



中国油脂

China Oils and Fats

ISSN 1003-7969, CN 61-1099/TS

《中国油脂》网络首发论文

题目：基于响应面法的牛油微波提取工艺优化研究
作者：邵一诺, ABDIRAKHMAN Dana, 林张, 黄丹, 刘重阳, 刘晓丽, 李琪, 于修烛
DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.250270
网络首发日期: 2025-07-01
引用格式: 邵一诺, ABDIRAKHMAN Dana, 林张, 黄丹, 刘重阳, 刘晓丽, 李琪, 于修烛. 基于响应面法的牛油微波提取工艺优化研究[J/OL]. 中国油脂.
<https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.250270>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于响应面法的牛油微波提取工艺优化研究

邵一诺¹, ABDIRAKHMAN Dana¹, 林 张¹, 黄 丹², 刘重阳³,
刘晓丽¹, 李 琪^{1*}, 于修烛^{1*}

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.渭南长安花粮油股份有限公司, 陕西 渭南 714026; 3.杨凌秦阳农业科技有限公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了进一步提高牛油微波提取率和优化提油工艺, 本文以牛腰部脂肪为原料, 采用微波辅助湿法提油工艺, 通过单因素和响应面优化实验考察液料比值、微波功率和提取时间对牛油提取率、最终温度、酸价的影响。研究结果表明: 最优提油工艺条件为提取时间 7.3 min、微波功率 480 W、液料比值为 0.6 mL/g (水体积与牛脂肪质量比), 在该条件下, 牛油提取率达 91.72%, 最终温度 98.32°C, 酸价 0.51 mg/g。相较于传统熬炼法、溶剂法和酶解法, 微波辅助湿法提取时间缩短超 94%以上, 牛油氧化程度最低, 感官评分最优, 综合效率与品质优势突出, 提取的牛油各项理化指标符合相关国家标准要求, 表明牛油微波提取优化工艺是可行的。

关键词: 牛油, 提取; 微波辅助; 响应面优化; 工艺优化

DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.250270

Microwave extraction process optimization and quality analysis of beef tallow based on response surface method

SHAO Yinuo¹, ABDIRAKHMAN Dana¹, LIN Zhang¹, HUANG Dan²,
LIU Chongyang³, LIU Xiaoli¹, LI Qi^{1*}, YU Xiuzhu^{1*}

(1. Food Science and Engineering College, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;
2. Weinan Chang'an Grain and Oil Co., Ltd., Weinan 714026, China; 3. Yangling Qinyang
Agricultural Technology Co., Ltd., Yangling 712100, China)

Abstract: To further improve the extraction efficiency of beef tallow via microwave - assisted technology and optimize the oil - extraction process, this research utilized bovine lumbar fat as the raw material and adopted a microwave - assisted wet - extraction approach. Through single - factor experiments and response surface methodology (RSM) optimization, the effects of the liquid - to - solid ratio (volume of water to mass of bovine fat, mL/g), microwave power, and extraction time on the extraction rate, average temperature, and acid value of beef tallow were systematically investigated. The results revealed that the optimal extraction conditions were determined as follows: an extraction time of 7.3 min, a microwave power of 480 watts, and a liquid - to - solid ratio of 0.6 mL/g. Under these optimal conditions, the extraction rate of beef tallow reached 91.72%, with a

基金名称: 陕西省“科学家+工程师”队伍项目(2024QCY-KXJ-079); 陕西省科技创新团队项目(2024RS-CXTD-70)

作者简介: 邵一诺(2004-), 女, 本科在读, 专业方向为食品质量与安全(E-mail) 375972837@qq.com。

通信作者: 李琪, 副教授, 博士, (E-mail) qili@nwafu.edu.cn; 于修烛, 教授, 博士, (E-mail) xiuzhuyu@nwafu.edu.cn。

final temperature of 98.32°C and an acid value of 0.51 mg/g. In comparison with traditional rendering methods, solvent - extraction methods, and enzymatic hydrolysis methods, the microwave - assisted wet - extraction method exhibited a significantly shortened extraction time (reduced by more than 94%). Additionally, it showed the lowest degree of beef tallow oxidation, the highest sensory score, and remarkable comprehensive advantages in terms of efficiency and quality. All physical and chemical properties of the extracted beef tallow complied with the requirements of relevant national standards, thereby verifying the feasibility of the optimized microwave - assisted extraction process for beef tallow.

