

响应面优化超声辅助葵花籽油提取番茄红素

高瑞萍, 梁明艳, 涂鸿阳

- 重庆工商大学 食品科学与工程学院, 重庆 400067
- 重庆市特色农产品加工储运工程技术研究中心, 重庆 400067

摘要:目的 本研究利用超声波技术辅助葵花籽油提取番茄酱中的番茄红素, 优化提取工艺参数, 并增强含有番茄红素的葵花籽油的抗氧化性能。方法 采用单因素试验与响应面优化实验设计方法, 通过调整油脂种类、超声时间、超声温度、超声功率和料液比等提取工艺参数, 确定番茄红素的提取最佳工艺条件。通过测定番茄红素提取率以及油脂酸价和过氧化值, 评估提取工艺的效果。结果 最优工艺条件为液料比 4.3 mL/g、超声功率 410 W、超声温度 43 °C、超声时间 53 min, 在该工艺条件下番茄红素的提取率为 0.263 2 mg/g, 与建立的模型预测值相符, 获得的含番茄红素的葵花籽油具有显著增强的抗氧化性能。结论 番茄红素对葵花籽油具有一定的保护作用, 能够延缓油脂酸价和过氧化值的增长趋势。本研究证实了超声波辅助葵花籽油提取番茄红素, 不仅提高了番茄红素的提取率, 同时显著提高了葵花籽油的抗氧化性能, 这对食品工业具有重要意义。

关键词:番茄红素; 葵花籽油; 超声波; 响应面; 氧化特性

中图分类号:TS255.36 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0003.002

Response Surface Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Lycopene in Combination with Sunflower Seed Oil

GAO Ruiping, LIANG Mingyan, TU Hongyang

- School of Food Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China
- Chongqing Engineering Research Center for Processing, Storage & Transportation of Characterized Agro-Products, Chongqing 400067, China

Abstract: Objective This study employs ultrasonic technology to assist the extraction of lycopene from tomato paste using sunflower seed oil, aiming to optimize the extraction process parameters and enhance the antioxidant properties of lycopene-enriched sunflower seed oil. **Methods** Single-factor experiments and response surface optimization experimental design methods were adopted. By adjusting extraction process parameters such as the type of oil, ultrasound time, ultrasound temperature, ultrasound power, and material-to-liquid ratio, the optimal extraction conditions for lycopene were determined. The effectiveness of the extraction process was evaluated by measuring the extraction rate of lycopene, the lipid acid value and peroxide value. **Results** Under the optimal process conditions (liquid-to-material ratio of 4.3 mL/g, ultrasonic power of 410 W, ultrasonic temperature of 43 °C, and ultrasonic time of 53 min), the extraction rate of lycopene was 0.263 2 mg/g, which was consistent with the predicted value of the established model. The obtained

收稿日期:2024-06-03 **修回日期:**2024-09-19 **文章编号:**1672-058X(2026)03-0010-09

基金项目:重庆市教委科技项目资助(KJQN202300837);重庆市教委科技项目资助(KJQN202100828);重庆工商大学青年项目(2152028)资助;重庆工商大学高层次人才科研启动项目(2156009);重庆市研究生科研创新项目资助(YJSCXX2023211144)。

作者简介:高瑞萍(1987—),女,云南宣威人,讲师,博士,从事农产品加工与贮藏及非热技术在食品加工中的应用等研究。Email: gaorp_113@126.com.

引用格式:高瑞萍,梁明艳,涂鸿阳. 响应面优化超声辅助葵花籽油提取番茄红素[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2026, 43(3):10-18.

Gao Ruiping, Liang Mingyan, Tu Hongyang. Response surface optimization of ultrasound-assisted extraction of lycopene in combination with sunflower seed oil[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(3): 10-18.

sunflower seed oil containing lycopene has significantly enhanced antioxidant performance. **Conclusion** Lycopene has a certain protective effect on sunflower seed oil and can delay the increasing trend of the acid value and peroxide value of oils. This study confirms that ultrasound-assisted extraction of lycopene by sunflower seed oil not only improves the extraction rate of lycopene but also significantly enhances the antioxidant performance of sunflower seed oil, which is of great significance to the food industry.

Keywords: lycopene; sunflower seed oil; ultrasound; response surface; oxidation characteristics

番茄红素是一种广泛分布的天然物质,不仅存在于番茄中,还可通过酵母菌、藻类等微生物在自然界中合成,在西瓜、南瓜、柚子等其他植物的可食用果实中也大量存在。番茄红素作为类胡萝卜素的一类,属于脂溶性物质,在甲醇、乙醇和水中都很难溶解,但在氯仿、丙酮等有机溶剂中却很容易溶解^[1-3]。番茄红素具有缓解人体衰老、阻止癌细胞病变、增强人体免疫力以及调节血脂的作用^[4],在近几年的研究中发现其抗氧化性不仅远高于维生素 E,连 β -胡萝卜素都稍显逊色^[5]。提取番茄红素常采用超临界 CO₂ 萃取、有机溶剂提取、超声波辅助提取、超声-微波辅助提取、酶辅助等方法^[6]。番茄红素的提取方法中,超声波辅助提取技术因其操作简便、低能耗以及高提取效率而备受研究关注,这一技术被广泛认为对提高番茄红素的提取效率具有潜在优势。此外,超声波辅助提取技术对热不稳定性物质具有良好的保护作用,同时具备较高可操作性且不会引入其他物质,从而实现高纯度的提取目的^[7]。

基于目前的研究报道,使用食用油来提取番茄红素的相关研究相对有限。有研究采用加果胶酶或加碱的方法,加速番茄细胞的破碎,再使用食用油脂对其番茄红素进行提取,这种提取方法效率高,但带入了其他物质,降低了番茄红素的纯度,并对食用油造成了一定污染^[8]。也有采用超声辅助乙醇溶液以达到快速萃取番茄红素的方法,但加入的乙醇会对提取的番茄红素造成一定污染^[9]。基于此,本研究利用超声波辅助葵花籽油提取番茄红素,采用响应面优化法进行四因素三水平的研究,分别探究超声时间、超声温度、超声功率以及料液比对提取效率的影响,合理利用了超声辅助技术的优点且避免了有机溶剂对提取物的污染。通过此法得到的食用油脂不仅能有效延缓酸败,还因富含番茄红素,实现了对油脂的营养强化。

