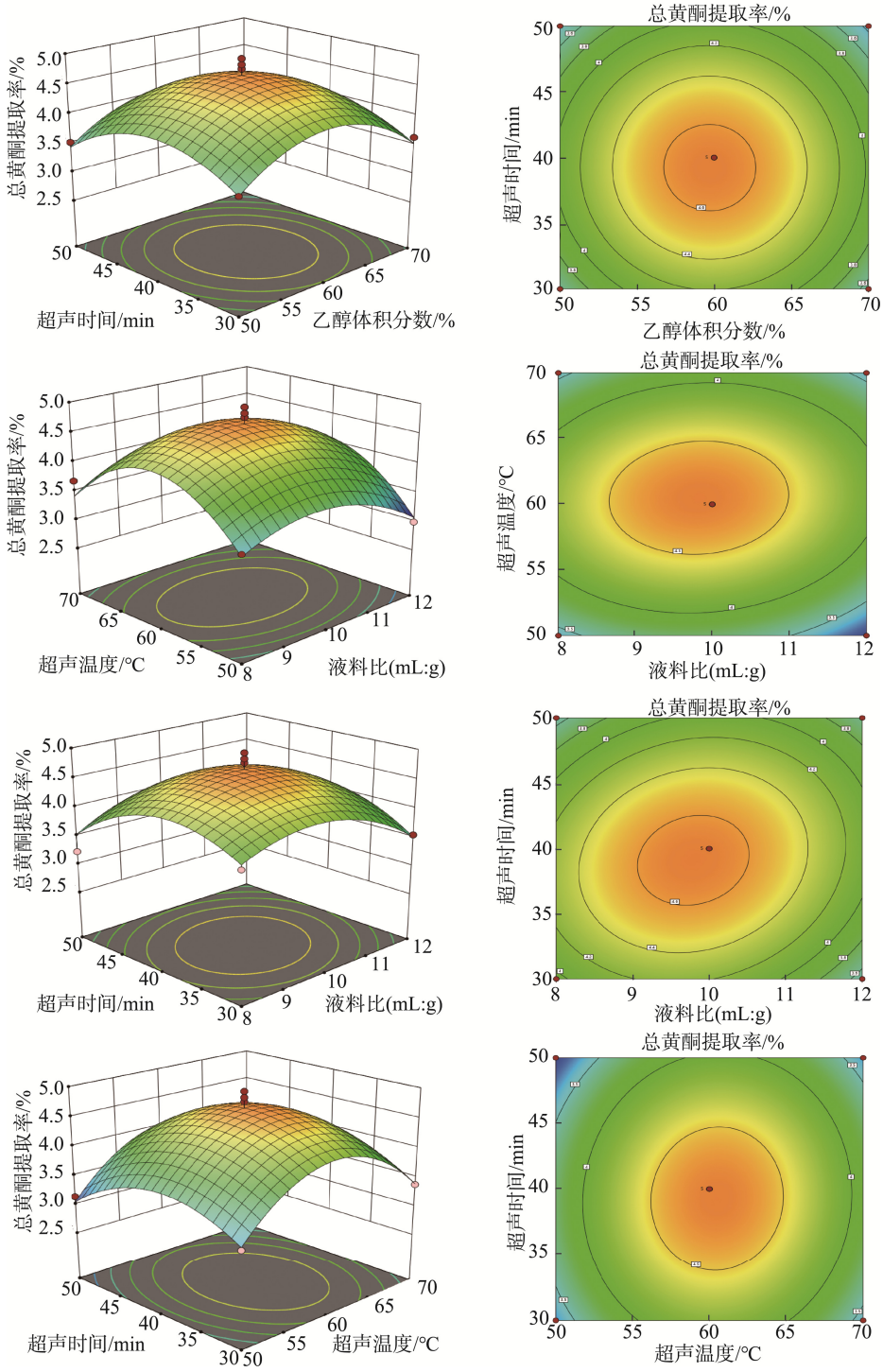



图 4(续) 花粉各因素响应面图

Fig.4 Response surface plots of various factors for pollen

相，允许同时检测亲水和亲脂抗氧化剂，能够更全面地评估抗氧化能力[31]，黄酮类化合物可以和自由基的反应部位发生反应，使其还原以更稳定的状态和更低的活性存在，因此黄酮类化合物表现出一定的抗氧化能力。