Key words: Beef tallow extraction; Microwave; Response surface optimization; Process optimization

牛油是肉牛屠宰后将脂肪分离,经过去杂、熬炼、脱胶、脱酸、脱色和脱臭等一系列精炼工艺制成的固态油脂,因其良好的氧化稳定性和独特风味,被广泛应用于食品工业,如火锅底料、起酥油、烹饪油等^[1]。目前,牛油提取以熬炼法(湿法和干法)、压榨法、溶剂提取法和酶解法为主,熬炼法是传统的提取方法,通过加热使牛脂肪组织中的油脂分离,优点是操作简单,但高温易导致油品品质下降,且效率较低^[2]。压榨法通过机械外力挤压油脂,具有工艺简单、营养高保留等优点,但残油率高、动力消耗大^[3]。溶剂提取法利用有机溶剂萃取油脂,提取率高、操作简单,但存在溶剂残留风险。酶解法通过酶作用破坏脂肪组织结构,从而释放油脂,具有反应条件温和、环保和油脂品质好等优点,但也存在提取率不高、成本高等缺点^[4]。基于提取率、环保、成本等因素考虑,湿法熬炼和微波提取牛油得到广泛关注^[5-6]。刘义军等在对比试验中发现湿法能有效分离牛油,操作相对简单,但提取效率低^[7]。而微波提取牛油利用微波快速加热和解冻的特性,既能显著提高提取效率,又能有效保持牛油的风味和品质^[8],因此二者结合提取可优势互补。常见的试验优化方法有全面试验法、响应面法和正交设计法。全面试验法能够全面考察各因素及交互作用对结果的影响,确保不遗漏任何可能组合,但因素和水平较多时,试验次数过多,难以实现。正交设计法通过挑选代表组合减少试验次数,但并不能完全了解整体因素的交互作用,具有一定局限性。相比之下,响应面法可以进行多项拟合,减少试验次数的同时,以响应面模型方式更直观地观察多因素与提取率的交互关系^[9]。综合考虑以上方法的优缺点,本文采用微波辅助湿法提取牛油,以单因素分析为基础,采用响应面法对牛油提取工艺进行优化,以获得高品质牛油,以期为高品质牛油的高效提取提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料与试剂

新鲜牛腰部脂肪,购于陕西省杨凌示范区农贸市场;中性蛋白酶(100 U/mg),上海源叶生物科技有限公司;正己烷、氢氧化钠、乙醇、三氯甲烷、冰乙酸、氢氧化钾、硫代硫酸钠,分析纯,购于广东光华科技股份有限公司;正己烷、甲醇、氢氧化钠、三氟化硼,色谱纯,购于天津化学试剂有限公司;脱脂棉纱布,山东曹县华鑫卫生材料有限公司。

1.1.2 仪器

PM201 微波炉,广东美的厨房电器制造有限公司;JR-06 绞肉机(刀片厚度 1.5 mm),广东德玛仕智能厨房设备有限公司;98-1-B 电子调温加热套,天津泰斯特仪器有限公司;JJ-1 精密增力电动搅拌器,常州国华电器有限公司;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,上海力辰邦西仪器科技有限公司;H1750R 高速离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;电热恒温干燥箱,绍兴尚城仪器制造有限公司;GCMS-QP2010 三重四级杆气相色谱质谱联

用仪，日本岛津公司。

1.2 牛油提取工艺

选取 100 (±1) g 新鲜的牛腰部脂肪，粉碎后用纱布包裹放入烧杯中，调整液料比值（水体积与牛脂肪质量比，mL/g）、微波功率和提取时间，微波处理后测量温度、分离油渣和油样并称重收集。再次反复微波处理并挤压油渣至无油脂流出，直至油渣为恒重，认为牛脂肪被完全提取，油渣为牛脂肪中非脂肪成分的总重量，按式（1）计算提取率，并进行最终温度和理化指标的测定。

$$\text{提取率} = \frac{100 - m_1}{100 - m_2} \times 100\% \tag{1}$$

式中：
m₁ 为微波后油渣质量，g
m₂ 为牛脂肪中非脂肪成分的总重量，g

1.3 单因素试验研究

1.3.1 提取时间对提取的影响

称取牛脂肪 100.0 g，按照液料比值 0.8 mL/g 加入蒸馏水，控制微波功率为 480 W，测定提取时间为 2、5、8、11、14 min 时的牛油提取率、最终温度和酸价。

1.3.2 微波功率对提取的影响

称取牛脂肪 100.0 g，按照液料比值 0.8 mL/g 加入蒸馏水，设置提取时间 8 min，测定微波功率 160、320、480、640、800 W 时的牛油提取率、最终温度和酸价。

