

姜黄色素的提取工艺优化及其稳定性研究

宋彬莹*, 钟彬滢*, 唐智鑫#, 周秋萍, 包涵华, 杜泳

浙江农林大学暨阳学院, 浙江 诸暨

收稿日期: 2025年4月20日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

姜黄色素作为天然食用色素之一, 其安全性和健康属性已被广泛证实。本研究针对姜黄色素传统提取工艺效率低、稳定性研究不足的问题, 通过单因素实验与正交试验优化有机溶剂提取工艺。结果表明, 姜黄色素的^{最佳提取工艺参数为浸提温度60℃、浸提时间1 h、料液比1:60 (g/mL)及乙醇浓度75%。对比分析发现, 超声辅助有机溶剂提取法的提取效果显著优于酶提取法, 其中超声辅助法提取的色素溶液吸光度达0.259, 而复合酶法提取的色素溶液吸光度仅0.235 (提升10.2%)。此外, 本研究对提取的姜黄色素稳定性进行了探究。结果表明, 姜黄色素在30℃、中性或弱酸性及无强氧化/还原剂的环境下稳定性最佳。综上, 该研究为姜黄色素高效提取及食品加工应用提供了理论依据, 对天然色素产业化具有参考价值。}

关键词

姜黄色素, 提取, 工艺比较, 稳定性

Optimization of the Extraction Process and Study on Its Stability of Curcumin

Binying Song*, Binyan Zhong*, Zhixin Tang#, Qiuping Zhou, Hanhua Bao, Yong Du

Jiyang College of Zhejiang A&F University, Zhuji Zhejiang

Received: Apr. 20th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

Curcumin, as one of the natural food colorants, has been widely confirmed for its safety and health

*共同第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 宋彬莹, 钟彬滢, 唐智鑫, 周秋萍, 包涵华, 杜泳. 姜黄色素的提取工艺优化及其稳定性研究[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(3): 470-483. DOI: 10.12677/hjfn.2025.143053

attributes. This study aimed to address the issues of low efficiency and insufficient stability research in the traditional extraction process of curcumin. Through single-factor experiments and orthogonal experiments, the organic solvent extraction process was optimized. The results showed that the optimal extraction parameters of curcumin were an extraction temperature of 60°C, an extraction time of 1 h, a solid-liquid ratio of 1:60 (g/mL), and an ethanol concentration of 75%. Comparative analysis revealed that the extraction effect of the ultrasonic-assisted organic solvent extraction method was significantly superior to that of the enzymatic extraction method. The absorbance of the pigment solution extracted by the ultrasonic-assisted method reached 0.259, while that of the pigment solution extracted by the composite enzyme method was only 0.235 (an increase of 10.2%). In addition, the stability of the extracted curcumin was investigated in this study. The results showed that curcumin had the best stability at 30°C, in neutral or weakly acidic environments, and without strong oxidants/reductants. In conclusion, this study provides a theoretical basis for the efficient extraction and food processing application of curcumin and has reference value for the industrialization of natural colorants.

Keywords

Curcumin, Extraction, Process Comparison, Stability

Copyright © 2025 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

来源于植物、动物、矿物及微生物的天然色素因其具有优良的安全性和健康属性, 逐渐替代人工合成色素(含重金属及致癌等风险[1]-[3]), 但其产业化应用仍受限于提取残留(如溶剂、重金属残留等[4])。姜黄色素是从姜科植物根茎中所分离出来的一种天然多酚化合物, 被认为是一种具有广阔开发价值与应用前景的可食用性天然色素, 凭借抗炎、抗氧化[5]、抗纤维素[6]、肝保护和心脏[7]保护等药理活性及其安全性, 广泛应用于食品、纺织、医药领域。

目前姜黄色素的相关研究聚焦于其生物活性、提取工艺优化、应用领域拓展及单体分离纯化等[8]。作为含双羰基的疏水性多酚, 姜黄色素因水溶性低、稳定性差、代谢快等特点, 导致其生物利用度降低, 削弱了其潜在健康效益[9]-[11]。这些理化缺陷成为其产业化应用的主要瓶颈, 推动全球学者开发高效环保的提取技术(如超声辅助、超临界萃取)以优化工艺稳定性与提取效率。如 Yadav [12]等人系统评价了加速溶剂萃取法从姜黄中提取姜黄素类化合物的工艺效能, 并对比乙醇、乙酸乙酯、丙酮三种溶剂的提取特性。结果显示: 使用乙醇提取姜黄色素得率达到最高(8.4%), 但丙酮提取姜黄色素纯度最优(46.2%)。Shirsath [13]等人采用超声波辅助提取法(UAE)提取姜黄色素, 并与传统提取方法进行对比。在 35°C、料液比 1:25、超声功率 250 W 和频率 22 kHz 的优化条件下, 提取 1 h 即获得 72%的色素提取率, 该效率显著优于常规提取(8 h 色素提取率仅 62%)。

传统有机溶剂提取法(丙酮/乙醇体系)虽操作简便[4], 但存在提取效率低、溶剂残留以及环境风险等问题[14]-[16]。相比之下, 超声辅助法通过空化效应提升提取效率[17], 而酶解技术以绿色特性实现选择性释放, 是推动姜黄色素提取工艺高效环保的新方向。基于此现况, 本研究通过定量分析结合单因素-正交实验优化浸提参数(时间、浓度、温度、料液比), 系统评估多因素交互影响, 提升工艺可靠性。同时, 对比超声辅助与酶法提取效率差异, 并验证温度、pH 值、有机酸、氧化剂和还原剂对色素稳定性的影响

规律, 为建立姜黄色素高效提取方案及加工储存条件选择提供实验依据。

2. 材料与方法

2.1. 材料与仪器

小黄姜粉(安徽本草怡堂健康科技有限公司)由小规格生姜品种制成, 色泽金黄明亮, 粉质细腻均匀。

无水乙醇、石油醚、冰乙酸(天津致远化学试剂有限公司), 乙酸乙酯(天津市展望化工试剂有限公司), 丙酮(上海高晶精细化工有限公司), 盐酸(浙江中星化工试剂有限公司), 7.5%过氧化氢(惠州市湘盛工贸有限公司), 无水亚硫酸钠(国药集团化学试剂有限公司), 柠檬酸、 α -淀粉酶、果胶酶(天津市众联化学试剂有限公司), 维生素 C 片(陕西颐生堂药业有限公司), 酒石酸(天津市登峰化学试剂厂), 石油醚(西陇科学有限公司), 无水乙酸钠(温州市吉象化学股份有限公司)等化学试剂均为分析级。