以维生素 C (vitamin C, VC)为阳性对照，由图 5 可知，中国沙棘雄花花粉和花被黄酮提取液的 DPPH 和 ABTS 阳离子自由基清除能力均随浓度的增加而增强，且花被两种自由基清除能力整体比花粉强。分析其原因其一可能是花被总黄酮含量高于花粉，其二可能与花粉独特的结构有关，花粉的细胞壁具有较强的耐酸碱、耐高温和耐高温特性，使得其内部的活性物质较难被人体吸收和利用，常常需要一定破壁方法来提升活性[32]。当质量浓度为 0.4 mg/mL 时，

花被、花粉 DPPH 自由基清除自由基能力分别为(37.51±0.04)%和(23.43±0.02)%。清除能力在 0.4~1.6 mg/mL 质量浓度范围内增强幅度较大, 随后增强范围较小, 当质量浓度为 4.0 mg/mL 时分别达到最大值(84.87±0.03)%、(82.53±0.11)%; 在 0.08 mg/mL 质量浓度时 ABTS 阳离子自由基清除能力分别为 58.26%、50.44%, 在 0.08~0.80 mg/mL, 花被和花粉对ABTS阳离子自由基的清除能力均随着质量浓度增加而提高, 于 0.8 mg/mL 质量浓度达到最大值分别为(83.21±0.13)%和(79.37±0.06)%, 两种自由基的半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, $IC_{50}$)的大小关系均为: 花粉>花被>VC, 研究证实, 花被及花粉均具备明显的 DPPH 和 ABTS 阳离子自由基清除效能, 但仍低于 VC。

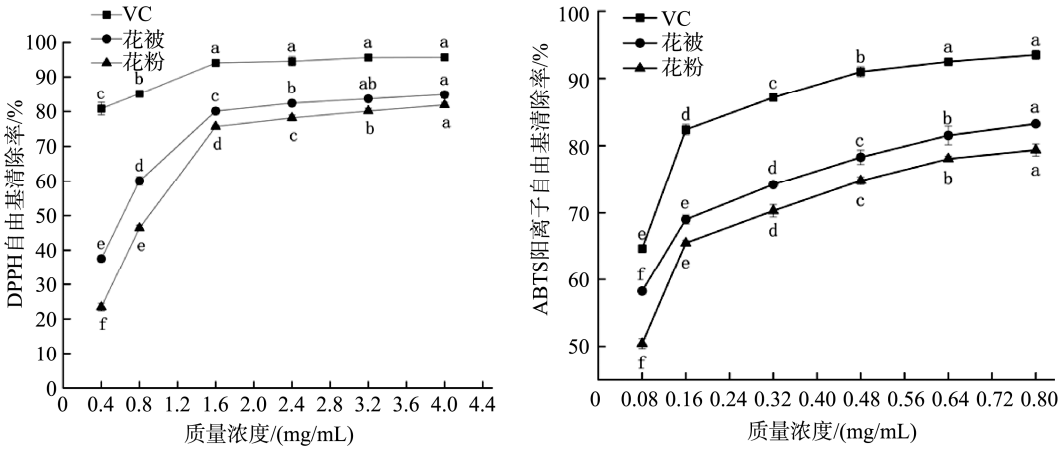



图 5　花被及花粉的 DPPH 和 ABTS 阳离子自由基清除能力

Fig.5　DPPH radical and ABTS cationic radical scavenging capacities of perianth and pollen

## 3　结　论

本研究以中国沙棘雄花花被和花粉为研究对象, 采用超声提取法, 通过单因素实验选定二者总黄酮提取范围, 进一步通过响应面优化出花被在液料比 10:1 (mL:g), 用 60%的乙醇体积分数在 61 ℃条件下超声提取 39 min 即为最优提取工艺; 确定花粉最佳提取工艺为乙醇浓度 70%, 液料比 10:1 (mL:g), 52 ℃超声提取 62 min。在二者最佳工艺下, 花被和花粉的总黄酮提取率分别为(4.59±0.12)%, (1.88±0.06)%, 花粉总黄酮提取率较低可能与其细胞壁结构有关。有研究表明沙棘不同部位总黄酮的含量具有一定的差异性, 表现为叶片总黄酮含量最高, 其次为果肉、果渣、果皮, 其籽的总黄酮含量最低[33], 而在赵文娟等[34]研究结果表明, 吴起野生沙棘果实部位总黄酮含量最高, 沙棘枝杆总黄酮含量最低。二者研究的差异性可能与沙棘所处气候、环境的因素有关, 在后期研究中应增加中国沙棘雄花与中国沙棘其他部位的黄酮含量、黄酮类成分的差异性研究。