1.3.3 液料比值对提取的影响

称取牛脂肪 100.0 g，设置微波功率 480 W，提取时间 8 min，测定液料比值 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL/g 时的牛油提取率、最终温度和酸价。

1.4 响应面试验设计

在单因素试验基础上，进行 Box-behnken 设计响应面试验。基于单因素试验结果，分别考察提取时间、微波功率、液料比值对于提取率、最终温度、酸价的影响，响应面试验设计因素水平见表 1。

表 1 响应面试验设计因素水平表

水平	X ₁ 提取时间 (min)	X ₂ 微波功率 (W)	X ₃ 液料比值 (mL/g)
-1	2	160	0.6
0	5	320	0.8
1	8	480	1.0

1.5 牛油不同提取工艺

1.5.1 熬炼法牛油提取

以 100.0 g 粉碎牛脂肪颗粒为原料，参照 Vechtomova 等的方法并进行一定修改^[10]。

干法：以圆底烧瓶搭配加热套为容器，在 150~200℃下加热搅拌 90~120 min，至物料呈液态油与固态渣两相分离为终点，趁热置于离心机（3000 r/min，10 min）分离，得到油样。

湿法：将水与粉碎牛脂肪颗粒按质量比 1:2 混合投入圆底烧瓶，控制温度 70~98℃加热 60~90 min，以体系分层为终点，趁热置于离心机（5000 r/min，15 min）分离，得到油样。

1.5.2 溶剂萃取法牛油提取

以 100.0 g 粉碎牛脂肪颗粒为原料，参照 Gao 等的方法并进行一定修改^[11]。萃取条件：以正己烷为溶剂、浸提温度 60℃、浸提时间 6 h、料液比 1: 10 g/mL，萃取结束后通过氮吹处理获得油样。

1.5.3 酶解法提取牛油

以 100.0 g 牛脂肪为原料，参照孙龙珠等的方法并进行一定修改^[12]。为保证脂肪酶靶向作用于脂肪细胞膜，酶解法原料使用将牛脂肪去除筋膜和结缔组织后切成约 0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm 的小块，加入 2 g 中性蛋白酶和 200 mL 水，搅拌后密封，55℃恒温水浴 2 h，80℃灭酶 10 min，以 8000 r/min 离心 15 min，上层油脂即为提取的油样。

1.6 牛油的理化指标测定

参照 GB 5009.229-2016 热乙醇指示剂滴定法测量酸价；参照 GB 5009.227-2023 滴定法测量过氧化值；参考硫代巴比妥酸比色法测量丙二醛；参照 GB 5009.236-2016 电热干燥箱法测量水分及挥发物。

1.7 牛油的脂肪酸组成的测定

样品甲酯化分析：参考国标 GB 5009.168-2016 并作一定修改，先预热烘箱至 90~100℃，取 0.1 g 样品置于 15 mL 离心管，加入 2%氢氧化钠-甲醇溶液，涡旋 1 min 后在 90℃烘箱中放置 15 min，接着加入 2 mL 冰箱保存的 14%三氟化硼溶液，于在 90℃烘箱放置 15 min 并适当涡旋，之后加入 2 mL 正己烷涡旋 30 s，加入 1 mL 饱和食盐水涡旋 30 s，以 2000 r/min 离心 5 min，吸出上清液通过 1 mL 枪头装的无水硫酸钠柱，用正己烷稀释 10 倍，过滤膜后装小瓶后进样分析。

气相色谱条件：色谱柱：FFAP 弹性石英毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm×0.3 μm）；程序升温：初始温度 50℃保持 5 min，以 10℃/min 速率升至 230℃后保持 20 min；检测器温度 270℃；进样器温度 250℃。

数据分析：结合国标 GB5009.168-2016 附录及公式确定样品中的脂肪酸组成及含量。

1.8 牛油的感官评定

参考 GB/T 16291.1-2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则 第 1 部分：优选评价员》挑选来自西北农林科技大学食品科学与工程学院的 10 名女性 10 名男性组建感官小组，参评人员经色觉、嗅觉及味觉基础测试初筛合格后，接受为期两周的系统培训（含牛油理化特性解析、感官指标识别及评价标准应用），培训合格者通过标准品盲测一致性考核后参与正式实验。所有参与者均签署知情同意书，明确知晓实验目的及权益保障措施。参照 GB 10146-2015《食品安全国家标准 食用动物油脂》中感官评价要求，结合牛油特性进行适应性修改。评定过程在无气味的感官分析室内开展，采用总分 40 分制进行量化评分，评分标准见表 2。