KC-6021 真空干燥箱(吴江科诚烘箱制造有限公司), JJ224BC 电子分析天平(常熟市双杰测试仪器厂), TD5G 台式低速离心机(湖南湘仪试验室仪器开发有限公司), WFZ UV-2000 紫外可见分光光度计(尤尼柯(上海)仪器有限公司), PHS-3C pH 计(上海晶磁仪器有限公司), HH-4A 数显恒温水浴锅(赛得利斯实验分析仪器制造厂), YM-100PLUS 超声波提取仪(深圳市方奥微电子有限公司), 720050DL 移液枪(北京开源国创科技有限公司), QC 1109 石英比色皿(无锡书弗仪器有限公司)。

2.2. 试验方法

2.2.1. 小黄姜粉脱脂处理

采用三级梯度脱脂工艺处理姜黄原料: 首次按料液比 1:2 加入石油醚, 经 30 min 恒速搅拌萃取后滤除溶剂; 重复上述操作两次后, 将固相组分避光摊晾至恒重, 获得脱脂姜黄粉。将脱脂姜粉储存至带盖棕色广口瓶或密封袋中, 于遮光处密封保存, 备用。

2.2.2. 姜黄色素最大波长的确定

准确称取 4 份经过相同预处理的脱脂姜粉 0.2 g 于具塞试管中, 在 50℃ 水浴、浸提 3 h、料液比为 1:100 (g/mL) 的条件下, 加入 95% 乙醇、丙酮、乙酸乙酯。浸提结束后, 过滤, 离心(5000 r/min, 离心 10 min), 在室温下用紫外分光光度计测定 360~500 nm 范围内的吸光度, 以波长为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制曲线并确定不同溶剂提取时的最大吸收峰。

2.2.3. 最佳浸提溶剂的选择

比较不同浸提液的吸光度曲线, 以此确定合适的浸提溶剂。

2.2.4. 单因素试验设计

(1) 浸提溶剂最佳浓度的选择

准确称取 0.2 g 经过相同预处理的脱脂姜粉 4 份, 分别加入浓度为 25%、50%、75%、95% 的乙醇, 在料液比为 1:100 (g/mL)、浸提时间 3 h、浸提温度 50℃ 的条件下, 浸提结束后过滤, 离心(5000 r/min, 离心 10 min), 取上层清液稀释五倍, 利用比色法测定最佳吸收波长下不同浓度提取液的吸光度。每组实验测定重复 3 次, 算出平均值。

(2) 最佳料液比的选择

准确称取 0.2 g 经过相同预处理的脱脂姜粉 4 份, 采用最佳提取浓度的乙醇、浸提时间 3 h、浸提温度 50℃ 的条件下, 分别按照料液比为 1:60、1:80、1:100、1:120 的条件进行色素浸提反应, 浸提结束后过滤, 离心(5000 r/min, 离心 10 min), 取上层清液稀释五倍, 利用比色法测定最佳吸收波长下不同浓度提取液的吸光度。每组实验测定重复 3 次, 算出平均值。

(3) 最佳浸提时间的选择

准确称取 0.2 g 经过相同预处理的脱脂姜粉 4 份, 采用最佳提取浓度的乙醇, 按最佳配料比在浸提温度 50℃ 的条件下, 分别浸提 30 min、60 min、90 min、120 min, 浸提结束后过滤, 离心(5000 r/min, 离心 10 min), 取上层清液稀释五倍, 利用比色法测定最佳吸收波长下不同浓度提取液的吸光度。每组实验测定重复 3 次, 算出平均值。

(4) 最佳浸提温度的选择

准确称取 0.2 g 经过相同预处理的脱脂姜粉 4 份, 采用最佳提取浓度的乙醇, 按最佳配料比和最佳浸提时间, 分别在 40℃、50℃、60℃、70℃ 的条件下进行浸提反应, 浸提结束后过滤, 离心(5000 r/min, 离心 10 min), 取上层清液稀释五倍, 利用比色法测定最佳吸收波长下不同浓度提取液的吸光度。每组实验测定重复 3 次, 算出平均值。

2.2.5. 正交试验设计

通过单因素试验确定基础参数, 继而运用 $L_9(3^4)$ 正交矩阵解析多因素交互效应, 实现工艺参数全局优化。各实验因素及其水平设置详见表 1。

Table 1. Factor-level table of $L_9(3^4)$ orthogonal experiment
表 1. $L_9(3^4)$ 正交试验因素水平表

水平	因素			
	A: 乙醇浓度(%)	B: 料液比(g/mL)	C: 提取时间(min)	D: 提取温度(℃)
1	50	1:60	30	50
2	75	1:80	60	60
3	95	1:100	90	70

2.2.6. 验证试验

准确称取 2 份经过相同预处理的脱脂姜粉 0.2 g 于具塞试管中, 分别按照正交优化法确定的最优参数组合与正交试验中最高吸光度下的参数组合进行水浴浸提, 浸提结束后过滤, 离心(5000 r/min, 离心 10 min), 用去离子水稀释五倍后测定最佳吸收波长下的吸光度。每组实验测定重复 3 次, 算出平均值。通过对比两组的提取液的吸光度以得出最佳提取条件。

2.2.7. 超声辅助有机溶剂浸提法

准确称取 1 份经过相同预处理的脱脂姜粉 0.2 g 于具塞试管中, 在经过最佳有机溶剂浸提工艺下, 将浸提液进行超声辅助提取 20 min, 浸提结束后过滤, 离心(5000 r/min, 离心 10 min), 取上层清液稀释五倍, 测定最佳吸收波长下的吸光度。

2.2.8. 姜黄素酶提取法

准确称取 3 份经过相同预处理的脱脂姜粉 0.2 g 于烧杯中, 分别加入 0.04 g 的 α -淀粉酶、0.04 g 的果胶酶和各 0.02 g 的 α -淀粉酶和果胶酶的复合酶, 按料液比 1:60 注入 pH = 4.6 的缓冲溶液, 经振荡混匀后转入 50℃ 恒温水浴锅中生物酶解 70 min。酶解反应结束后按相同料液比 1:60 (姜黄粉/g:无水乙醇/mL) 加入无水乙醇, 经离心分离(5000 r/min, 离心 10 min)取上层清液稀释五倍, 利用紫外分光光度计进行吸光度检测。

