

响应面优化蓝花楹花色素的提取及其稳定性研究

唐凤¹, 邓建梅^{1,2}, 余传波^{1,2*}

¹攀枝花学院生物与化学工程学院(农学院), 四川 攀枝花

²攀枝花市干热河谷特色生物资源开发四川省高校重点实验室, 四川 攀枝花

收稿日期: 2026年3月5日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年5月26日

摘要

本研究以蓝花楹花朵为原料, 采用超声波辅助提取的方法, 通过响应面优化提取工艺, 探究浸提液料液比、温度、提取时间、柠檬酸溶液浓度等对蓝花楹色素提取率的影响, 获得最佳提取工艺条件。以及探究蓝花楹花色素在光照、温度、酸碱性、金属离子条件下的稳定性。结果显示, 各因素影响大小为: 超声温度 > 柠檬酸浓度 > 提取时间。最佳提取工艺为: 料液比1:40、温度40℃、时间25 min、柠檬酸浓度10%, 此时提取率达15.008%。稳定性研究表明, 该色素在光照、高温($\geq 80^{\circ}\text{C}$)、碱性条件及金属离子存在下均不稳定, 但在酸性环境中稳定性良好。

关键词

蓝花楹, 色素, 提取, 响应面, 稳定性

Response Surface Optimization for Extraction and Stability Study of Anthocyanins from *Jacaranda mimosifolia* Flowers

Feng Tang¹, Jianmei Deng^{1,2}, Chuanbo Yu^{1,2*}

¹College of Biological and Chemical Engineering (College of Agriculture), Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

²Key Laboratory of Dry-Hot Valley Characteristic Bio-Resources Development in Universities of Sichuan Province in Panzhihua City, Panzhihua Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 唐凤, 邓建梅, 余传波. 响应面优化蓝花楹花色素的提取及其稳定性研究[J]. 植物学研究, 2026, 15(3): 174-186. DOI: 10.12677/br.2026.153021

Abstract

In this study, *Jacaranda mimosifolia* (D.) Don were used as raw materials. Ultrasonic-assisted extraction combined with response surface methodology was adopted to optimize the extraction process. The effects of solid-liquid ratio, extraction temperature, extraction time and citric acid concentration on the extraction rate of jacaranda pigment were investigated to obtain the optimal extraction conditions. Meanwhile, the stability of jacaranda anthocyanin under light, temperature, pH and metal ions was explored. The results showed that the influence order of factors was: ultrasonic temperature > citric acid concentration > extraction time. The optimal extraction conditions were solid-liquid ratio of 1:40, temperature of 40°C, extraction time of 25 min and citric acid concentration of 10%, with an extraction rate of 15.008%. Stability tests indicated that the pigment was unstable under light, high temperature ($\geq 80^\circ\text{C}$), alkaline conditions and metal ions, while it exhibited good stability in acidic environments.

Keywords

Jacaranda mimosifolia, Pigment, Extraction, Response Surface Methodology, Stability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

蓝花楹(学名: *Jacaranda mimosifolia* (D.) Don)是紫葳科, 别名紫云木、金凤花[1]、西紫葳、非洲紫葳、巴西紫葳。属落叶乔木, 原产南美洲巴西, 中国广东、海南、广西、福建、云南南部有引种栽培。蓝花楹具有很好的观赏效果和造景效果。大量研究表明蓝花楹主要成分为三萜类、醌类、脂肪酸、类黄酮和乙酰苷等, 其花朵是多酚类物质的主要来源, 甲醇和水的提取物有很高的抗氧化性活性[2]。

天然色素主要是指从植物、动物、微生物中直接提炼出来的色素, 其具有无毒、无副作用、安全性高、保健和生物活性等优点。当今国内市场对天然植物色素的需求量日益增加, 其可应用于食品、工业、医学等行业。通过目前国内开发的常用天然色素的来源可知, 从蓝紫色的蓝花楹花朵中提取的色素是花色苷类色素的重要来源[3]。目前常用的植物色素提取方法有溶剂萃取法、微波辅助提取法、发酵提取法、果胶酶制剂处理提取法、超临界 CO_2 萃取法、脉冲电场辅助提取法、水蒸气蒸馏法、半仿生提取法等。但这些方法存在以下问题, 如提取的产品纯度低、限制因素多、成本高等。本实验采取超声波辅助提取蓝花楹花色苷, 其具有操作简单、所使用的仪器少、成本低、提取时间短和提取的色素具有较好品质等优点。

色素中主要物质为花色苷, 但花色苷的颜色和稳定性容易受其结构、光、热、pH 值、金属离子等多因素的影响[3], 从而影响色素的稳定性。目前我国周宇等人研究表明, 蜀葵、桔梗等色素在酸性、光照、热处理和金属离子的作用下表现得比较稳定, 但在中性、碱性条件下不稳定等[4], 但我国对蓝花楹花色苷的提取及其稳定性的研究较少, 在将来可做一些此类相关的进一步研究实验, 以推动天然色素在各领域的开发与应用。

2. 材料和方法

2.1. 实验材料与试剂

原材料: 采用来自攀枝花市东区的蓝花楹, 清除杂质后将蓝花楹花朵放到阴凉通风处自然风干备用。

试剂: 柠檬酸、硫酸铁、硫酸亚铁、氯化镁、氯化钡、氯化钙、氯化钠(均为分析纯 AR)。

2.2. 主要仪器和设备

RS-FS1401 多功能研磨机, 合肥荣事达小家电有限公司; 722 可见光分光光度计, 上海菁华科技仪器有限公司; JP-030 洁盟牌超声波清洗器, 深圳市洁盟清洗设备有限公司; SHB-III 循环水式多用真空泵, 上海科恒实业发展有限公司。