表 2 感官评分标准

指标	标准	评分
色泽（1~10）	白色、淡黄色，无霉斑	8~10
	深黄色，无霉斑	4~7
	棕黄色，无霉斑	1~3
气味（1~10）	无溶剂味、酸败味、焦糊味	8~10
	无酸败味，有溶剂味、焦糊味	4~7
	有溶剂味、酸败味、焦糊味	1~3
状态（1~10）	无浑浊、悬浮物	8~10
	轻微浑浊或悬浮物	4~7
	明显浑浊、悬浮物	1~3
口感（1~10）	无苦涩味、哈喇味	8~10
	有苦涩味或哈喇味	4~7
	有苦涩味和哈喇味	1~3

1.9 数据统计与分析

所有试验组重复 3 次，结果表示为三次重复的平均值及标准差。使用 Excel 2010 整理单因素试验结果，采用 SPSS Statistics 27 软件进行统计分析，使用 Origin 2024 软件作图。响应面试验设计及结果使用 Design-Expert V8.0.6 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果分析

2.1.1 提取时间对提取效果的影响

在微波功率 480 W、液料比值 0.8 mL/g 条件下，分别设置微波提取时间为 2、5、8、11、14 min，分析提取率、温度和酸价，其结果见图 1。

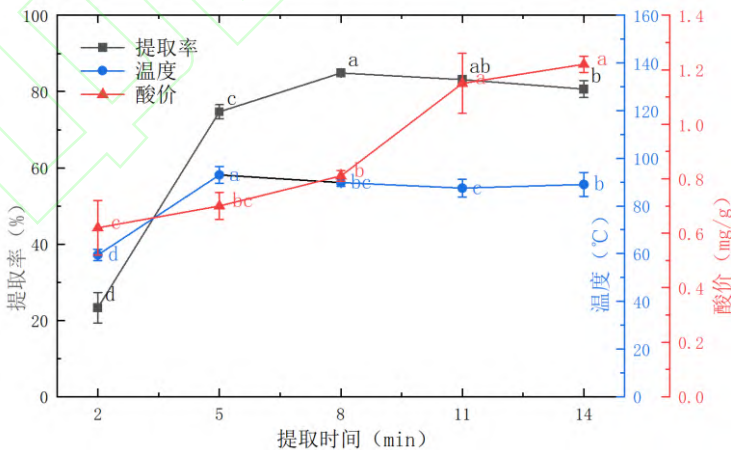


图 1 提取时间对提取影响

注：图中同一指标曲线上不同字母表示实验结果间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

由图 1 可以看出，随着提取时间增加，牛油提取率在 8 min 时达到峰值后下降，温度在 5 min 时达到峰值后下降，酸价整体呈上升趋势。提取率的变化可能是由于短时间内，随时间的延长油脂充分溶出，提取更为彻底，但提取时间 8 min 之后，微波振荡引起的油与水的混合加剧，使油脂的乳化程度加大，导致油脂与水分离困难，使油脂的提取率有所

下降^[13-14]。温度和酸价不断上升的原因可能是微波热效应随着时间增加不断累计，油脂在微波作用下发生一定程度的水解和氧化反应。观察到在提取时间 8 min 时三因素均出现明显转折，提取率上升最大值后下降，温度缓慢下降，酸价持续上升，由此推断提取率达最大值、温度保持在 100℃左右、酸价较低的最佳提取时间在 2~8 min 范围，由此，确定 2、5、8 min 进行响应面试验。