2.2.9. 超声辅助有机溶剂浸提法和酶提取法的比较

通过超声辅助有机溶剂浸提法和酶提取法下的最优工艺下浸提液所测得的吸光度, 对两种提取工艺

进行比较。

2.2.10. 姜黄色素稳定性研究

(1) 热稳定性的研究

采用优化工艺参数制备的色素浸提液, 精确量取 10 mL 样本, 以 75%乙醇为溶剂定容至 60 mL 容量瓶。将定容溶液均分为四等份实验组, 分别转移至预设温度为 30℃、40℃、50℃、60℃的恒温水浴装置中, 加热处理 2 h, 每隔 0.5 h 将待测液稀释五倍, 测定其在最佳波长处的吸光度, 每组实验测定重复 3 次, 算出平均值。

(2) pH 对色素稳定的研究

准确吸取按照最佳工艺浸提的色素提取液 200 mL 于锥形瓶中摇匀并稀释至刻度避光放置作为储备液备用。用 HCl 和 NaOH 将试验溶液调至不同 pH 值观察溶液的颜色, 并测定在最佳波长下的吸光度值。

(3) 有机酸对色素稳定性的研究

基于优化制备工艺获得的色素浸提液, 准确移取四份 10 mL 等量样本, 分别注入 10 mL 柠檬酸、抗坏血酸、酒石酸、醋酸, 采用 75%乙醇溶液在 50 mL 容量瓶中定容。同步设置空白对照组(CK): 取同体积浸提液添加 10 mL 基础提取剂, 同法完成定容。所有样本体系避光静置室内 4 h 后, 采用分光光度法测定最佳波长下的吸光度值。

(4) 氧化剂和还原剂浓度对色素稳定性的研究

以 7.5% H_2O_2 为氧化剂, 准确吸取按最佳工艺条件浸取的 10 mL 色素提取液 3 份, 各加入 5 mL、10 mL、15 mL 7.5% H_2O_2 ; 以 Na_2SO_3 为还原剂, 准确吸取按最佳工艺条件浸取的 10 mL 色素提取液 3 份, 各加入 0.1 g、0.2 g、0.3 g Na_2SO_3 。采用紫外分光光度计在最佳波长处对待测液进行吸光度测量。

2.3. 数据处理

所有试验重复三次, 结果表示为三次试验结果的平均值, 使用 EXCEL 软件各组数据进行分析并绘制统计图。

3. 结果与分析

3.1. 姜黄色素最佳吸收波长的测定与最佳溶剂的选择

三种有机溶剂吸光度结果显示, 在 360 nm~420 nm 范围内, 三种有机溶剂吸光度呈现出上升趋势, 并于 420 nm 达到最高峰(见图 1)。随着波长的增加, 样品吸光度开始逐步降低, 说明其对光的吸收能力逐渐下降。在 450~460 nm 波长区间内吸光值波动较大, 具体表现为乙醇吸光度下降了 0.132, 丙酮吸光度下降了 0.173, 乙酸乙酯下降了 0.17。由此说明, 姜黄色素的吸光能力随波长的增加而逐渐减弱。因此, 将三种有机溶剂中最大吸光度 420 nm 波长作为后续实验中测量姜黄色素吸光度的最优波长。

此外, 乙醇作为有机溶剂浸提姜黄色素得到的吸光度明显优于使用丙酮、乙酸乙酯, 即乙醇浸提姜黄色素的效果更好。可能是由于姜黄色素的主要活性成分是姜黄素, 属于多酚类化合物, 分子中含有多个酚羟基($-\text{OH}$)和甲氧基($-\text{OCH}_3$), 整体呈现中等极性和亲水性[17]。根据“相似相溶”原理, 溶剂的极性与目标成分的极性越接近, 溶解效果越好。乙醇的极性较强, 能与姜黄素中的极性基团形成氢键, 促进溶解。丙酮的极性中等, 溶解能力略低于乙醇, 导致了对姜黄素的溶解不足。而乙酸乙酯的极性较弱, 与姜黄素的极性匹配度更低。且乙醇成本较低, 易于回收, 丙酮与乙酸乙酯具有一定的毒性, 可能存在溶剂残留风险。考虑到使用的广泛性, 因此, 采用乙醇作为提取姜黄色素的最好提取溶剂, 并用于后续实验。

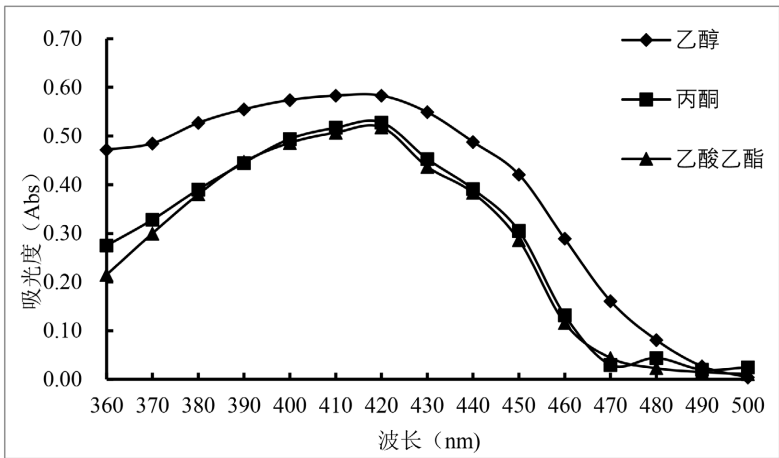


Figure 1. Comparative analysis of absorbance among three organic solvents
图 1. 三种有机溶剂的吸光度比较