2.3. 方法

2.3.1. 超声波辅助提取蓝花楹色素

准确称取 3 g 蓝花楹花粉, 再加入 180 mL 的 10% 柠檬酸溶液[5], 用超声波在 30℃ 条件下浸提 15 min 后, 用循环水式多用真空泵抽滤, 得到粗提液。确定蓝花楹花色色素粗提液的最大吸收波长的吸光值及绘制标准曲线。蓝花楹花色色素提取率的计算方法如式(1) [6]:

$$\text{提取率}(\%) = \frac{CV}{1000W} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C: 蓝花楹花色色素溶液浓度, g/mL; V: 蓝花楹花色色素提取液体积, mL; W: 蓝花楹花粉质量, g。

2.3.2. 单因素实验

将研磨后的蓝花楹花瓣粉末, 每组分别称取等量的十五份, 倒入干燥的锥形瓶内, 再加入 10% 柠檬酸溶液。分别研究料液比、超声时的温度、提取溶剂的体积分数、超声时间这四个因素对色素提取的影响。料液比分别为 1:10、1:20、1:30、1:40、1:50, 超声辅助提取时间分别为 10 min、15 min、20 min、25 min、30 min, 浸提溶剂柠檬酸溶液的浓度分别为 5%、10%、15%、20%、25%, 提取温度分别为 20℃、30℃、40℃、50℃、60℃。

2.3.3. 响应面实验

采用以上单因素实验的结果, 利用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 的设计原理, 设置三因素三水平, 以吸光度值作为响应值, 进行响应面设计实验的最佳提取工艺。实验设计如下表 1 所示。

Table 1. Response surface experiment design

表 1. 响应面实验设定

因素	水平		
	-1	0	1
A (柠檬酸体积分数/%)	5	10	15
B (超声温度/℃)	30	40	50
C (超声时间/min)	20	25	30

2.3.4. 验证性实验

从响应面实验所得到的最佳工艺条件中, 把结果合理化, 再通过三次重复的验证实验, 把得到的蓝花楹花色色素粗提液吸光度值取平均值, 再将其与响应面软件所得的最佳工艺条件下的值相对比, 以此来

判断响应面实验结果的真实性的。

2.3.5. 稳定性实验

取上述蓝花楹花色素粗提液若干份, 分别探究蓝花楹花色素对光照的稳定性、蓝花楹花色素的可溶性、加热对蓝花楹花色素稳定性的影响、pH 值对蓝花楹花色素稳定性的影响以及金属离子对蓝花楹花色素稳定性的影响, 测定其吸光度值并观察记录颜色的变化过程。

3. 结果与分析

3.1. 单因素结果分析

3.1.1. 超声时间对蓝花楹花色素提取的影响

实验结果如图 1 所示, 当超声时间为 10 min~25 min 时色素粗提液的吸光度值上升, 当超声时间为 25 min~30 min 时蓝花楹花色素粗提液的吸光度值逐渐下降。主要是由于超声波传递的能量能让蓝花楹花朵的细胞壁破碎, 使细胞内的有效成分流出, 加速与浸提溶剂融合使其更易被提取, 所以当超声时间超过 20 min 时蓝花楹花色素粗提液的吸光度值急速上升[7]。由折线图分析可得, 最佳的蓝花楹花色素提取时间为 25 min, 此时蓝花楹花色素粗提液的吸光度值为 0.791, 此条件下提取率为 13.656%。