该研究采用的超声波辅助提取属于一种物理萃取方法,利用超声波产生的空化效应和搅拌作用,对番茄细胞进行破碎,将里面的番茄红素等有效成分萃取到食用油脂中。和有机试剂萃取相比,它同时起到了提升提取速率的作用,并且对食用油脂的污染较少,考虑超声提取技术的多种优势,本文选择了超声辅助葵花籽油提取番茄红素作为工艺研究对象。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

番茄酱,中粮屯河番茄制品有限公司;多力葵花籽油,佳格食品有限公司;氢氧化钠、酚酞、无水乙醇、石油醚,成都市科隆化学品有限公司;正己烷、冰乙酸、三氯甲烷,重庆化学试剂厂;碘化钾、无水硫酸钠、可溶性淀粉,重庆川东化工有限公司;硫代硫酸钠,重工业有限重庆川东化公司;重铬酸钾,广州市科龙化工有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

RCT basic 电热炉、VORTEX2S025 涡旋仪,艾卡仪器设备有限公司;101-1AB 电热恒温鼓风干燥箱,上海龙跃仪器设备有限公司;FA224 电子分析天平,上海舜宇平科学仪器有限公司;SI020 紫外可见分光光度计,上海天美科学仪器有限公司;BHS-4 数显恒温水浴锅,上海垒固仪器设备有限公司;TDZ5-WS 台式低速离心机,长沙湘仪离心机仪器有限公司;SB-100DT 台式超声波清洗机,四川科百瑞仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 提取油脂的选择

本实验选取大豆油、植物调和油、玉米油及葵花籽油等四种植物油脂作为提取油。参考 Rahimi 的方法^[10]并做修改,准确称取 5 g 的番茄酱,分别加入相同体积的油脂 5 mL,震荡混匀 1 min 后,在功率为 420 W 温度为 45 °C 下超声提取 45 min,提取结束后在 3 500 rpm 下离心 15 min,取上清液 0.25 mL 加入 10 mL 试管中,再加入 5 mL 正己烷,摇晃均匀。取上述提取液用正己烷稀释一定的倍数(稀释至吸光度控制在 2 以内)后在 503 nm 处测定吸光值,以正己烷和油的混合液(0.25 mL 油加入 5 mL 正己烷)作为空白,并按式(1)计算番茄红素的提取率。

$$R = \frac{A_{530} \times M_w \times V}{\lambda \times L \times m} \times 100 \quad (1)$$

式(1)中, R 为番茄红素的提取率; A_{530} 为测定的吸光值; M_w 为番茄红素的分子量(536.9 g/mol); V 为正己烷的体积(mL); λ 为番茄红素在正己烷中 503 nm 处的消光系数(17.2×10^4 (L · mol⁻¹ · cm⁻¹)); L 为吸收池长(1 cm); m 为番茄酱重量(g)。

1.2.2 超声波辅助葵花籽油提取番茄红素工艺优化

准确称取 5 g 番茄酱于离心管中,分别加入 5 mL、10 mL、15 mL、20 mL、25 mL 葵花籽油后混匀。然后将样品分别置于 25 °C、35 °C、45 °C、55 °C、65 °C 的温度下超声提取 25 min、35 min、45 min、55 min、65 min,并设置不同的超声功率 280 W、350 W、420 W、490 W、560 W。待提取结束后取出于 3 500 rpm 下离心 15 min,取上清液 0.25 mL 加入 10 mL 试管中,再加入 5 mL 正己烷,摇晃均匀,取上述提取液用正己烷稀释一定的倍数(稀释至吸光度控制在 2 以内)后在 503 nm 处测定吸光值,并以正己烷和油的混合液(0.25 mL 油加入 5 mL 正己烷)作为空白,最后按式(1)计算番茄红素的提取率。

1.2.3 酸价与过氧化值测定

称取一定量的番茄酱与葵花籽油按照最佳工艺进行混合超声处理,待处理完毕后,在 3 500 rpm 下离心 15 min,将离心结束后得到的样品进行料液分离,最后得到含番茄红素的葵花籽油 470 mL 装入 500 mL 烧杯中,敞口放置于室温下。并以不含番茄红素的葵花籽油作对比,分别测定第 1 d、3 d、5 d、7 d、9 d 的酸价和过氧化值。按式(2)、式(3)对酸价和过氧化值结果进行计算。

参照 GB 5009.229-2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》采用热乙醇法进行酸价测定^[11],结果由式(2)得出:

$$X_{AV} = \frac{(V - V_0) \times C \times 56.1}{m} \quad (2)$$

式(2)中, X_{AV} 为酸价(mg/g); V 为试样测定所消耗标准滴定溶液体积(mL); V_0 为相应的空白所消耗的标准滴定溶液的体积(mL); C 为标准滴定溶液的摩尔浓度(mol/L);56.1 为氢氧化钾的摩尔质量(g/mol); m 为油脂质量(g)。

参照 GB 5009.227-2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》采用滴定法进行过氧化值测定^[12],计算公式(3)如下:

$$X_1 = \frac{(V - V_0) \times C \times 0.1269}{m} \times 100 \quad (3)$$

式(3)中, X_1 为过氧化值(g/100g); V 为试样消耗的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 标准溶液体积(mL); V_0 为空白所消耗的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 标准溶液体积(mL); C 为 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 标准溶液的浓度(mol/L);0.1269 为碘的质量(g); m 为试样质量(g);100 为换算系数。

1.3 数据处理和分析

所有实验平行 3 次,结果取平均值。使用 SPSS 软件进行数据显著性分析,使用 Design Expert 8 软件进行响应面分析。图表中以不同小写英文字母代表显著性