3.2. 单因素试验

3.2.1. 浸提溶剂最佳浓度的选择

图 2 显示, 乙醇浓度从 25% 增加到 75%, 吸光度得到显著提升, 并于乙醇浓度为 75% 时达到峰值, 其中乙醇浓度 50% 同比乙醇浓度 25% 时的吸光度增长 2.4 倍。当乙醇浓度升至 75% 后, 吸光度继续增至 0.102, 较 50% 浓度增长 21.43%, 当乙醇浓度高于 75% 时, 吸光度下降至 0.086, 降幅达 15.69%。原因可能是乙醇浓度的升高增强了提取剂对物料的渗透能力, 从而促使姜黄色素更充分的溶入溶液中[3], 但乙醇浓度超过 75% 后, 吸光度随着乙醇浓度的增加而下降, 猜测这可能与极性有关, 因为色素具有一定的极性[18], 而姜黄色素中含有酚羟基和共轭双键, 属于中等极性化合物。当乙醇浓度为 75% 时, 乙醇的羟基能与色素极性基团形成氢键, 促进色素溶解, 同时适量的水分子维持了溶剂的渗透能力, 此时溶解效率最高, 吸光度达到峰值。但乙醇浓度超过 75% 后, 溶剂中水分减少, 极性显著降低, 溶剂无法有效结合姜黄色素的极性基团从而阻碍了目标成分的释放, 最终导致样液吸光度降低。因此, 采用 75% 浓度的乙醇作为最佳提取溶剂。

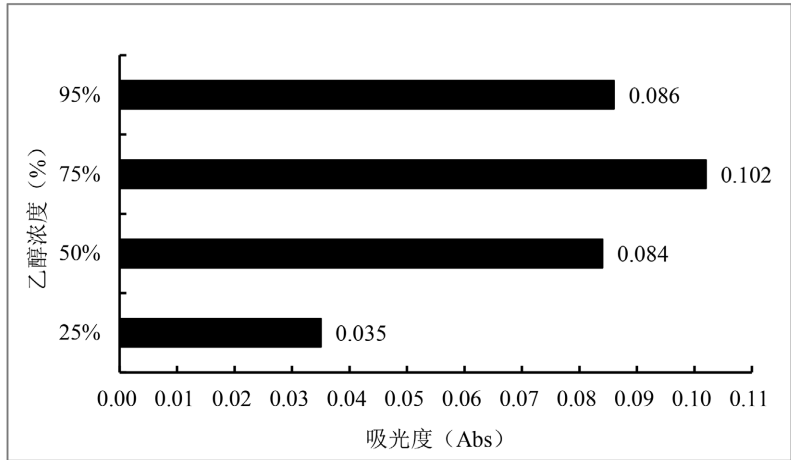


Figure 2. Effect of ethanol concentration on the absorbance of curcumin
图 2. 乙醇浓度对姜黄色素吸光度的影响

3.2.2. 最佳料液比的选择

通过比较不同料液比对姜黄色素吸光度的影响, 结果表明随着料液比中溶剂比例的增加, 样液的吸光度呈现逐渐成下降趋势(如图 3 所示)。其中料液比 1:80 的吸光度较 1:60 下降 30.5%, 而料液比 1:120 同比 1:60 时下降 56.65%。当料液比超过 1:100, 样液的吸光度仅降低了 0.02, 说明姜黄色素的得率基本保持不变, 样品中姜黄色素的释放趋于平衡[19]。这种随料液比的增加, 样液吸光度降低的现象可能由于溶剂用量的增加, 使得色素浓度被稀释, 从而降低了提取出的姜黄色素质量浓度[18]。因此, 在有机溶剂浸提法下, 姜黄色素提取工艺最佳料液比为 1:60。

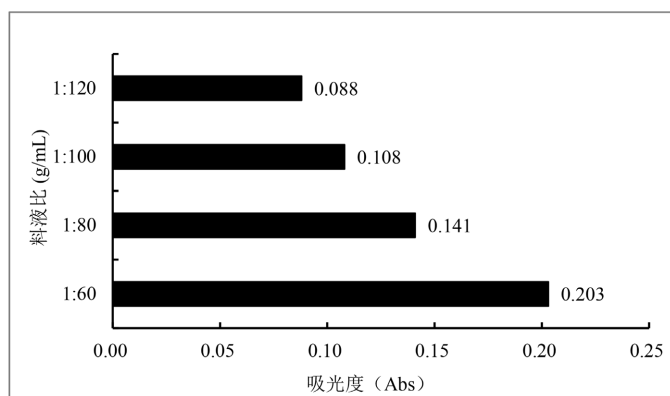


Figure 3. Effect of solid-to-liquid ratio on the absorbance of curcumin

图 3. 料液比对姜黄色素吸光度的影响

3.2.3. 最佳提取时间的选择

图 4 显示, 姜黄色素的吸光度随浸提时间变化呈现先升后降趋势。当姜黄色素在水浴浸提时间达到 60 min 时, 样液的吸光度达到峰值 0.189, 色素溶出量达到饱和。浸提时间超过 60 min 后, 吸光度呈现负增长趋势, 这可能是植物细胞壁结构崩解, 导致析出的不溶物增多, 溶液的传质阻力增大, 影响了有效成分的溶出[20]。浸提时间从 30 min 增至 60 min, 样液的吸光度由 0.184 升至 0.189, 同比增长了 2.72% 并达到提取最大峰值, 这可能由于随着提取时间的增加姜黄色素从姜黄原料向乙醇溶剂中溶解扩散的速度较快。当提取时间达到 60 min 后, 姜黄色素在乙醇中的溶解量达到较高水平, 并且在保证提取量的同时, 减少了姜黄色素因长时间提取而发生变质的风险。综上所述, 最适浸提时间为 60 min。