2.1.2 微波功率对提取效果的影响

在液料比值为0.8 mL/g、提取时间8 min条件下，分别设置微波功率160、320、480、640、800 W，分析提取率、温度、酸价，其结果如图2所示。

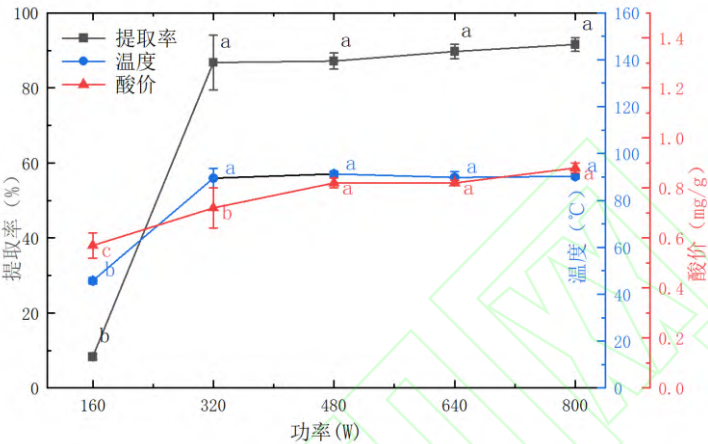


图 2 微波功率对提取的影响

由图 2 可知，随着微波功率增大，牛油提取率、温度、酸价均不断上升。原因可能是在同样的提取时间下，微波功率越大，料液系统温度上升越快，牛油最终温度就越高，水分蒸发越快，同时相应地提高了提取效率，这与 Camel 等关于固体基质萃取技术的研究结果相一致^[13]。观察到提取率、温度在微波功率 160~320 W 范围急剧上升后变化。由此推断提取率达最大值、温度保持在 100℃左右、酸价较低的微波功率在范围 160~480 W，因此，选择 160、320、480 W 进行响应面试验。

2.1.3 液料比值对提取效果的影响

在微波功率 480 W、提取时间 8 min 条件下，取牛脂肪 100.0 g，分别按照液料比值为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL/g 加入蒸馏水，分析牛油提取率、温度、酸价，其结果见图 3。

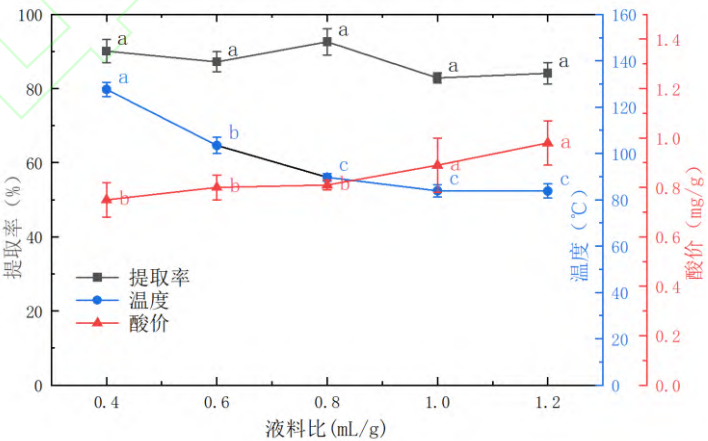


图 3 液料比值对提取的影响

由图 3 可以看出，随着液料比值增加，牛油提取率整体先下降后上升，温度总体呈现下降趋势，酸价总体呈现上升趋势。根据王晨曦等和 Sara 等关于微波提取工艺的研究，提取

率的变化可能是由于水解作用及水和物料相互作用^[14-15]，水用量较少时，牛腰部脂肪中的水溶性物质、蛋白质、矿物质等成分溶解到水里，导致提取率下降；水用量增加，由于水和物料相互作用变强，加速脂肪溶解，提取率上升。温度的下降可能是由于水用量的增加更多的分散、吸收热量，酸价的缓慢上升原因在于油脂在微波过程中，不同料液比导致体系温度不同而发生不同程度的水解和氧化反应。观察到在液料比值 0.8 mL/g 左右，三因素均出现明显转折，同时对比液料比值为 1.0、1.2 mL/g 时，牛油提取率、温度变化不大、酸价增加，考虑到酸价过高不利于提取牛油的进一步精制，因此，料液比值选择 0.6、0.8、1.0 mL/g 进行响应面试验研究。

2.2 响应面法优化结果

2.2.1 响应面试验设计及结果分析

基于单因素试验结果，分别考察提取时间、微波功率、液料比值对提取率、最终温度、酸价的影响，使用 Design-Expert V8.0.6 软件进行试验设计，对牛油提取进行工艺优化。响应面设计与结果见表 3。

表 3 响应面试验设计及结果

序号	X_1 提取时间 (min)	X_2 微波功率 (W)	X_3 液料比值 (mL/g)	Y_1 提取率 (%)	Y_2 最终温度 (°C)	Y_3 酸价 (mg/g)
1	0 (5.0)	0 (320)	0 (0.8)	79.91	87.15	0.66
2	1 (8.0)	1 (480)	0	93.52	102.00	0.68
3	0	-1 (160)	1 (1.0)	74.13	31.53	0.25
4	-1 (2.0)	0	-1 (0.6)	66.35	61.40	0.38
5	0	0	0	80.86	88.90	0.67
6	0	1	1	75.91	48.00	0.65
7	1	-1	0	71.62	71.72	0.48
8	-1	-1	0	77.32	30.30	0.12
9	0	0	0	78.36	91.45	0.72
10	0	-1	-1	74.50	49.32	0.18
11	-1	0	1	86.88	50.00	0.60
12	1	0	-1	85.24	81.25	0.55
13	0	0	0	83.31	92.33	0.70
14	0	0	0	79.24	96.57	0.74
15	0	1	-1	87.92	86.68	0.49
16	-1	1	0	81.73	37.42	0.92
17	1	0	1	91.55	61.36	0.73