DPPH 和 ABTS 阳离子自由基的清除效率呈现一定阶段的剂量性依赖, 研究表明花被和花粉均具有较强的抗氧化能力, 但花被两种自由基的清除能力均大于花粉, 抗氧化机制复杂, 沙棘中花青素、酚酸、多糖类成分均有抗氧化活性, 不同的类黄酮表现出不同的抗氧化能力, 这与黄酮结构中的官能团类型、数量和排列有关[35], 有研究表明沙棘黄酮成分中山奈酚、槲皮素、异鼠李素及其衍生物可能是沙棘黄酮具有较强抗氧化活性的原因。在成春亚[36]的研究中, 发现中国沙棘雄花的氨基酸种类齐全, 具有开发潜力。本研究对中国沙棘雄花总黄酮进行了抗氧化活性研究, 结果表明沙棘雄花花被和花粉均具有开发为抗氧化剂的潜能, 为中国沙棘雄花资源的开发利用提供了新思路。

## 参考文献

[1] 廉永善, 陈学林. 沙棘属植物的系统分类[J]. 沙棘, 1996(1): 15–24.
LIAN YS, CHEN XL. Systematic classification of plants of the genus *Seabuckthorn* [J]. Seabuckthorn Hippophae, 1996(1): 15–24.

[2] 明悦. 《全国沙棘资源本底调查报告》发布[J]. 绿色中国, 2022(13): 58–59.
MING Y. *National Seabuckthorn resources background investigation report* released [J]. Green China, 2022(13): 58–59.

[3] 任李成城, 刘振华, 董琦, 等. 沙棘黄酮类成分及其药理作用的研究进展[J]. 中国药物化学杂志, 2023, 33(8): 598–617.
REN LCC, LIU ZH, DONG Q, *et al.* Recent progress on the flavonoid components and pharmacological effects of *Hippophae rhamnoides* L. [J]. Chinese Journal of Medicinal Chemistry, 2023, 33(8): 598–617.

[4] 王玉净, 都治香, 张霞, 等. 沙棘黄酮通过调控 TLR4/NF-κB 信号通路改善大鼠多囊卵巢综合征的作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 340–347.
WANG YJ, DU ZX, ZHANG X, *et al.* Effect of *Hippophae rhamnoides* Flavone on improving polycystic ovarian syndrome in rats by regulating TLR4/NF-κB signaling pathway [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 340−347.

[5] 张彤, 吕中睿, 魏继华, 等. 不同沙棘品种种子中 α-亚麻酸含量差异及相关基因分析[J]. 林业科学研究, 2020, 33(4): 1–8.
ZHANG T, LV ZR, WEI JH, *et al*. Analysis of α-linolenic acid content and related genes in seeds of sea buckthorn cultivars [J]. Forest Research, 2020, 33(4): 1–8.

[6] 郑文惠, 白海英, 王丽瑶, 等. UPLC-QTOF-MS 法分析沙棘果实、叶和枝的成分[J]. 中成药, 2020, 42(11): 2940–2947.
ZHENG WH, BAI HY, WANG LY, *et al.* Analysis of constituents in the fruit, leaf and twig of *Hippophae rhamnoides* by UPL-QTOF-MS [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2020, 42(11): 2940–2947.

[7] 黄瑜, 张锡宇, 赵海桃, 等. 沙棘叶提取物的体外抗氧化及乙酰胆碱酯酶抑制能力[J]. 精细化工, 2024, 41(2): 391–400.

HUANG Y, ZHANG XY, ZHAO HT, *et al. In vitro* antioxidant and acetylcholinesterase inhibitory capacity of sea buckthorn leaf extracts [J]. Fine Chemicals, 2024, 41(2): 391–400.