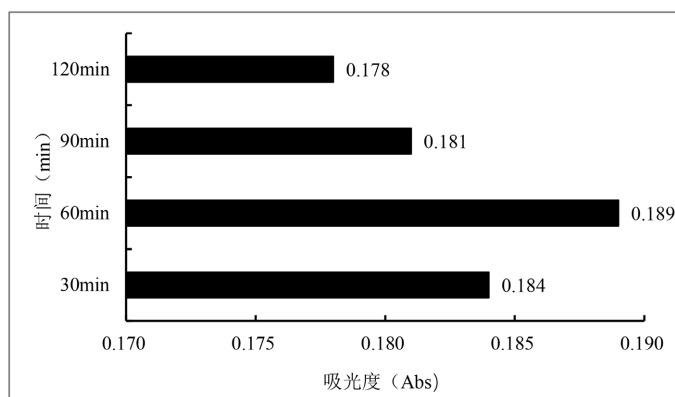


Figure 4. Effect of time on the absorbance of curcumin

图 4. 时间对姜黄色素吸光度的影响

3.2.4. 最佳提取温度的选择

图 5 显示, 姜黄色素吸光度随温度升高呈现先升后降趋势。随着温度从 40℃提高至 60℃时, 样液的吸光度由 0.168 增至 0.238, 增长了 41.67%并在 60℃达到了最高峰, 是 40℃所测得的吸光度的 1.42 倍。其中 40℃~50℃阶段吸光度增速显著, 这表明浸提温度在 40℃~60℃区间内的增加对姜黄色素的提取是有利的。但温度继续升至 70℃后, 吸光度降至 0.202, 降幅达到 15.13%。从热力学平衡与分子运动角度分析, 推测适当的升温可增强分子热运动, 改善植物细胞通透性, 加速姜黄色素从植物细胞向溶剂的扩散速率, 从而促进色素溶出, 但过高温度的(如 70℃)可能引发溶剂挥发或色素热降解, 热能削弱植物细胞壁中纤维素与果胶形成的网络结构强度, 降低传质阻力从而导致提取效率下降。实验表明, 60℃为最佳提取温度, 此时提取效率与组分稳定性达到平衡, 继续升温至溶剂沸点(如 78.5℃)可能加剧体系失稳与色素分解[21], 乙醇挥发速率加快, 导致溶解能力下降。而实验中需严格遵循溶剂的挥发性阈值, 因此在有机溶剂浸提法中, 姜黄色素提取工艺最佳温度为 60℃。

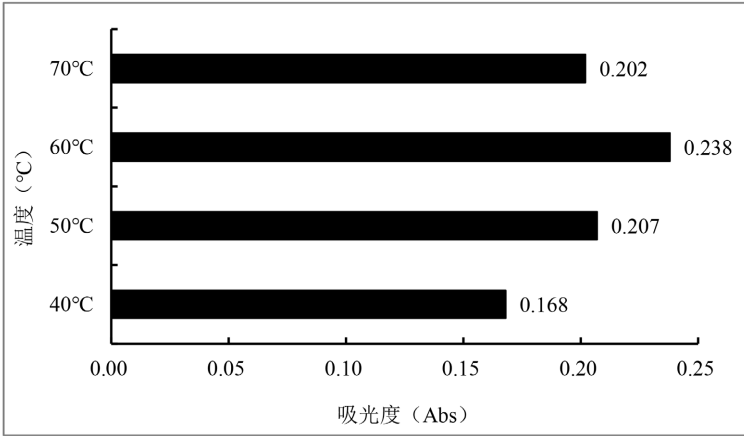


Figure 5. Effect of temperature on the absorbance of curcumin
图 5. 温度对姜黄色素吸光度的影响

3.3. 正交试验

为了得到最佳提取条件, 在单因素方差的基础上进一步进行 $L_9(3^4)$ 正交试验。正交试验为三水平、四因素, 即 A: 提取剂浓度, 设 50%、75%、95%; B: 料液比, 设 1:60、1:80、1:100; C: 提取时间, 设 60 min、90 min、120 min; D: 提取温度, 设 60℃、70℃、80℃, 共设置 9 组, 最后根据吸光度来判断各因素对姜黄色素提取的影响程度, 以及得到最优的提取工艺参数。各实验因素及其水平设置详见表 2。

Table 2. Orthogonal experimental results of absorbance for curcumin extraction
表 2. 姜黄色素吸光度正交试验结果表

试验号	A 乙醇浓度/ %	B 料液比/(g/mL)	C 时间/min	D 温度/℃	吸光度
1	1 (50)	1 (1:60)	1 (30)	1 (50)	0.109
2	1	2 (1:80)	2 (60)	2 (60)	0.166
3	1	3 (1:100)	3 (90)	3 (70)	0.129
4	2 (75)	1	2	3	0.202
5	2	2	3	1	0.143
6	2	3	1	2	0.146

续表

7	3 (95)	1	3	2	0.184
8	3	2	1	3	0.123
9	3	3	2	1	0.152
K ₁	0.404	0.495	0.378	0.404	
K ₂	0.491	0.432	0.52	0.496	
K ₃	0.459	0.427	0.456	0.454	
k ₁	0.135	0.165	0.126	0.135	
k ₂	0.164	0.144	0.173	0.165	
k ₃	0.153	0.142	0.152	0.151	
R	0.029	0.023	0.047	0.031	
最优水平	A ₂	B ₁	C ₂	D ₂	
因素主次	C > D > A > B				

根据表 2 可得, 各因素对姜黄色素提取的影响力大小为 $C > D > A > B$, 即时间 > 温度 > 乙醇浓度 > 料液比, 其中时间对姜黄色素提取的影响最大, 因适当的提取时间可以使姜黄色素在乙醇中的溶解量达到较高水平, 同时减少姜黄色素因长时间提取而发生变质, 是决定姜黄色素提取的重要因素之一。通过比较 k 值可得到最优水平为乙醇浓度 75%, 料液比 1:60, 时间 60 min, 温度 60℃, 即姜黄色素提取的最优组合为 A₂B₁C₂D₂。由于该组合未出现在正交试验表中, 所以追加验证试验, 具体结果见表 3。

3.4. 验证试验

由表 3 可知, 基于正交实验设计优化得到的最佳提取条件 A₂B₁C₂D₂ (乙醇浓度 75%、料液比 1:60、时间 60 min, 温度 60℃), 而正交试验组别中最高吸光度下的提取参数工艺为 A₂B₁C₂D₃ (温度 70℃, 其余参数与正交实验设计优化得到的最佳提取条件一致)。

为探究温度变量对提取效率的影响, 本研究对两组条件进行验证试验: 分别按 A₂B₁C₂D₂ 与 A₂B₁C₂D₃ 进行三次平行试验, 采用紫外分光光度法测定提取液吸光度, 对比两组提取液的吸光度以得出最佳提取条件。将得到的吸光度取平均值后对比得到的结果如表 3 所示。结果显示最优水平 A₂B₁C₂D₂ 吸光度为 0.238, 相较于正交试验表中最优组合 A₂B₁C₂D₃ 的吸光度 0.202 更高。最终得到姜黄色素的最佳提取条件为 A₂B₁C₂D₂ 即乙醇浓度 75%、料液比 1:60、时间 60 min, 温度 60℃为姜黄色素最优提取条件。