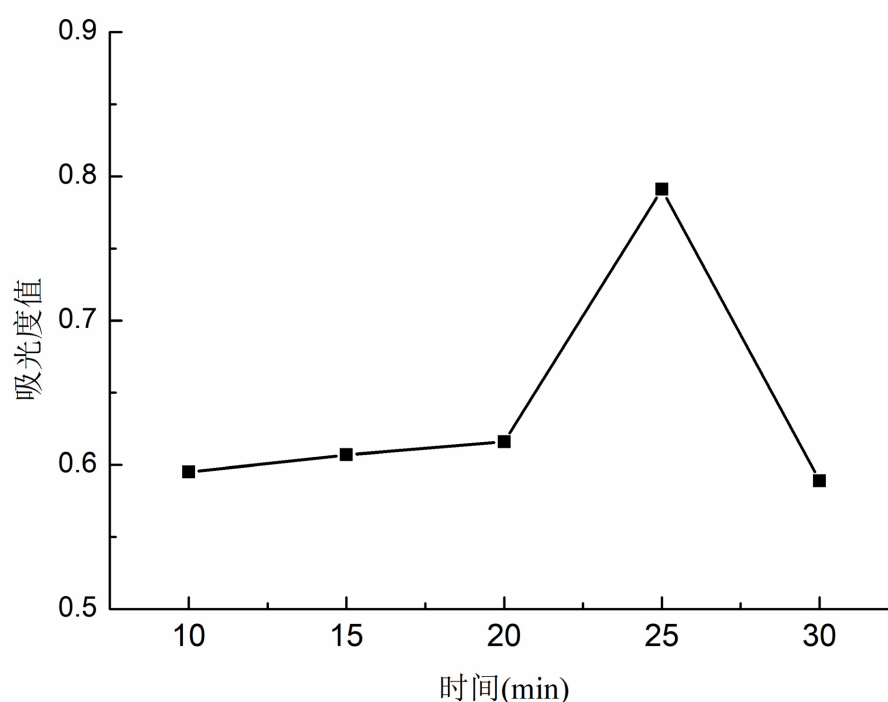


Figure 1. Effect of ultrasonic time on pigment extraction

图 1. 超声时间对色素提取的影响

3.1.2. 柠檬酸浓度对蓝花楹花色素提取的影响

如图 2 所示, 当柠檬酸溶液浓度低于 10%时随着柠檬酸浓度的增高, 蓝花楹花色素粗提液的吸光度值也增高, 柠檬酸溶液浓度高于 10%时, 蓝花楹花色素粗提液的吸光度值随柠檬酸溶液浓度的增高而降低。即柠檬酸溶液浓度为 10%时蓝花楹花色素粗提液的吸光度值达到峰值, 此时蓝花楹花色素粗提液的吸光度值为 0.715, 此条件下提取率为 12.322%。

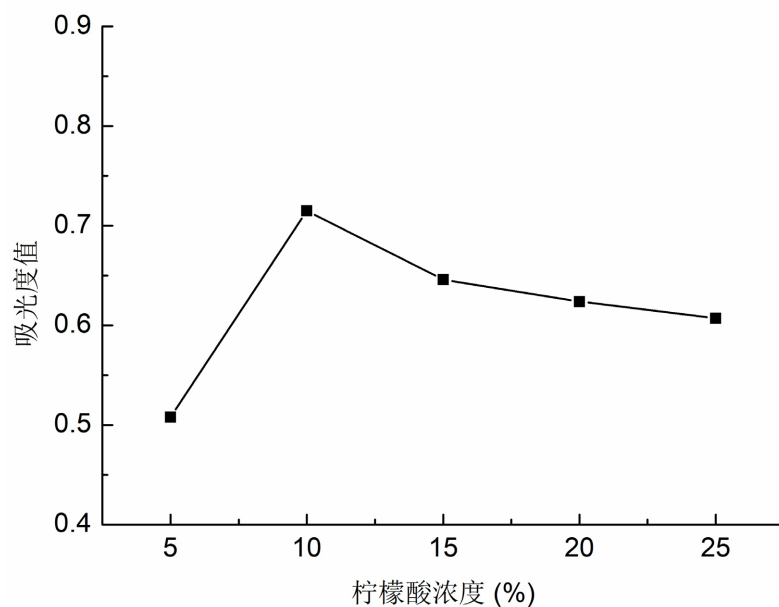


Figure 2. Effect of citric acid concentration on pigment extraction
图 2. 柠檬酸浓度对色素提取的影响

3.1.3. 料液比对蓝花楹花色素提取的影响

实验结果如图 3 所示, 料液比的增加使得蓝花楹花色素粗提液的吸光度值迅速增大, 当料液比为 1:40 (g/mL) 时, 蓝花楹花色素粗提液的吸光度值最大, 再随着料液比的增大, 蓝花楹花色素粗提液的吸光度值有下降趋势。出现这一现象的原因可能是, 随着料液比增加, 浓度降低, 提取液和蓝花楹花朵粉末的渗透液趋向平衡, 浸提液在蓝花楹花色素细胞内的扩散能力变强, 但是浓度在降低, 渗透压变大, 浸提液的扩散能力也就降低了[7]。因此, 后续实验的料液比选取 1:40 (g/mL)。

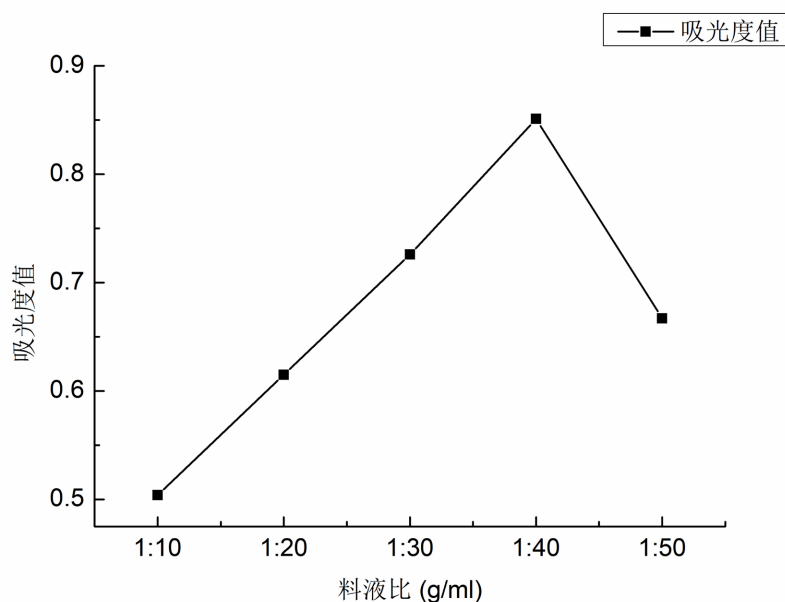


Figure 3. Effect of solid-liquid ratio on extraction yield of *Jacaranda mimosifolia* anthocyanins
图 3. 料液比对蓝花楹花色素提取的影响