差异($P < 0.05$ 为显著性差异)。

2 结果与分析

2.1 提取油脂的选择

通常,番茄红素在有机溶剂中具有良好的相容性,然而有机溶剂的使用可能存在安全问题,因此在后续阶段需要考虑有机溶剂的去除方法。而以油脂为载体代替有机溶剂具有绿色、安全等优点,可以很好地解决除去有机溶剂的难题^[13]。超声辅助不同油脂提取番茄红素的提取率如图 1 所示,提取率由大到小依次为葵花籽油>植物调和油>大豆油>玉米油,该结果与 Rahimi 的研究^[10]一致。过去的研究已经指出,相比于有机溶剂提取番茄红素,使用油脂作为载体进行提取可以促进番茄红素的溶解,从而使番茄红素更容易达到异构化所需的活化能^[14]。在各种油脂中,葵花籽油因其含有天然抗氧化剂(如 α -生育酚和芝麻酚),能够更有效地抑制番茄红素异构体的降解,从而提高番茄红素的提取效率。综合以上因素,本实验选择葵花籽油作为提取番茄红素的油脂载体。

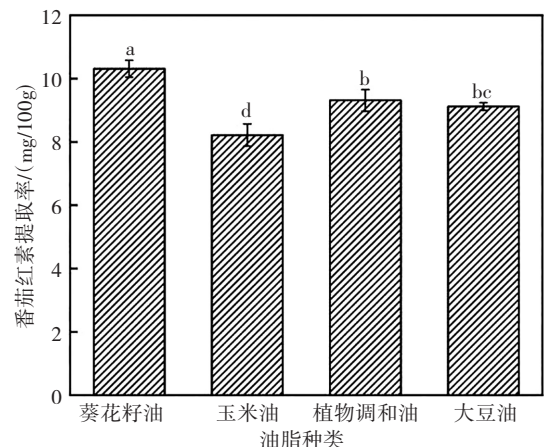


图 1 不同油脂对番茄红素提取率的影响

Fig. 1 Effect of different oils on the extraction rate of lycopene

2.2 超声波辅助葵花籽油提取番茄红素的单因素实验

2.2.1 料液比对提取率的影响

由图 2 可知,料液比对番茄红素的提取率影响显著。随着料液比的增加,番茄红素的提取率呈逐渐增加的趋势,但当料液比达到 1:4 时,料液比再进一步增加时番茄红素的提取率变化不明显。结果表明,当料液比达到 1:4 的时候油脂已经达到饱和,原因是较高的料液比会导致较大的浓度差,从而加速传质并促进番茄红素扩散到介质中^[15]。然而,在传质过程达到最大值后,进一步增加料液比会延长从溶剂扩散到内部基质的距离,并且几乎不能再提高番茄红素的产量,所以番茄红素的提取率开始趋于稳定^[16],因此选择 1:4 为料液比最佳水平。

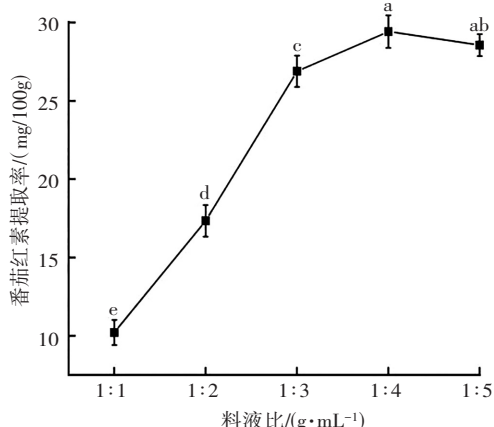


图 2 料液比对番茄红素提取率的影响

Fig. 2 Effect of solid-liquid ratio on the extraction rate of lycopene

2.2.2 超声时间对提取率的影响

由图 3 可知,在 25 min~55 min 之间,番茄红素的提取率呈现明显的上升趋势,并随着时间的增加而增大。当处理时间达到 55 min 时,提取率达到最大值,之后继续延长超声处理时间会导致番茄红素的提取率显著下降。研究表明:随着超声处理时间的延长,超声波的空化效应得以充分发挥,导致由空化引起的宏观湍流和植物基质表面空化产生的微射流更加显著地破碎细胞结构,从而有效促进番茄红素向提取溶剂中的释放^[17-18]。然而,当超声处理时间过长时,番茄红素可能会发生氧化分解。这主要是由于在长时间的超声波照射下,一些天然活性成分可能经历化学降解,导致提取率下降^[19]。因此选择 55 min 为超声时间最佳水平。

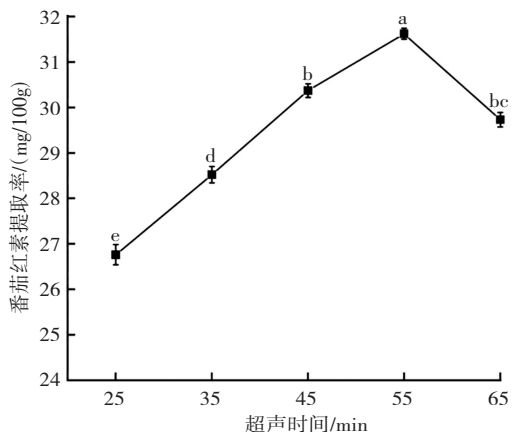


图 3 超声时间对番茄红素提取率的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic time on the extraction rate of lycopene

2.2.3 超声温度对提取率的影响

由图 4 可知,番茄红素的提取率在温度 35 °C~55 °C 之间表现出显著的波动,呈现先增加后减少的趋势。在 45 °C 之前,随着温度的升高,提取率逐渐增加,并在 45 °C 时达到峰值,随后随着温度继续升高,提取率开始下降。该结果可通过超声波的空化和热效应联

合作用进行解释,这两种效应受提取温度显著影响^[20]。随着温度升高,热活性加速,从而促进提取物的溶解度;当温度达到一定程度时,空化微气泡内溶剂分子的蒸汽压增加,导致空化强度降低^[21]。因此,温度是影响番茄红素超声提取的敏感因素,当空化效应和热效应达到平衡时,番茄红素的提取率最高。这与 Kaur 等研究的结果一致^[22]。因此,选择 45 °C 为超声温度最佳水平。