Table 3. Validation test results

表 3. 验证试验结果

组别	吸光度
A ₂ B ₁ C ₂ D ₂	0.238
A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	0.202

3.5. 超声辅助有机溶剂浸提法与姜黄色素酶提取法的比较

据图 6 可见, 在酶提取法中, 复合酶提取色素的吸光度稍高于 α -淀粉酶和果胶酶, 达到 0.235, 而 α -淀粉酶和果胶酶测得的吸光度为 0.232、0.233。酶能高效降解植物细胞壁中的纤维素、果胶等多糖成分, 破坏细胞结构, 使细胞内色素更易释放。然而在本研究中, 超声辅助有机溶剂浸提所得到的浸提液吸光度远高于复合酶浸提液的吸光度, 是复合酶浸提液吸光度的 1.1 倍, 提升了 10.2%。超声辅助提取作为一

种新型提取技术, 基于物质极性梯度与溶剂相容性原理, 超声空化效应通过微射流冲击实现细胞壁定向破碎, 促进生物活性成分的高效溶出[22], 提取时间短, 效率高。同时, 超声波辅助提取可在常温或低温(如冰浴)条件下进行, 避免高温对热敏性色素(如花青素、叶绿素)的破坏。相比之下, 酶法虽反应条件温和, 但部分酶的最适温度可能需 40℃~60℃ (如某些纤维素酶), 可能加剧色素降解。此外, 为了达到最好的酶法浸提效果, 往往还需调整溶剂的 pH 值, 这一过程对于 pH 精度要求极高, 因此产品稳定性难以保证[23]。综上所述, 超声波辅助有机溶剂浸提取法相较于姜黄色素酶提取法效率更高, 效果更好。

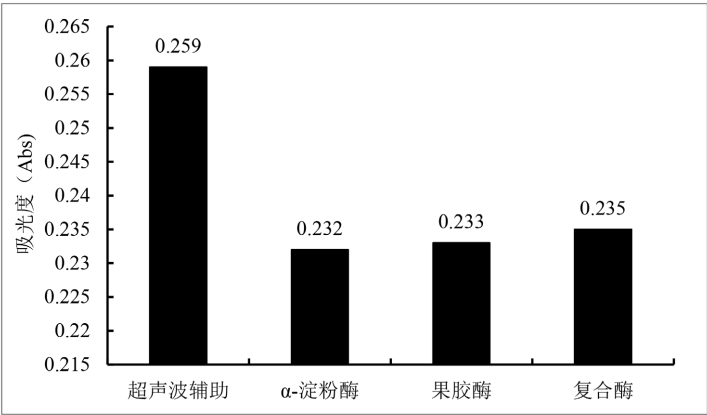


Figure 6. Absorbance comparison between ultrasonic-assisted extraction and enzymatic extraction methods
图 6. 超声波辅助提取与酶提取法的吸光度

3.6. 姜黄色素的稳定性研究

3.6.1. 热稳定性的研究

根据图 7 显示, 温度对样液中的色素稳定性影响较大。相较于低温条件, 高温时对溶液中色素稳定性的影响更为明显。当高温加热 0.5 h 时就会破坏姜黄色素, 从而使溶液发生了沉淀现象, 导致溶液的吸光度发生下降。当在 60℃ 的条件下加热 2 h 后, 样液的吸光度达到最低值。姜黄色素在高温、低温条件下热降解速度不同, 在低温条件下热降解速度较为稳定, 随着温度越高, 姜黄色素降解速度越快, 样液吸光度降低, 显色能力变差[24]。因此, 姜黄色素应该放在 30℃ 下保存较为适宜。

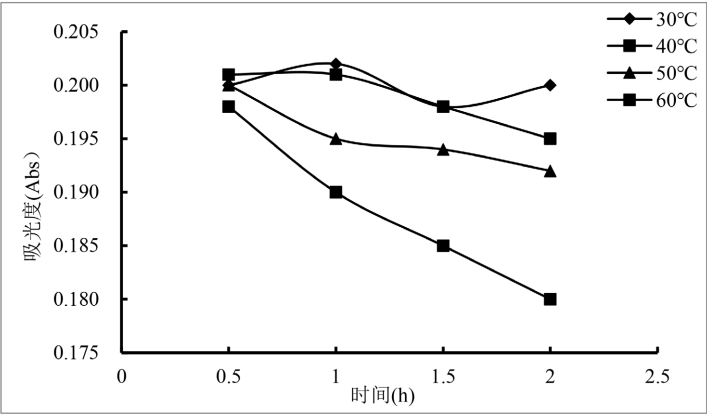


Figure 7. Effects of thermal on curcumin stability
图 7. 热对姜黄色素稳定性的影响

3.6.2. pH 对色素稳定的研究

由图 8 可知, pH 同样对姜黄色素的稳定性具有较大影响。当姜黄色素提取液的 pH 介于 7~8 之间, 呈现黄绿色, pH 在 7 以下, 呈亮黄色, pH 在 8 以上呈现橙黄色, 当 pH 达到 10 以上, 呈现橙红色, pH 达到 12 以上, 溶液呈现红褐色, 颜色变化极其明显, 且酸化后可以恢复成黄色[25]。pH = 3 时, 溶液的吸光度为 1.203, 与 pH 介于 7~8 之间的吸光度相比下降了 0.088。在酸性至中性条件下, 姜黄色素的吸光度略有上升, 总体变化趋势不大。当在中性至碱性的条件下, pH 介于 13~14 区间的吸光度较于 pH 介于 7~8 之间的吸光度上升了 1.52 倍。然而, 当 pH 介于 14~15 区间的吸光度较 pH 介于 13~14 区间的吸光度相比, 吸光度下降了 1.48%。由此可得, 姜黄色素更适宜在弱酸和中性环境中储存。