3.1.4. 超声温度对蓝花楹花色素提取的影响

如图 4 所示, 温度在 20℃~40℃ 之间时, 随着温度的增高蓝花楹花色素粗提液的吸光度值迅速增大, 温度 40℃ 时吸光度值最大, 当温度在 40℃~60℃ 范围内时, 随着温度增长, 蓝花楹花色素粗提液的吸光度值缓慢下降。导致这个变化现象出现的原因, 可能是因为增大超声时的温度会加快浸提溶剂与植物细胞中析出的有效成分的溶解, 而后期温度再升高时却导致了色素分子降解, 使得蓝花楹花色素粗提液的吸光度值降低[7]。因此, 后续实验采取 40℃ 的超声波提取温度。

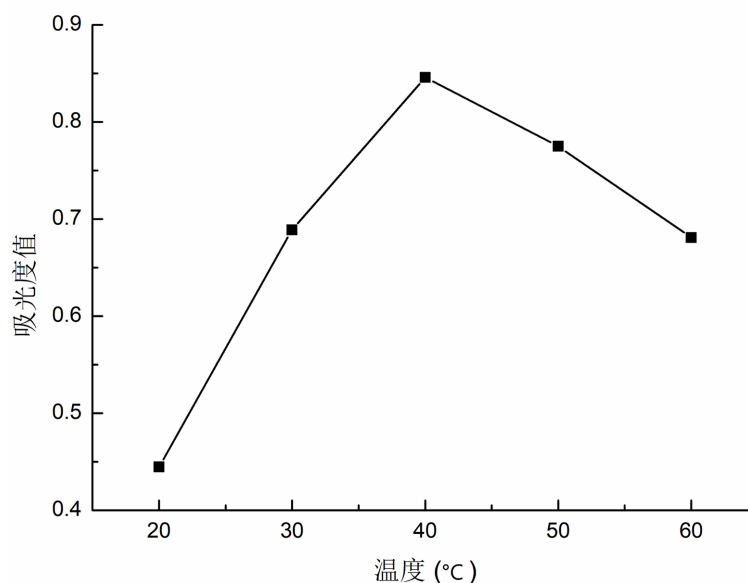


Figure 4. Effect of ultrasonic temperature on extraction yield of *Jacaranda mimosifolia* anthocyanins
图 4. 超声温度对蓝花楹花色素提取的影响

3.2. 响应面实验结果与分析

3.2.1. 响应面实验结果

在单因素实验基础上进行响应面实验, 对蓝花楹花色素提取工艺参数进行优化, 设三个自变量因素, 柠檬酸体积分数用字母 A 表示, 超声波温度用字母 B 表示, 超声波时间用字母 C 表示, 蓝花楹花色素粗提液的吸光度值为响应值用字母 Y 表示, 响应面实验方案设计及结果见表 2。

Table 2. The response surface experimental results

表 2. 响应面试验结果

试验号	A	B	C	吸光度值(Y)
1	-1	-1	0	0.599
2	-1	0	-1	0.733
3	-1	0	1	0.803
4	-1	1	0	0.769
5	0	-1	1	0.668
6	0	-1	-1	0.659
7	0	0	0	0.896

续表

8	0	0	0	0.874
9	0	0	0	0.891
10	0	0	0	0.841
11	0	0	0	0.850
12	0	1	1	0.831
13	0	1	-1	0.806
14	1	-1	0	0.635
15	1	0	-1	0.789
16	1	0	1	0.626
17	1	1	0	0.715

3.2.2. 模型的建立及方差分析

回归分析结果如表 3 所示。

Table 3. Results of regression analysis

表 3. 回归分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Pr > F	显著性
模型	0.15	9	0.016	18.64	0.0004	**
A	2.415E-003	1	2.415E-003	2.74	0.1417	
B	0.039	1	0.039	44.51	0.0003	**
C	4.351E-004	1	4.351E-004	0.49	0.5048	
AB	2.025E-003	1	2.025E-003	2.30	0.1732	
AC	0.014	1	0.014	15.41	0.0057	**
BC	6.400E-005	1	6.400E-005	0.073	0.7953	
A2	0.040	1	0.040	45.05	0.0003	**
B2	0.037	1	0.037	42.08	0.0003	**
C2	5.329E-003	1	5.329E-003	6.05	0.0435	*
模型	6.165E-003	7	8.808E-004			
失拟项	3.792E-003	3	1.264E-003	2.13	0.2391	
纯误差	2.373E-003	4	5.933E-004			
总和	0.15	16		R ² = 0.9599	R ² Adj = 0.9084	

注: **则存在差异极显著(P < 0.01); *则存在差异显著(P < 0.05); 不显著(P > 0.05)。

对蓝花楹花色色素粗提液的吸光度值和各影响因素进行回归拟合, 获得吸光度值与影响提取率的各个因素之间的二次回归拟合方程, 如式(1)所示:

$$Y = 0.87 - 0.017A + 0.070B - 7.375E - 0.03C - 0.023AB - 0.058AC + 4.000E - 0.03BC - 0.097A^2 - 0.094B^2 - 0.036C^2 \quad (1)$$

式中各字母代表的含义为: Y 蓝花楹花色色素粗提液的吸光度值; A 柠檬酸浓度(%); B 超声提取温度(°C);