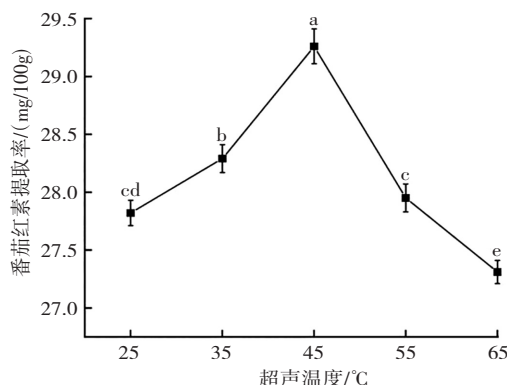


图 4 超声温度对番茄红素提取率的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic temperature on the extraction of lycopene

2.2.4 超声功率对提取率的影响

由图 5 可知,番茄红素的提取率在超声功率 350 W~490 W 之间表现出显著波动,呈现先增加后减少的趋势。在功率升至 420 W 之前,提取率随功率增加而上升,并在 420 W 时达到峰值,随着功率进一步增加,提取率开始下降。这一结果表明:随着超声功率的增加,液体中产生了更多的空化微气泡,气泡破裂更为剧烈,促进了组织细胞壁的破坏和番茄红素向溶剂中的扩散^[23]。当超声功率超过 420 W 时,这些空化气泡可能会长大到难以坍塌或坍塌速度减慢,从而降低空化效应。此外,过高的超声功率可能导致产生过多的气泡,阻碍传质并引起超声波散射^[24]。与此同时,热效应也会对番茄红素的产量产生负面影响,超声波产生的热量可能在短时间内无法完全消散,随着超声功率的增加,热量积累可能导致番茄红素分解,从而使其提取率下降^[25]。因此,选择 420 W 为超声功率最佳水平。

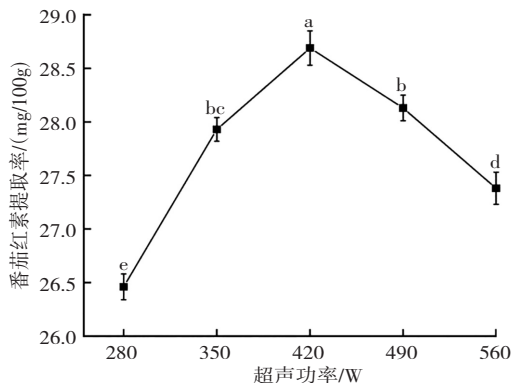


图 5 超声功率对番茄红素提取率的影响

Fig. 5 Effect of ultrasonic power on the extraction rate of lycopene

2.3 响应面优化实验

2.3.1 响应面实验与结果分析

依据以上单因素实验结果,以番茄红素提取率(Y)作为响应值,对四个自变量,包括料液比(A)、超声时间(B)、超声温度(C)和超声功率(D),进行四因素三水平的响应面优化实验,实验设计及实验结果如表 1 所示。

表 1 响应面实验结果
Table 1 Results of response surface tests

| 试验号 | 液料比 A (ml/g) | 超声时间 B (min) | 超声温度 C ($^{\circ}C$) | 超声功率 D (W) | 番茄红素提取率 Y (mg/100g) |
|-----|----------------|----------------|--------------------------|--------------|-----------------------|
| 1 | 3(-1) | 45(-1) | 45(0) | 420(0) | 21.56 |
| 2 | 5(1) | 45(-1) | 45(0) | 420(0) | 16.85 |
| 3 | 3(-1) | 65(1) | 45(0) | 420(0) | 17.32 |
| 4 | 5(1) | 65(1) | 45(0) | 420(0) | 17.27 |
| 5 | 4(0) | 55(0) | 35(-1) | 350(-1) | 22.38 |
| 6 | 4(0) | 55(0) | 55(1) | 350(-1) | 21.37 |
| 7 | 4(0) | 55(0) | 35(-1) | 490(1) | 22.36 |
| 8 | 4(0) | 55(0) | 55(1) | 490(1) | 18.37 |
| 9 | 3(-1) | 55(0) | 45(0) | 350(-1) | 20.38 |
| 10 | 5(1) | 55(0) | 45(0) | 350(-1) | 19.35 |
| 11 | 3(-1) | 55(0) | 45(0) | 490(1) | 19.69 |
| 12 | 5(1) | 55(0) | 45(0) | 490(1) | 15.44 |
| 13 | 4(0) | 45(-1) | 35(-1) | 420(0) | 23.4 |
| 14 | 4(0) | 65(1) | 35(-1) | 420(0) | 21.37 |
| 15 | 4(0) | 45(-1) | 55(1) | 420(0) | 23.12 |
| 16 | 4(0) | 65(1) | 55(1) | 420(0) | 19.42 |
| 17 | 3(-1) | 55(0) | 35(-1) | 420(0) | 20.35 |
| 18 | 5(1) | 55(0) | 35(-1) | 420(0) | 18.37 |
| 19 | 3(-1) | 55(0) | 55(1) | 420(0) | 20.34 |
| 20 | 5(1) | 55(0) | 55(1) | 420(0) | 14.05 |
| 21 | 4(0) | 45(-1) | 45(0) | 350(-1) | 24.63 |
| 22 | 4(0) | 65(1) | 45(0) | 350(-1) | 20.36 |
| 23 | 4(0) | 45(-1) | 45(0) | 490(1) | 21.89 |
| 24 | 4(0) | 65(1) | 45(0) | 490(1) | 20.01 |
| 25 | 4(0) | 55(0) | 45(0) | 420(0) | 26.92 |
| 26 | 4(0) | 55(0) | 45(0) | 420(0) | 27.09 |
| 27 | 4(0) | 55(0) | 45(0) | 420(0) | 27.45 |
| 28 | 4(0) | 55(0) | 45(0) | 420(0) | 28.43 |
| 29 | 4(0) | 55(0) | 45(0) | 420(0) | 27.42 |

2.3.2 模型建立及方差分析

采用 Design-Expert 8 软件对表 1 的数据进行回归分析,得到以番茄红素提取率 Y 为响应值的二元多项回归方程: $Y = 27.46 - 1.53A - 1.31B - 0.9633C - 0.8925D + 1.17AB - 1.08AC - 0.8050AD - 0.4175BC + 0.5975BD - 0.7450CD - 6.10A^2 - 2.82B^2 - 3.10C^2 - 2.94D^2$ 。