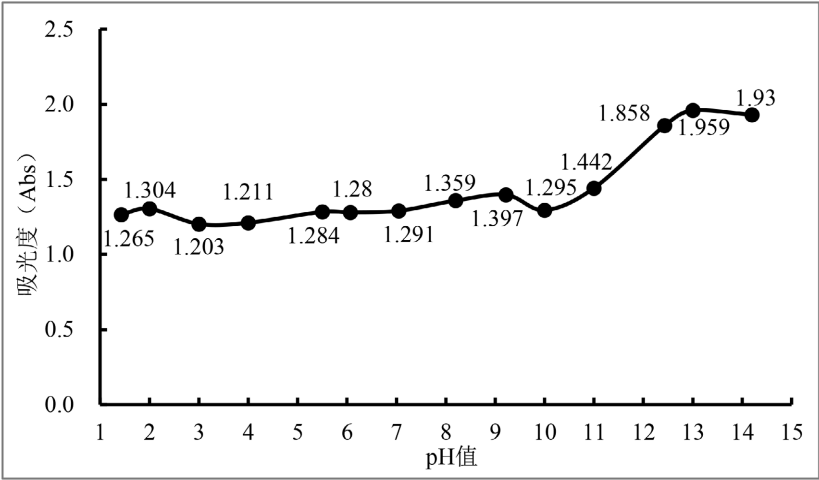


Figure 8. Effect of pH on curcumin stability
图 8. pH 对姜黄色素稳定性的影响

3.6.3. 有机酸对色素稳定性的研究

由表 4 可知, 与 CK 对照组相比, 抗坏血酸和酒石酸的吸光度明显高于 CK 对照组的吸光度, 其中抗坏血酸的吸光度同比增长了 0.499, 而柠檬酸与冰乙酸的吸光度略低于 CK 对照组的吸光度。说明冰乙酸和柠檬酸可使姜黄色素褪色, 其中冰乙酸的褪色效果最为明显。而抗坏血酸与酒石酸对姜黄色素具有增色效果, 抗坏血酸的增色效果最为明显。抗坏血酸作为一种抗氧化剂, 具有一定的还原性, 其抗氧化性强于酒石酸, 抗氧化剂能够清除了体系中的自由基, 而自由基是姜黄色素氧化降解的主要诱因[26], 猜测自由基的清除从而减少对姜黄色素的氧化降解, 同时还原被氧化的姜黄素分子, 使得加入抗坏血酸与酒石酸的样液吸光度增加。

Table 4. Effect of organic acids on curcumin stability
表 4. 有机酸对姜黄色素稳定性的影响

有机酸	吸光度(Abs)
抗坏血酸	0.752
酒石酸	0.269
柠檬酸	0.244
冰乙酸	0.236
乙醇(CK)	0.253

3.6.4. 氧化剂和还原剂浓度对色素稳定性的研究

由图 9、图 10 显示, 在本试验中随着氧化剂 7.5% H_2O_2 与还原剂 Na_2SO_3 用量的增加, 姜黄色素的吸光度都是呈现先上升再下降的趋势, 分别在加入氧化剂 7.5% H_2O_2 10 mL 与还原剂 Na_2SO_3 0.2 g 时, 吸光度达到了最高峰。姜黄色素具有一定的抗氧化性与抗还原性[27], 猜测随着氧化剂与还原剂过量的增加, 造成吸光度下降的原因为其抗还原能力和抗氧化能力而被耗尽, 色素开始降解。这表明氧化剂用量的增加所造成的变化趋势显著高于增加还原剂用量所造成的吸光度趋势, 即氧化剂对姜黄色素稳定性的影响更显著。

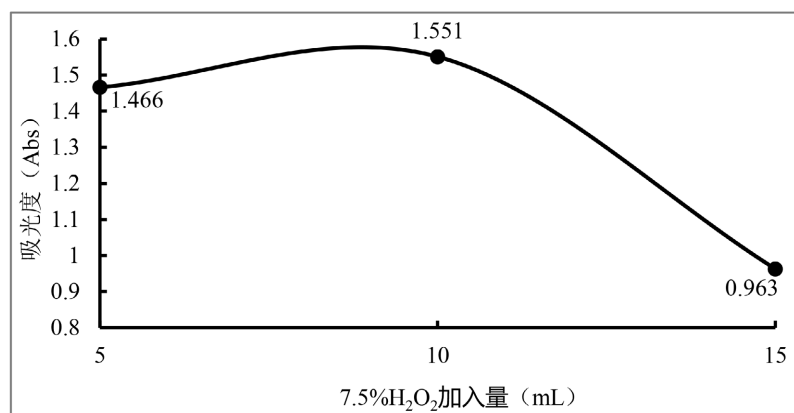


Figure 9. Effect of oxidizing agents on curcumin stability

图 9. 氧化剂对姜黄色素稳定性的影响

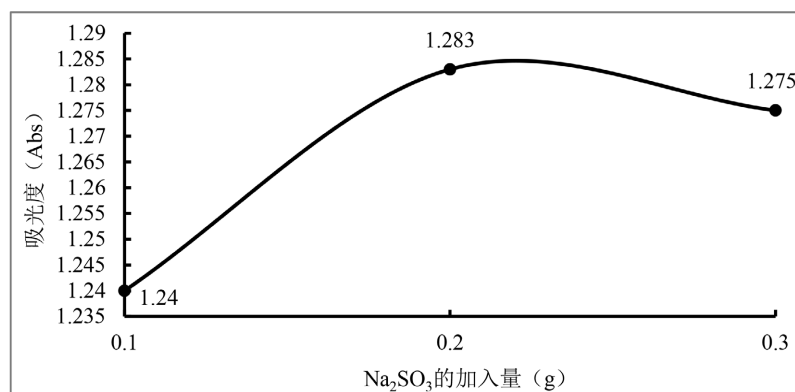


Figure 10. Effect of reducing agents on curcumin stability

图 10. 还原剂对姜黄色素稳定性的影响

4. 结论

姜黄色素作为一种安全无毒且具备抗氧化、抗炎等多功能特性的天然色素资源, 在食品、医药等领域的应用范围正持续扩展, 市场前景日益广阔。为满足不断增长的市场需求, 姜黄色素提取工艺的研究与优化显得尤为重要。本研究系统优化了姜黄色素的提取工艺并阐明了其稳定性变化规律。研究结果表明, 基于单因素实验与正交试验, 最佳提取参数为浸提温度 60°C 、时间 1 h、料液比 1:60 (g/mL) 及乙醇浓度 75%, 该条件下提取色素的吸光度达 0.238; 通过提取方法对比分析, 超声辅助有机溶剂法吸光度 (0.259) 较传统酶法吸光度 (0.235) 提升 10.2%, 验证了其在规模化生产中的技术优势。稳定性研究结果表