C 超声提取时间(min)。

根据表 2 的实验结果,以蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值(Y)作为响应值,对超声波辅助提取蓝花楹花色苷的工艺模型进行回归分析。分析结果如下表 3,模型的 $P < 0.01$,失拟项 $P > 0.05$,所以回归模型具有极显著性。模型的 $R^2 = 0.9599$, $R^2 \text{ adj} = 0.9084$,其中模型的校正复相关指数 $R^2 \text{ adj} = 0.9084$,说明该模型可以解释 90.84%响应值的变化[8],所以蓝花楹花色苷提取工艺的模型与实验数据拟合度较高,实验误差小,符合统计学要求,那么响应面实验就能够用于蓝花楹花色苷提取工艺的优化。模型中二次项 C^2 为差异显著影响因素($P < 0.05$);一次项 B,交互项 AC、BC,二次项 A^2 、 B^2 为差异极显著影响因素($P < 0.01$),表明蓝花楹花色苷粗提液吸光度值与各提取条件之间是非线性关系,说明蓝花楹花色苷提取的吸光度值受各种因素综合影响,并不只受单一因素的影响。根据表 3 中 F 值,分析比较可得影响蓝花楹花色苷粗提液吸光度值的因素大小顺序依次为 $B > A > C$,即超声提取温度 > 柠檬酸浓度 > 超声提取时间。

3.2.3. 响应面的三维立体图与等高线图结果和分析

响应面三维立体图与等高线图是由构建的回归模型制成,能够直观地看出蓝花楹花色苷的各提取条件交互作用对蓝花楹花色苷粗提液吸光度值的影响。等高线及三维立体图见图 5~7,通过图 5~7 可以直观地展示 A: 柠檬酸浓度(%)、B: 超声辅助提取温度($^{\circ}\text{C}$)、C: 超声辅助提取时间(min),这三个因子之间的相互影响关系,由几个图的最高点和等高线的中心点能够得到所选范围内的最大值。

(1) 从下图 5 可以看出,三维空间曲面的坡度较陡,说明蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值受到柠檬酸浓度和超声辅助提取温度的影响较大;等高线图,从疏密程度来看比较密集,形状为椭圆形,说明柠檬酸溶液浓度与超声辅助提取温度两个因子交互作用强。随着柠檬酸溶液浓度和超声辅助提取温度的增大,吸光度值先缓慢增长至最高点又开始减小;这两个因子对蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值的影响十分显著,并且超声辅助提取温度对蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值的影响大于柠檬酸溶液浓度对蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值的影响。结论与上表 3 中由 F 值分析得出的结论相同。

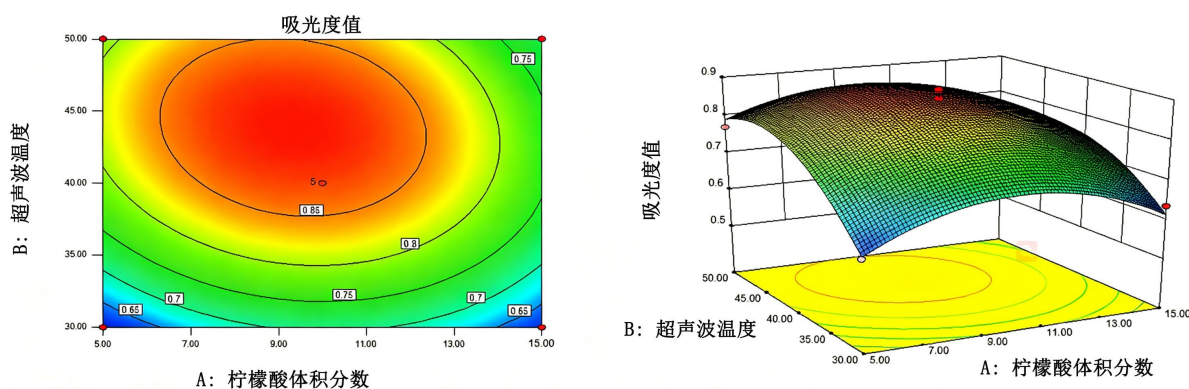


Figure 5. Response surface and contour of $Y = f(A, B)$

图 5. $Y = f(A, B)$ 的响应面及等高线

(2) 如图 6 所示,三维曲面的弯曲程度大,等高线分布紧密而且形状为椭圆形,说明这两个因素对吸光度值的影响显著,两者的交互作用明显,所以柠檬酸溶液浓度与超声辅助提取时间对蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值的影响较大[9]。随着柠檬酸溶液浓度和超声辅助提取时间的增大,蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值起初慢慢增大,但增大到最大值后,在影响因素的作用下减小。根据等高线分布的疏密程度可得出柠檬酸溶液体积分数对蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值的影响大于超声辅助提取时间。结论与上表 3 中由 F 值分析得出的结论相同。