表 2 显示了方差分析的结果。 F 值为 55.81 ($P < 0.001$),表明模型的差异非常显著,而失拟项的 P 值为

0.3518,不显著,说明方程模型的拟合效果良好。该模型的相关系数 R^2 为 0.9824,校正相关系数 R^2_{adj} 为 0.9648,这表明实测值和预测值之间具有很强的相关性,因此模型的预测准确度较高,可以用于预测番茄红素的提取率。此外,根据各项的 P 值可知,因素 A 、 B 、 C 、 D 、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对番茄红素提取率有非常显著的影响 ($P < 0.001$),因素 AB 、 AC 对番茄红素提取率有显著影响 ($P < 0.01$),而因素 AD 、 CD 对番茄红素提取率有显著影响 ($P < 0.05$)。综合比较四个因素的 F 值得出,对番茄红素提取率影响最大的因素为料液比,其次分别是超声时间、超声温度、超声功率。

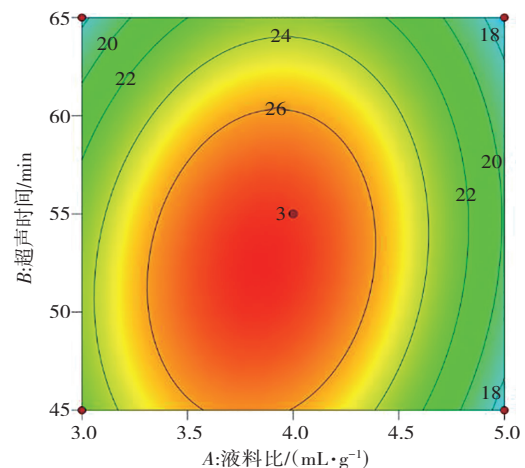
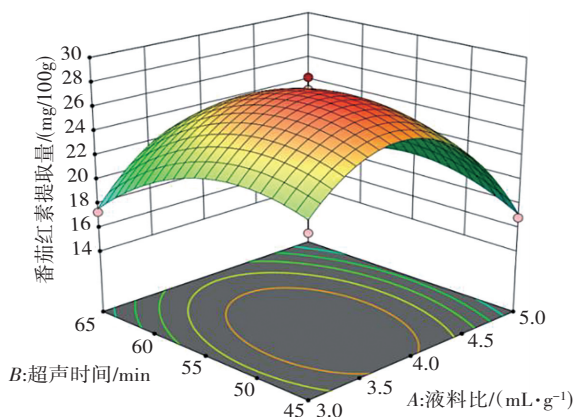
表 2 响应面试验方差分析

| 方差来源 | 平方和 s | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 | 显著性 |
|-----------|---------|-----|--------|----------------|----------------------|-----|
| 模型 | 377.08 | 14 | 26.93 | 55.81 | < 0.0001 | *** |
| A -液料比 | 27.94 | 1 | 27.94 | 57.89 | < 0.0001 | *** |
| B -超声时间 | 20.54 | 1 | 20.54 | 42.56 | < 0.0001 | *** |
| C -超声温度 | 11.14 | 1 | 11.14 | 23.07 | 0.0003 | *** |
| D -超声功率 | 9.56 | 1 | 9.56 | 19.81 | 0.0005 | *** |
| AB | 5.43 | 1 | 5.43 | 11.25 | 0.0047 | ** |
| AC | 4.64 | 1 | 4.64 | 9.62 | 0.0078 | ** |
| AD | 2.59 | 1 | 2.59 | 5.37 | 0.0361 | * |
| BC | 0.6972 | 1 | 0.6972 | 1.44 | 0.2493 | |
| BD | 1.43 | 1 | 1.43 | 2.96 | 0.1074 | |
| CD | 2.22 | 1 | 2.22 | 4.60 | 0.0500 | * |
| A^2 | 240.98 | 1 | 240.98 | 499.33 | < 0.0001 | *** |
| B^2 | 51.45 | 1 | 51.45 | 106.61 | < 0.0001 | *** |
| C^2 | 62.49 | 1 | 62.49 | 129.49 | < 0.0001 | *** |
| D^2 | 55.98 | 1 | 55.98 | 115.99 | < 0.0001 | *** |
| 残差 | 6.76 | 14 | 0.4826 | | | |
| 失拟项 | 5.39 | 10 | 0.5385 | 1.57 | 0.3518 | 不显著 |
| 纯误差 | 1.37 | 4 | 0.3428 | | | |
| 总和 | 383.83 | 28 | | | | |
| | | | | $R^2 = 0.9824$ | $R^2_{adj} = 0.9648$ | |

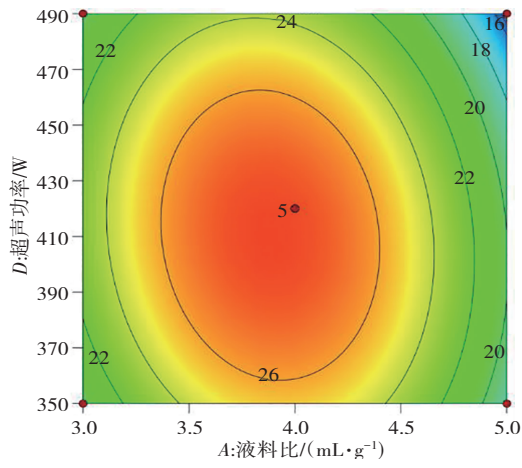
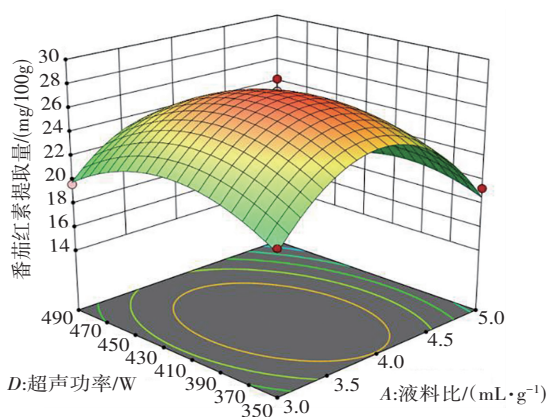
注:***差异极显著 ($P < 0.001$); **差异高度显著 ($P < 0.01$); *差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.3 各因素间交互作用及最佳工艺