[8] 王颖, 张智锋, 任婧楠, 等. 沙棘活性成分及功能特性的研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(4): 373–381.
WANG Y, ZHANG ZF, REN JN, *et al.* Research progress on active components and functional properties of sea buckthorn [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 373–381.

[9] ZHOU W, OUYANG J, HU N, *et al.* Flavonoids from *Hippophae rhamnoides* Linn. revert doxorubicin-induced cardiotoxicity through inhibition of mitochondrial dysfunction in H9c2 cardiomyoblasts *in vitro* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(4): 3174.

[10] WU H, LI C, CUI M, *et al.* Polyphenols from *Hippophae rhamnoides* suppressed colon cancer growth by regulating miRNA-mediated cell cycle arrest and apoptosis *in vitro* and *in vivo* [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 87: 104780.

[11] JIANG F, GUAN H, LIU D, *et al.* Flavonoids from sea buckthorn inhibit the lipopolysaccharide-induced inflammatory response in RAW264. 7 macrophages through the MAPK and NF-*κ*B pathways [J]. Food and Function, 2017, 8(3): 1313–1322.

[12] PANG X, ZHAO J, ZHANG W, *et al.* Antihypertensive effect of total flavones extracted from seed residues of *Hippophae rhamnoides* L. in sucrose-fed rats [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2008, 117(2): 325–31.

[13] 赵二劳, 展俊岭, 范建凤. 沙棘黄酮抗衰老作用研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(10): 4882–4887.
ZHAO ERL, ZHAN JL, FAN JF. Research progress on anti-aging effect of flavonoids in *Hioppophae rhamnoides* L. [J]. Genomics and Applied Biology, 2020, 39(10): 4882–4887.

[14] HAO P, DING R, BAI X, *et al.* Sea buckthorn regulates PXR/CAR/NF-*κ*B signaling and restores CYP2C metabolic function in BCG-induced hepatitis [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 351: 120142.

[15] 宁志雪, 牛广财, 朱立斌, 等. 沙棘活性成分、生理功能及开发利用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 221–227.
NING ZX, NIU GC, ZHU LB, *et al.* Research progress on the active compounds of sea buckthorn and their physiological functions and utilization [J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 221–227.

[16] BIRO R, OMELKA R, SAROCKA A, *et al.* Beneficial effects of *Elaeagnus rhamnoides* (L.) A. nelson and its most abundant flavonoids on the main mechanisms related to diabetic bone disease [J]. Pharmaceutical Biology, 2025, 63(1): 460–489.

[17] YANG Z, ZHANG Z, ZHANG Y, *et al.* Sea buckthorn flavonoids: Purification, identification, and *in vitro* anti-inflammatory effects [J]. Journal of Chromatography A, 2025, 1750: 465885.

[18] 张雪娟, 张欣, 王小莉, 等. 中国沙棘花形态结构的扫描电镜观察[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 7–13.
ZHANG XJ, ZHANG X, WANG XL, *et al.* Blossom anatomy of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Rousi [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 7–13.

[19] 成春亚, 马艳珠, 张文广, 等. 中国沙棘雄花花被和花粉蛋白质营养评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 311–318.
CHENG CY, MA YZ, ZHANG WG, *et al.* Protein nutrition evaluation of the tepals and pollen of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Rousi male flower [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(9): 311–318.

[20] 刘秋月, 张振东, 刘树民, 等. 沙棘不同部位药理活性与药用价值探究[J]. 药学前沿, 2025, 29(5): 802–815.
LIU QY, ZHANG ZD, LIU SM, *et al*. Exploration of the pharmacological activities and medicinal values of different parts of sea buckthorn [J]. Frontiers in Pharmaceutical Sciences, 2025, 29(5): 802–815.

[21] 李东香, 关荣发, 黄海智, 等. 3 种新疆沙棘黄酮的提取优化及抗氧化活性对比[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 157–167.
LI DX, GUAN RF, HUANG HZ, *et al.* Optimization of extraction of flavonoids from three kinds of Xinjiang sea buckthorns and comparative of antioxidant activities [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(4): 157–167.