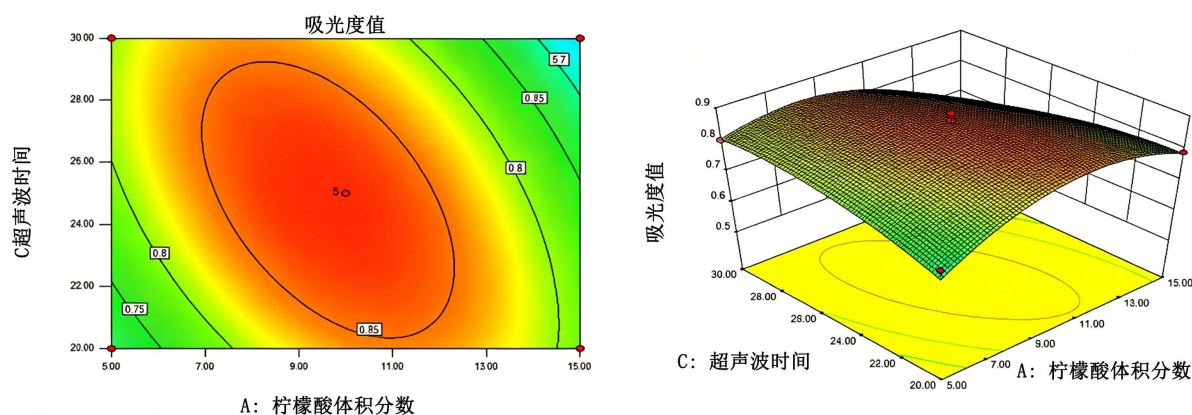


Figure 6. Response surface and contour of $Y = f(A, C)$

图 6. $Y = f(A, C)$ 的响应面及等高线

(3) 从图 7 分析看出, 响应面的坡度陡峭, 等高线基本呈现椭圆形, 表明超声辅助提取温度与超声辅助提取时间对蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值的相互作用明显。随着超声辅助提取温度与超声辅助提取时间的增大, 蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值有明显的增加, 至最高点后蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值逐渐降低。根据等高线图能够得出超声波辅助提取温度对蓝花楹花色苷粗提液的吸光度值的影响略高于超声波提取时间。结论与上表 3 中由 F 值分析得出的结论相同。

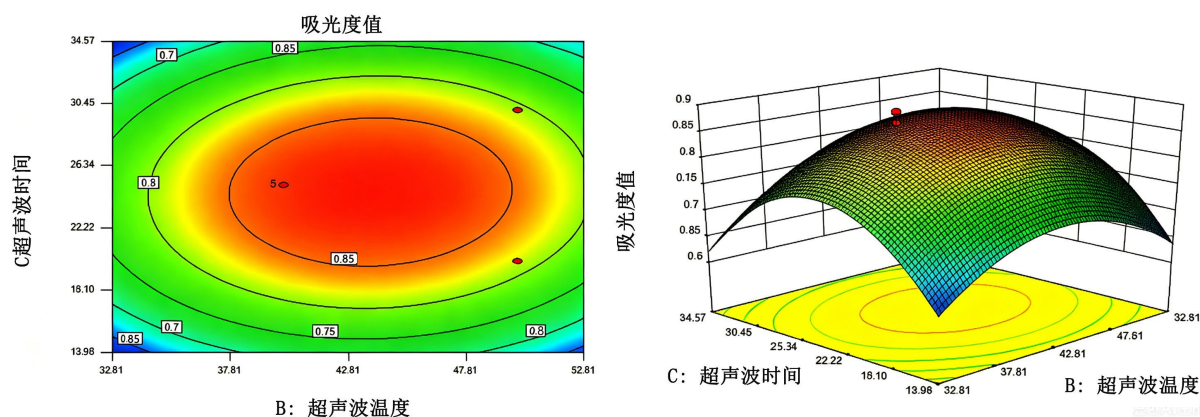


Figure 7. Response surface and contour of $Y = f(B, C)$

图 7. $Y = f(B, C)$ 的响应面及等高线

根据以上分析可知, 柠檬酸溶液浓度(A)、超声波辅助提取温度(B)、超声波辅助提取时间(C)三个因素对蓝花楹花色苷的交互作用的影响排列顺序为: 超声提取温度(B) > 柠檬酸溶液浓度(A) > 超声辅助提取时间(C)。这与上表回归分析结果相一致。

3.2.4. 响应面优化蓝花楹花色苷提取工艺及验证分析

利用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 的设计原理模拟模型得到超声波辅助提取蓝花楹花色苷最优工艺条件为: 超声波超声浸提的时间为 25.31 min、超声浸提温度为 40.09℃、柠檬酸溶液浓度为 10.86%。在这个条件下, 蓝花楹花色苷粗提液吸光度值达到最高值: 0.868, 其提取率为 15.008%, 达到最大。按照操作的可行性, 最终确定超声波辅助提取蓝花楹花色苷最佳工艺条件为: 超声波超声浸提的时间为 25 min、超声波浸提的温度为 40℃、柠檬酸溶液浓度为 10%。并进行 3 次平行试验, 进行验证,

实验结果如下表 4。结果表明, 蓝花楹花色素粗提液的吸光度值为 0.847。由此证明, 利用响应面 Design-expert 软件模拟得出的最优工艺条件的工艺参数真实可行, 模型拟合成功且拥有良好的参考价值。

Table 4. Results of confirmatory experiment

表 4. 验证性实验结果

组别	第一组	第二组	第三组	预测值	与预测值的相对误差
色素粗提液吸光度值	0.819	0.859	0.862	0.868	2.47%

3.3. 稳定性研究

3.3.1. 蓝花楹花色素对光照的稳定性的影响

由图 8 可知, 在光照条件下蓝花楹粗提液的吸光度值下降, 可能是因为光照使蓝花楹花色素分子的结构发生了改变或者色素被降解[10]。所以, 在加工与保存中注意避光。