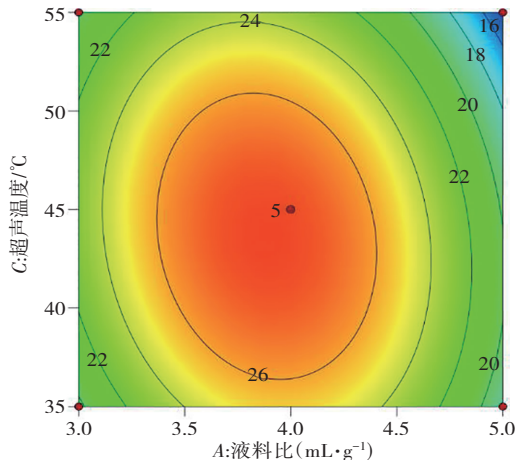
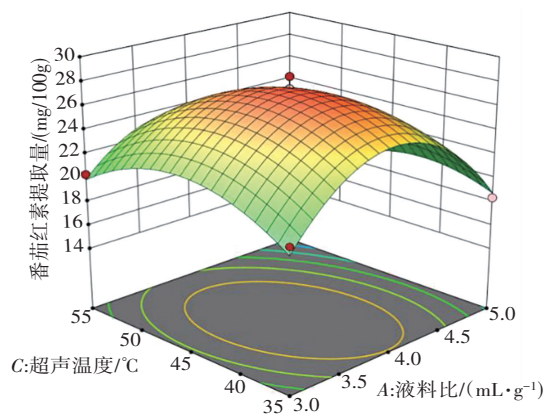
各因素对响应值的影响程度能通过响应面图反映,因素对响应值的影响越显著可以观察到该因素呈现的三维曲面陡峭程度越高;此外,等高线图可以评估两个因素间的交互作用显著性,越接近椭圆形,则显著性越强^[26]。由图 6 可以看出,坡度最陡的交互作用是 AB (料液比与超声时间),其等高线图更接近椭圆形,表明此交互项对番茄红素提取率的影响最为显著。对各交互因素影响程度的排序为: AB (料液比与超声时间) $> AC$ (料液比与超声温度) $> AD$ (料液比与超声功率) $> CD$ (超声温度与超声功率) $> BD$ (超声时间与超声功率) $> BC$ (超声时间与超声温度)。



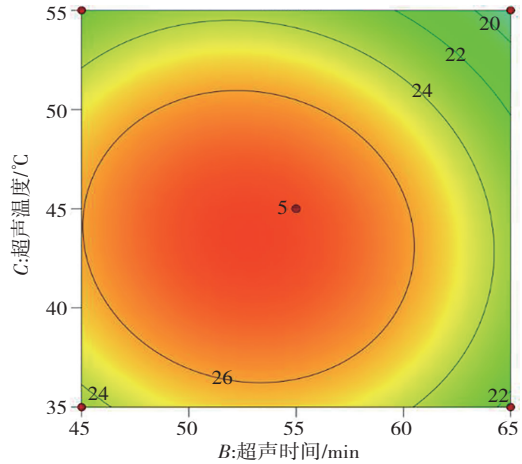
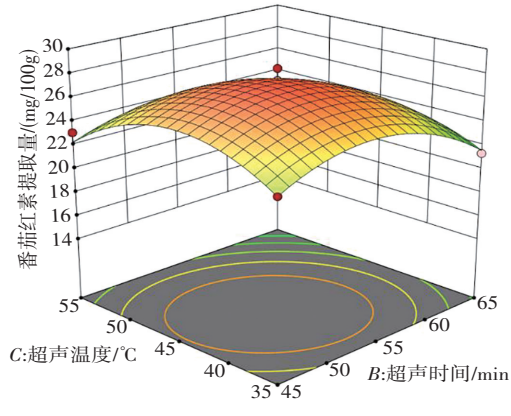
(a) 料液比与超声时间



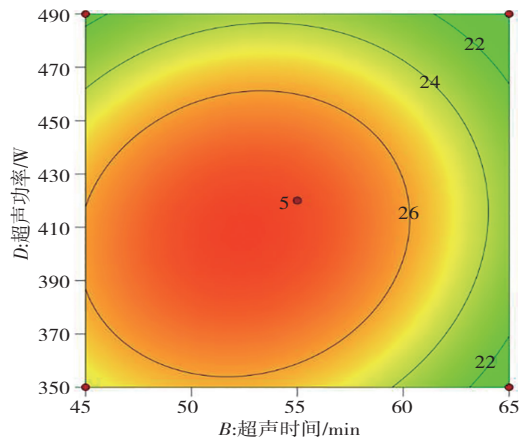
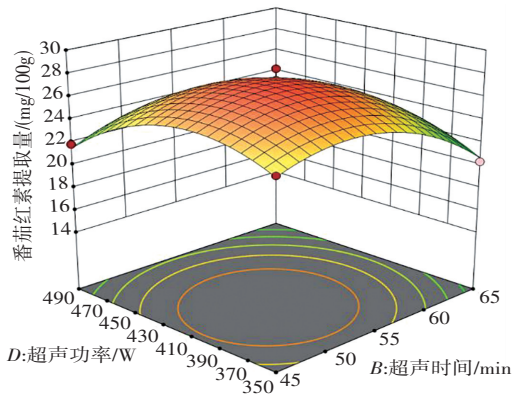
(c) 料液比与超声功率



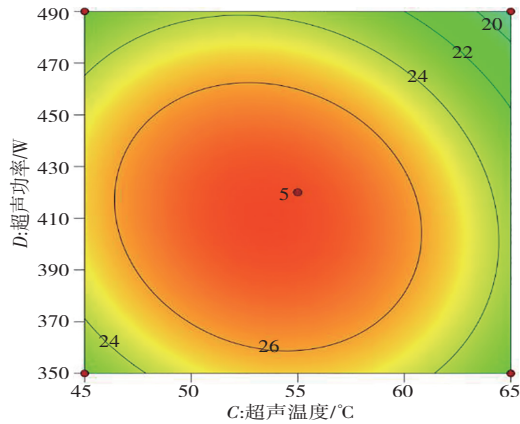
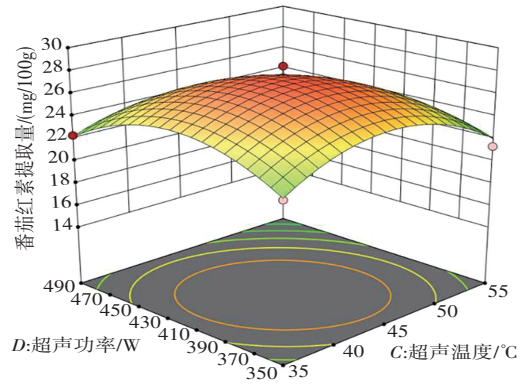
(b) 料液比与超声温度