[22] 王斌利, 张莉霞, 石晓峰, 等. 紫斑牡丹花粉不同浓度乙醇提取物抗氧化能力研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2018, 25(2): 65–68.
WANG BL, ZHANG LX, SHI XF, *et al.* Study on antioxidant activity of different concentrations of alcohol extracts from *Paeonia rockii* pollen [J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2018, 25(2): 65–68.

[23] 王斌利. 紫斑牡丹花粉质量标准的建立及其抗氧化活性研究[D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2017.
WANG BL. Stdudies on the the quality standardand antioxidant activity of pollen of *Paeonia rockii* [D]. Lanzhou: Gansu University of Chinese Medicine, 2017.

[24] 马慧, 马萍, 常雪花, 等. 响应面法优化黑桑椹黄酮超声波提取工艺[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(7): 58–63.
MA H, MA P, CHANG XH, *et al.* Optimization of ultrasonic extraction process of flavonoids from black mulberry by response surface methodology [J]. Storage and Process, 2024, 24(7): 58–63.

[25] SUN Z, LIU W, ZHANG S, *et al.* Optimization of flavonoid extraction from abelmoschus manihot flowers using ultrasonic techniques: Predictive modeling through response surface methodology and deep neural network and biological activity assessment [J]. Molecules, 2024, 29(11): 2610.

[26] 邹芷琪, 符毓夏, 李连春, 等. 黄花倒水莲花总黄酮超声提取工艺优化[J]. 中成药, 2024, 46(6): 1823–1827.
ZOU ZQ, FU YX, LI LC, *et al.* Optimization of ultrasound extraction process for total flavonoids from *Polygala fallax* flowers [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(6): 1823–1827.

[27] SHENG ZL, WAN PF, DONG CHL, *et al.* Optimization of total flavonoids content extracted from *Flos populi* using response surface methodology [J]. Industrial Crops and Products, 2012, 43: 778–786.

[28] 任美燕. 红薯叶黄酮超声提取工艺优化、抗氧化及抑菌研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(1): 224–232.
RENG MY. Optimization of ultrasonic extraction process of flavonoids from sweetpotato leaves and its antioxidative and antibacterial ability [J]. China Food Additives, 2023, 34(1): 224–232.

[29] 许晨新, 杨海东, 张思访, 等. 响应面法优化雨花茶茶多酚提取工艺及其化学模式识别研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(3): 33–41.
XU CX, YANG HD, ZHANG SF, *et al.* Optimization of extraction process of tea polyphenols from Yuhua tea by response surface methodology and its chemical pattern recognition [J]. China Food Additives, 2023, 34(3): 33–41.

[30] SUO W, WANG W, LI D, *et al.* Optimization of ultrasonic-enzymatic-assisted extraction of flavonoids from sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) pomace: Chemical composition and biological activities [J]. Foods, 2025, 14(10): 1656.

[31] HEN N, WANG T, GAN Q, *et al.* Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132531.

[32] WIERMANN R, GUBATZ S. Pollen wall and sporopollenin [M]. Westfall, Germany: Academic Press, 2008.

[33] 邢金香. 沙棘不同部位总黄酮含量的比较研究[J]. 山西林业科技, 2018, 47(3): 4–5.
XING JX. Comparative study on total flavonoids content in different parts of *Hippophae rhamnoides* L. [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2018, 47(3): 4–5.

[34] 赵文娟, 马齐, 陈卫锋, 等. 吴起野生沙棘不同部位总黄酮含量测定[J]. 河北林果研究, 2010, 25(3): 252–254.
ZHAO WJ, MA Q, CHEN WF, *et al.* Determination of total flavonoids in different parts of Wuqi wild *Hippophae rhamnoides* L. [J]. Forestry and Ecological Sciences, 2010, 25(3): 252–254.

[35] MIAO M, CHEN X, WU Z, *et al.* Extraction, composition, and antioxidant activity of flavonoids from Xanthoceras sorbifolium Bunge leaves [J]. Journal Of Aoac International, 2023, 106(3): 769–777.

[36] 成春亚. 中国沙棘雄花质量控制方法及抗氧化活性初步研究[D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2023.
CHENG CY. Study on quality control methods and antioxidant activities of male flower of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Rousi [D]. Lanzhou: Gansu University of Chinese Medicine, 2023.

(责任编辑: 冯东慧 韩晓红)