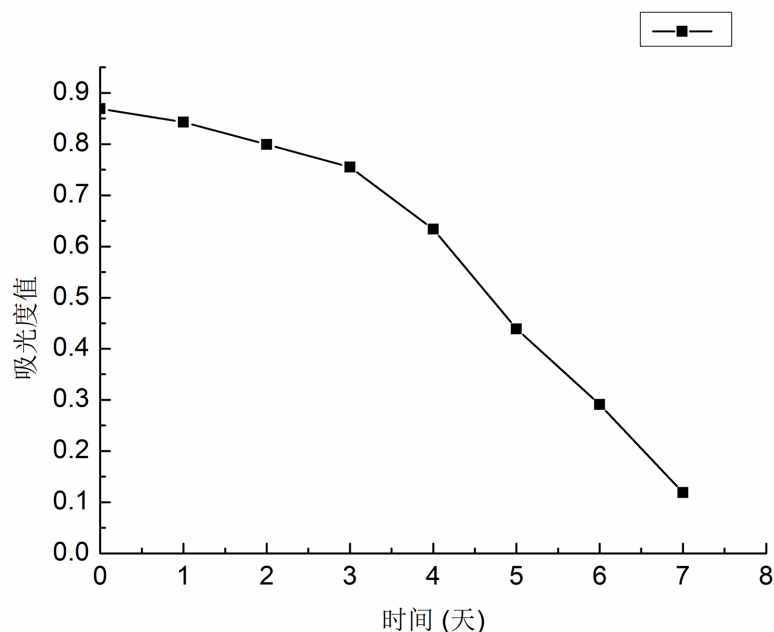


Figure 8. Stability of *Jacaranda* anthocyanins under light exposure

图 8. 蓝花楹花色素对光照的稳定性的影响

3.3.2. 蓝花楹花色素的溶解性

由表 5 可知, 蓝花楹花色素的粗提液易溶于极性溶液, 不溶于非极性溶液和油。与环己烷互溶时, 浸提液在下环己烷在上, 说明浸提液密度小于环己烷。与橄榄油互溶时, 浸提液在下橄榄油在上, 也说明浸提液的密度比橄榄油密度小。

Table 5. Solubility of *Jacaranda mimosifolia* anthocyanins

表 5. 蓝花楹花色素的溶解性

溶剂	蒸馏水	1 mol/L 稀盐酸	70%乙醇	丙酮	环己烷	橄榄油
溶解性	易溶	易溶	易溶	易溶	不溶	不溶
现象	粉红色	玫红色	橙黄色	橘黄且伴有气泡产生	明显分层	明显分层

3.3.3. 加热对蓝花楹花色色素稳定性的影响

如图 9 所示, 蓝花楹花色色素保存温度应低于 60℃。在 80℃ 以上时, 溶液吸光度值出现明显下降。导致这一现象, 可能是因为花色苷在高温下发生了水解, 产生无色或淡色的查尔酮、假碱和本丙酮酸类等化合物; 以及蓝花楹花朵中的类黄酮物质在高温下变得不稳定, 进一步发生了裂解生成琥珀酸等非色素小分子, 导致色素分子数量减少。因此, 在未来对蓝花楹花色色素进行进一步加工时, 要避免高温环境。

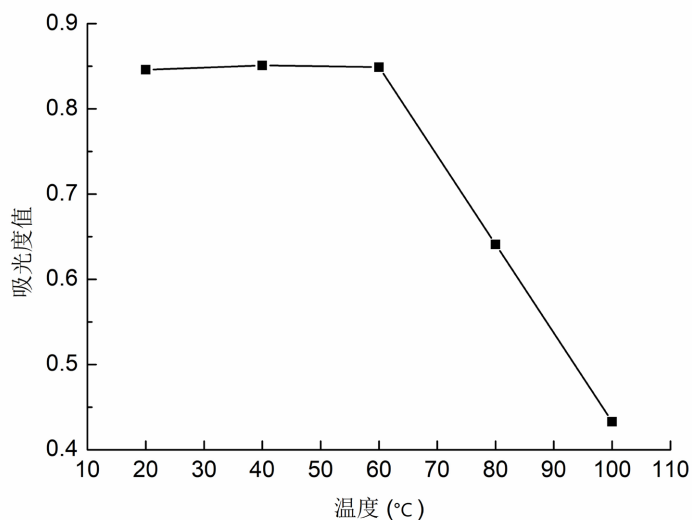


Figure 9. Effect of temperature on the stability of *Jacaranda mimosifolia* Anthocyanins

图 9. 温度对蓝花楹花色色素稳定性的影响

3.3.4. 酸碱度对蓝花楹花色色素稳定性的影响

结合下表 6 和表 7 可知, 蓝花楹花色色素在 $\text{pH} < 6$ 时, 吸光度值变化较小, 颜色均为红色; 当 $\text{pH} \geq 6$ 时, 颜色变化明显。可能是因为酸性环境下, 花色苷主要以红色的黄样阳离子存在, 结构相对稳定, 以及黄酮醇等类黄酮物质可与花青素形成氢键, 从而形成稳定的复合物, 故颜色和吸光度值变化小; 而当 $\text{pH} \geq 6$ 时, 黄样阳离子转化为醌式碱、查尔酮或甲酸酯等, 结构不稳定, 颜色和吸光度值变化明显[11]。因此, 蓝花楹花色色素在酸性条件下稳定性好, 而在碱性条件下不稳定。