(d) 超声时间与超声温度



(e) 超声时间与超声功率



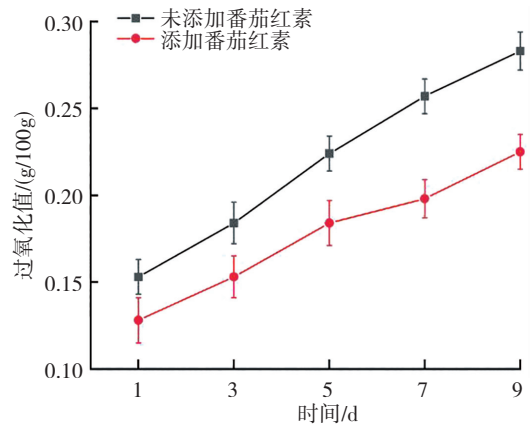
(f) 超声温度与超声功率

图 6 各因素交互作用对番茄红素提取率影响的响应面图
Fig. 6 Response surface plots of lycopene extraction rate using ultrasound-assisted sunflower seed oil

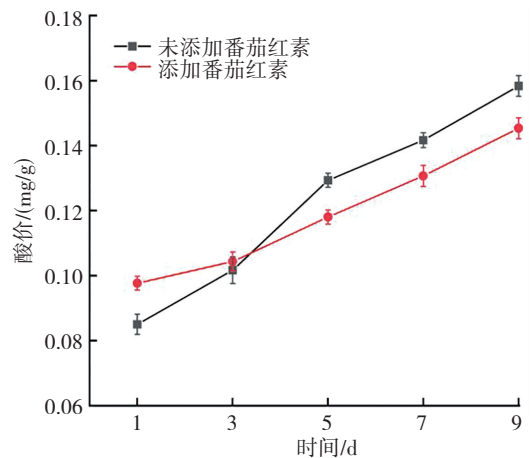
通过建立的响应面模型拟合值和线性回归方程,确定了超声辅助葵花籽油提取番茄红素的最优工艺参数为料液比 1 : 4.34 g/mL、超声功率 407.48 W、超声温度 43.19 °C、超声时间 53.33 min。在此优化工艺条件下,分析软件预测番茄红素的 $\text{最大提取率为 } 0.2652 \text{ mg/g}$ 。为验证回归方程的准确性,进行了实验验证,并根据实验结果对部分参数进行了微调。经过调整后的实验条件为料液比 1 : 4.3 g/mL、超声波输出功率 410 W、超声波温度为 43 °C、超声波持续时间设置为 53 min。在优化后的实验条件下进行了 3 次平行实验,测得平均提取率为 0.2632 mg/g ,与建立模型的预测值 0.2652 mg/g 相比,相对误差仅为 0.7%。这表明建立的回归模型具有较高的准确率和可信度,证实了该模型的有效性。

2.4 含番茄红素油脂的氧化特性检测

对比含番茄红素的葵花籽油与未添加番茄红素的葵花籽油的酸价和过氧化值,每组进行 3 组平行实验,结果如图 7 所示。



(a) 番茄红素对葵花籽油过氧化值的影响



(b) 番茄红素对葵花籽油酸价的影响

图 7 番茄红素对葵花籽油抗氧化特性的影响

Fig. 7 Effect of lycopene on antioxidant properties of sunflower seed oil

通过分析,发现番茄红素对葵花籽油具有显著的抗氧化保护作用,具体表现为较低的酸价和过氧化值。如图7(a)显示,相较于不含番茄红素的葵花籽油,含番茄红素的油脂在储存期间过氧化值的增长幅度更小,并且随着时间推移,不含番茄红素的葵花籽油的过氧化值增长更显著,这与Xie等^[27]的研究结果一致,即番茄红素由于其高度亲脂性,通过与脂质成分相互作用,展现出卓越的抗氧化活性。

图7(b)显示,与对照相比,含番茄红素的葵花籽油,第一天的酸价值较高。可能是由于超声处理过程中温度的变化以及番茄红素中的某些成分对油脂本身产生了影响,导致油脂加速氧化和酸败^[28]。然而,随着时间的推移,番茄红素的作用逐渐显现,延缓了油脂的酸败过程,从而降低了油脂的酸价。这些结果表明:番茄红素对油脂的抗氧化性能具有重要的影响,并且有望应用于优化油脂的稳定性。

3 结 论

本文研究了超声辅助响应面优化番茄红素在葵花籽油中的溶出工艺条件,得出对番茄红素提取率影响最大的因素为料液比,其次分别是超声时间、超声温度和超声功率。结合响应面优化设计方案进行实验,得出该模型的优化方案及其显著性结果。具体分析表明:该模型的 F 值为55.81, P 值小于0.0001,方程的相关系数 R^2 为0.9824,失拟度 F 值为1.57, P 值为0.3518(大于0.05),这表明模型预测值与实际值具有较好的关联度。同时,实验数据的线性关系拟合度较高。根据实验结果,确定了超声辅助葵花籽油提取番茄红素的最佳工艺条件为料液比1:4.3(g/mL)、超声功率410W、超声温度43℃、超声时间53min。结合实际情况对预测的工艺进行了适当优化,并通过验证实验,对实际值和预测值进行了比较及相对误差分析,证实了该模型的可行性和有效性。进一步对葵花籽油的酸价和过氧化值进行测定,结果表明:番茄红素不仅能有效减缓葵花籽油酸价和过氧化值的升高,且能提高葵花籽油的营养价值。

参考文献(References):

[1] 徐媛. 红葡萄柚番茄红素加工降解机制及其定量构效关系研究[D]. 武汉:华中农业大学,2013:1-29.
XU Yuan. Study on degradation mechanism and quantitative

structure-activity relationship of lycopene in red grapefruit[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013: 1-29.