明, 姜黄色素在低于 30℃、中性或弱酸性环境下稳定性最佳, 抗坏血酸及过量氧化/还原剂会显著破坏其结构, 据此提出控温、隔绝强氧化/还原条件的储存策略。综上, 该研究通过工艺参数优化与稳定性变化规律探究, 为姜黄色素高效提取、品质控制及工业化应用提供了关键理论支撑和技术路径。

基金项目

浙江农林大学暨阳学院大学生创新创业训练计划项目(S202413283051)。

参考文献

- [1] 李云萍, 张美化, 付学文. 天然色素的提取及应用研究进展[J]. 天津化工, 2022, 36(5): 5-8.
- [2] 周辛知, 曹婷婷, 吴嘉玺, 等. 天然色素的研究进展概述[J]. 农技服务, 2015, 32(9): 10-13.
- [3] 郑君花. 姜黄色素的提取、稳定化及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [4] 李子宜. 姜黄色素的提取、分离及其在彩妆产品中的应用[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [5] Epstein, J., Sanderson, I.R. and MacDonald, T.T. (2010) Curcumin as a Therapeutic Agent: The Evidence from *in Vitro*, Animal and Human Studies. *British Journal of Nutrition*, **103**, 1545-1557. <https://doi.org/10.1017/s0007114509993667>
- [6] 阿文丽, 张衡嶙, 胡吉蕾, 等. 姜黄素高热环境下器官保护作用的研究进展[J]. 现代药物与临床, 2023, 38(9): 2362-2367.
- [7] Sharifi-Rad, J., Rayess, Y.E., Rizk, A.A., Sadaka, C., Zgheib, R., Zam, W., *et al.* (2020) Turmeric and Its Major Compound Curcumin on Health: Bioactive Effects and Safety Profiles for Food, Pharmaceutical, Biotechnological and Medicinal Applications. *Frontiers in Pharmacology*, **11**, Article No. 01021. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.01021>
- [8] 洪国英. 基于环保媒染剂的天然姜黄色素封装和染色行为研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [9] Yang, C., Su, X., Liu, A., Zhang, L., Yu, A., Xi, Y., *et al.* (2013) Advances in Clinical Study of Curcumin. *Current Pharmaceutical Design*, **19**, 1966-1973. <https://doi.org/10.2174/138161213805289291>
- [10] Aggarwal, B.B. and Sung, B. (2009) Pharmacological Basis for the Role of Curcumin in Chronic Diseases: An Age-Old Spice with Modern Targets. *Trends in Pharmacological Sciences*, **30**, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.tips.2008.11.002>
- [11] Anand, P., Kunnumakkara, A.B., Newman, R.A. and Aggarwal, B.B. (2007) Bioavailability of Curcumin: Problems and Promises. *Molecular Pharmaceutics*, **4**, 807-818. <https://doi.org/10.1021/mp700113r>
- [12] Yadav, D.K., Sharma, K., Dutta, A., Kundu, A., Awasthi, A., Goon, A., *et al.* (2017) Purity Evaluation of Curcuminoids in the Turmeric Extract Obtained by Accelerated Solvent Extraction. *Journal of AOAC International*, **100**, 586-591. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.17-0057>
- [13] Shirsath, S.R., Sable, S.S., Gaikwad, S.G., Sonawane, S.H., Saini, D.R. and Gogate, P.R. (2017) Intensification of Extraction of Curcumin from Curcuma Amada Using Ultrasound Assisted Approach: Effect of Different Operating Parameters. *Ultrasonics Sonochemistry*, **38**, 437-445. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.040>
- [14] Al Loman, A. and Ju, L. (2017) Enzyme-Based Processing of Soybean Carbohydrate: Recent Developments and Future Prospects. *Enzyme and Microbial Technology*, **106**, 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2017.06.013>
- [15] Alipanahpour Dil, E., Ghaedi, M., Asfaram, A., Zare, F., Mehrabi, F. and Sadeghfar, F. (2017) Comparison between Dispersive Solid-Phase and Dispersive Liquid-Liquid Microextraction Combined with Spectrophotometric Determination of Malachite Green in Water Samples Based on Ultrasound-Assisted and Preconcentration under Multi-Variable Experimental Design Optimization. *Ultrasonics Sonochemistry*, **39**, 374-383. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.011>
- [16] Chizoba Ekezie, F., Sun, D., Han, Z. and Cheng, J. (2017) Microwave-Assisted Food Processing Technologies for Enhancing Product Quality and Process Efficiency: A Review of Recent Developments. *Trends in Food Science & Technology*, **67**, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.014>
- [17] 杨仕玲, 林华. 姜黄色素在食品中的应用及前景[J]. 福建轻纺, 2025(2): 41-46.
- [18] 徐紫琪, 王道滇, 李学玲. 咖啡果皮色素的提取及体外抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(9): 18-24.
- [19] 刘红, 田洪根. 响应面法优化密蒙花黄色素的快速提取工艺[J]. 食品与药品, 2024, 26(5): 426-430.
- [20] 郭倩. 栀子黄色素提取及其在冰染天然纤维织物中的应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2023.
- [21] 柳疆梅, 单国华, 刘瑞. 巴旦木壳色素提取工艺优化及成分初步分析[J]. 针织工业, 2022(5): 51-55.
- [22] 邓丽莎, 韩梅芳, 任江陵, 廖宇珏, 冯哲. 杜鹃花中色素的提取及应用初探[J]. 轻工科技, 2022(2): 9-12.

-
- [23] 黄榕清, 许传俊, 兰涛, 等. 姜黄素的提取技术研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2019, 48(4): 384-390.
- [24] 杨军君. 姜黄色素的提取、抗氧化活性及稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- [25] Kitada, K., Machmudah, S., Sasaki, M., Goto, M., Nakashima, Y., Kumamoto, S., *et al.* (2008) Supercritical CO₂ Extraction of Pigment Components with Pharmaceutical Importance from *Chlorella vulgaris*. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **84**, 657-661. <https://doi.org/10.1002/jctb.2096>
- [26] 周洋, 杨文婧, 操丽丽, 等. 生育酚抑制油脂氧化机制研究进展[J]. 中国油脂, 2018, 43(8): 32-38.
- [27] 赵蝴蝶, 易帆, 马越, 等. 天然姜黄素的应用及性能改善研究进展[J]. 印染助剂, 2023, 40(11): 1-9.