Table 6. Effect of pH on the stability of *Jacaranda mimosifolia* anthocyanins

表 6. 酸碱对蓝花楹花色色素稳定性的影响

溶剂	蒸馏水	1 mol/L 稀盐酸	1 mol/L 氢氧化钠
现象	粉红	胭脂红	橙黄

Table 7. Effect of pH on the stability of *Jacaranda mimosifolia* anthocyanins

表 7. pH 值对蓝花楹花色色素稳定性的影响

pH	2	4	6	8	12
颜色	胭脂红	淡粉红	黄	黄绿	黄褐色
吸光度值	0.618	0.574	0.570	0.666	0.628

3.3.5. 金属离子对蓝花楹花色色素稳定性的影响

由下表 8 可知, 与空白对照组相比, 添加 Fe^{3+} 使蓝花楹花色色素粗提液的吸光度值上升; 添加 Fe^{2+} 、

Ba²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺这几种离子使得蓝花楹粗提液的吸光度值下降；添加 Ca²⁺离子，使得蓝花楹粗提液的吸光度值显著下降。Fe³⁺对蓝花楹花色苷粗提液产生了增色作用[5]，使溶液颜色变黑，可能是因为色素中的类黄酮与 Fe³⁺形成了配位键，以及醌类与 Fe³⁺形成络合物，吸光能力增强，导致颜色的变化、吸光度值上升[12][13]，也可能是由于 Fe³⁺是强氧化剂，催化色素中的花色苷氧化产生褐变产物，导致颜色的变化、吸光度值上升。Ca²⁺对蓝花楹花色苷存在很明显的褪色作用，是由于 Ca²⁺可与色素中的脂肪酸形成沉淀，并促进不同酚类化合物之间形成聚集体，从而影响透光率，导致吸光度值显著变低；也可能是 Ca²⁺的存在降低了类黄酮和酚类物质的溶解性，导致浑浊或沉淀，从而导致吸光度值显著变低。所以，在保存或者加工应用蓝花楹花色苷的过程中都要避免使用硬水和金属容器[14]。

Table 8. Effect of Metal Ions on the Stability of *Jacaranda mimosifolia* anthocyanins

表 8. 金属离子对蓝花楹花色苷稳定性的影响

离子	空白	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Ba ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺
颜色变化	酒红色	黄褐色	红棕色	胭脂红	粉红	粉红	粉红	胭脂红
吸光度值	1.146	1.370	0.743	0.380	0.697	0.800	0.648	0.766

4. 结论

在此次实验中，采取超声波辅助提取蓝花楹花色苷，以料液比、柠檬酸溶液浓度、超声提取时间、超声温度为实验的各个因子设计单因素实验，经过分析得出单因素各个因素的最佳条件为：料液比 1:40、超声提取温度 40℃、超声时间 25 min、柠檬酸溶液浓度 10%。通过响应面法进一步优化超声波辅助提取蓝花楹花色苷工艺的实际最优条件为：柠檬酸溶液浓度为 10%、超声提取时间为 25 min、超声提取温度为 40℃，提取率为 15.008%。最后进行色素的稳定性研究，得出蓝花楹花色苷需要避光保存；其易溶于极性溶液，不溶于非极性溶液和油；同时也要避免 80℃及以上高温环境；蓝花楹花色苷在酸性条件下稳定性好，而在碱性条件下不稳定；在保存或者加工应用蓝花楹花色苷的过程中都要避免使用硬水和金属容器。

参考文献

- [1] 李小梅, 刘学锋, 黄敏, 等. 蓝花楹生长与土壤养分的相关性研究[J]. 桉树科技, 2021, 38(2): 53-57.
- [2] Aguirre-Becerra, H., Pineda-Nieto, S.A., García-Trejo, J.F., Guevara-González, R.G., Feregrino-Pérez, A.A., Álvarez-Mayorga, B.L., et al. (2020) *Jacaranda* Flower (*Jacaranda mimosifolia*) as an Alternative for Antioxidant and Antimicrobial Use. *Heliyon*, 6, e05802. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05802>
- [3] 陈思佳. 板栗壳色素的提取工艺优化及稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京农学院, 2019.
- [4] 杨运英, 王廷芹, 周子涵. 紫色康乃馨色素提取及其稳定性[J]. 北方园艺, 2021(2): 80-84.
- [5] 陈元超. 玫瑰花红色素提取及稳定性研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(10): 73-141.
- [6] 吴琳珊. 锥栗壳色素的提取、纯化及抗氧化活性研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [7] 曾哲灵, 郝纯青, 吕伟, 等. 响应面法优化玫瑰茄红色素提取工艺[J]. 食品科学, 2010, 31(20): 47-51.
- [8] 高洪霞, 刘军海, 于波涛. 响应面分析法优化辣椒红色素提取工艺条件[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(10): 177-181.
- [9] 谢兰心. 响应面法优化黑布林皮色素提取工艺[J]. 农产品加工, 2021, 19(3): 56-58.
- [10] 李云婷, 陈炼红, 王琳琳, 等. 响应面法优化紫兰草紫色素提取工艺及其稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(5): 87-94.
- [11] 姚蓓, 赵慧芳, 吴文龙, 等. 不同品种蓝莓花色苷色素稳定性的比较[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 142-147.
- [12] 梁琼芳, 唐小闲, 汤泉, 等. 微波辅助提取红巧梅色素及其稳定性[J]. 食品工业, 2021, 42(3): 176-180.

- [13] Marpaung, A.M. and Pustikarini, D. (2023) Spectrophotometric Change of Butterfly Pea (*Clitoria ternatea* L.) Flower Extract in Various Metal Ion Solutions during Storage. *Science and Technology Indonesia*, **8**, 367-372. <https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.3.367-372>
- [14] 朱良玉, 周丽萍, 王化, 等. 笃斯越橘酰化花青素稳定性分析[J]. 中国酿造, 2017, 36(5): 136-140.