[2] HERNÁNDEZ-ALMANZA A, MONTAÑEZ J, MARTÍNEZ G, et al. Lycopene: Progress in microbial production[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 56: 142-148.

[3] 田玉娟, 赵文琪, 邢竹青, 等. 番茄红素保健功效研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(5): 11-17.
TIAN Yu-juan, ZHAO Wen-qi, XING Zhu-qing, et al. Research progress on pharmacological effect of lycopene[J]. Modern Food, 2022, 28(5): 11-17.

[4] 郑晓青, 罗柔萱, 卢可欣, 等. 番茄红素的提取及功能活性研究进展[C]//广东省食品学会. 健康食品研发与产业技术创新高峰论坛暨2022年广东省食品学会年会论文集, 2023: 71-76.
ZHENG Xiao-qing, LUO Ruo-xuan, LU Ke-xin, et al. Research progress on extraction and functional activity of lycopene[C]//Guangdong Institute of Food Science and Technolog. Proceedings of the Summit Forum on Health Food R&D and Industrial Technology Innovation and the Annual Conference of Guangdong Food Society in 2022, 2023: 71-76.

[5] KARAKAYA S, YILMAZ N. Lycopene content and antioxidant activity of fresh and processed tomatoes and *in vitro* bioavailability of lycopene[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2007, 87(12): 2342-2347.

[6] CHEN X, JIA X, YANG S, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of flavonoids, polysaccharides, and eleutheriosides from *Acanthopanax senticosus* using response surface methodology in development of health wine[J]. LWT, 2022, 165: 113725.

[7] OLIVEIRA V S, RODRIGUES S, FERNANDES F A N. Effect of high power low frequency ultrasound processing on the stability of lycopene[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 586-591.

[8] ZUORRO A, FIDALEO M, LAVECCHIA R. Enzyme-assisted extraction of lycopene from tomato processing waste[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011, 49(6-7): 567-573.

[9] KUMCUOGLU S, YILMAZ T, TAVMAN S. Ultrasound assisted extraction of lycopene from tomato processing wastes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(12): 4102-4107.

[10] RAHIMI S, MIKANI M. Lycopene green ultrasound-assisted extraction using edible oil accompany with response surface methodology (RSM) optimization performance: Application in tomato processing wastes[J]. Microchemical Journal, 2019, 146: 1033-1042.

- [11] GB 5009. 229—2016 食品安全国家标准 食品中酸价的测定[S]. 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 2016.
GB 5009. 229—2016 National food safety standard-determination of acid value in foods[S]. National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, 2016.
- [12] GB 5009. 227—2023 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S]. 中华人民共和国国家卫生健康委员会; 国家市场监督管理总局, 2023.
GB 5009. 227—2023 National food safety standard-determination of peroxide value in foods[S]. National Health Commission of the People's Republic of China; State Administration for Market Regulation, 2023.
- [13] HONDA M I H Y. Vegetable oil-mediated thermal isomerization of (all-E)-lycopene: Facile and efficient production of Z-isomers[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2016, 118(10): 1588–1592.
- [14] VASAPOLLO G, LONGO L, RESCIO L, et al. Innovative supercritical CO₂ extraction of lycopene from tomato in the presence of vegetable oil as co-solvent[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2004, 29(1–2): 87–96.
- [15] YING Z, HAN X, LI J. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from mulberry leaves[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 1273–1279.
- [16] HO K K H Y, FERRUZZI M G, LICEAGA A M, et al. Microwave-assisted extraction of lycopene in tomato peels: Effect of extraction conditions on all-trans and cis-isomer yields[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 62(1): 160–168.
- [17] XU Y, PAN S. Effects of various factors of ultrasonic treatment on the extraction yield of all-trans-lycopene from red grapefruit (*Citrus paradise Macf.*)[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(4): 1026–1032.
- [18] XIA E Q, AI X X, ZANG S Y, et al. Ultrasound-assisted extraction of phillyrin from *Forsythia suspensa*[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(2): 549–552.
- [19] VILKHU K, MAWSON R, SIMONS L, et al. Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry—a review[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(2): 161–169.
- [20] CARPENTER J, SAHARAN V K. Ultrasonic assisted formation and stability of mustard oil in water nanoemulsion: Effect of process parameters and their optimization[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 35: 422–430.
- [21] ZHAO S, KWOK K C, LIANG H. Investigation on ultrasound assisted extraction of saikosaponins from *Radix Bupleuri*[J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 55(3): 307–312.
- [22] KAUR D, WANI A A, OBEROI D P S, et al. Effect of extraction conditions on lycopene extractions from tomato processing waste skin using response surface methodology[J]. *Food Chemistry*, 2008, 108(2): 711–718.
- [23] ANARJAN N. Evaluation the effects of ultrasonic parameters on simultaneously extraction and size reduction of lycopene from tomato processing waste[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11(5): 1929–1940.
- [24] NATNOI S, PIRAK T. Effect of ultrasonic-assisted extraction on the properties, antioxidant and inflammatory activities of carotenoids from gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit pericarp[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2019, 5(1): 1696512.
- [25] DZAH C S, DUAN Y, ZHANG H, et al. The effects of ultrasound assisted extraction on yield, antioxidant, anticancer and antimicrobial activity of polyphenol extracts: A review[J]. *Food Bioscience*, 2020, 35: 100547.
- [26] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2015, 34(8): 41–45.
LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2015, 34(8): 41–45.
- [27] XIE C, MA Z F, LI F, et al. Storage quality of walnut oil containing lycopene during accelerated oxidation[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(4): 1387–1395.
- [28] 熊文能. 粗糙脉孢菌产番茄红素工艺优化及在食品中抗氧化保鲜应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023: 42–49.
XIONG Wen-neng. Optimization of Lycopene Production by *Neurospora crassa* and Its Application in Antioxidant Preservation of Food[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023: 42–49.

责任编辑:陈 芳