利用软件Design-Expert 13对表3数据进行回归分析，得到关于牛油提取率（ Y_1 ）的回归方程： $Y_1=80.18+5.89 \times X_1+5.19 \times X_2-3.1 \times X_3+4.37 \times X_1X_2-3.56 \times X_1X_3-2.91 \times X_2X_3+2.53 \times X_1^2-1.86 \times X_2^2+9.81 \times X_1^2X_3-4.37 \times X_1X_2^2$

关于最终温度（ Y_2 ）的回归方程： $Y_2=91.28+7.8 \times X_1+11.4 \times X_2-10.97 \times X_3+5.79 \times X_1X_2-5.22 \times X_2X_3-10.65 \times X_1^2-20.27 \times X_2^2-17.13 \times X_3^2+18.7 \times X_1X_2^2$

关于酸价（ Y_3 ）的回归方程： $Y_3=0.698+0.525 \times X_1+0.2138 \times X_2+0.0788 \times X_3-0.15 \times X_1X_2-0.01 \times X_1X_3+0.0225 \times X_2X_3+0.0122 \times X_1^2-0.1602 \times X_2^2-0.1452 \times X_3^2$

对回归方程进行方差分析，结果见表4-1、表4-2和表4-3。

表 4-1 牛油提取率 (Y_1) 的回归模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	782.29	10	78.23	15.41	0.0016	**
X_1 -提取时间	138.77	1	138.77	27.34	0.0020	**
X_2 -功率	215.39	1	215.39	42.44	0.0006	**
X_3 -液料比值	38.32	1	38.32	7.55	0.0334	*
X_1X_2	76.48	1	76.48	15.07	0.0082	**
X_1X_3	50.55	1	50.55	9.96	0.0197	**
X_2X_3	33.87	1	33.87	6.67	0.0416	*
X_1^2	27.04	1	27.04	5.33	0.0604	
X_2^2	14.60	1	14.60	2.88	0.1408	
$X_1^2X_3$	192.28	1	192.28	37.89	0.0008	**
$X_1X_2^2$	38.15	1	38.15	7.52	0.0337	*
残差	30.45	6	5.07			
失拟项	16.04	2	8.02	2.23	0.2239	
纯误差	14.41	4	3.60			
总离差	812.74	16				

注：表中“***”为差异极显著 ($P<0.01$) ; “**”为差异显著 ($P<0.05$) , 下同。

表 4-2 最终温度 (Y_2) 的回归模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	9112.58	9	1012.51	38.76	< 0.0001	**
X_1 -提取时间	243.52	1	243.52	9.32	0.0185	*
X_2 -功率	1040.36	1	1040.36	39.83	0.0004	**
X_3 -液料比值	962.73	1	962.73	36.86	0.0005	**
X_1X_2	134.10	1	134.10	5.13	0.0578	
X_2X_3	109.10	1	109.10	4.18	0.0803	
X_1^2	477.57	1	477.57	18.28	0.0037	**
X_2^2	1729.99	1	1729.99	66.23	< 0.0001	**
X_3^2	1235.16	1	1235.16	47.28	0.0002	**
$X_1X_2^2$	699.19	1	699.19	26.77	0.0013	**
残差	182.85	7	26.12			
失拟项	131.02	3	43.67	3.37	0.1356	
纯误差	51.84	4	12.96			
总离差	9295.43	16				

表 4-3 酸价 (Y_3) 的回归模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.7375	9	0.0819	25.32	0.0002	**
X_1 -提取时间	0.0221	1	0.0221	6.81	0.0349	*
X_2 -功率	0.3655	1	0.3655	112.94	< 0.0001	**
X_3 -液料比值	0.0496	1	0.0496	15.33	0.0058	**
X_1X_2	0.0900	1	0.0900	27.81	0.0012	**

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
X_1X_3	0.0004	1	0.0004	0.1236	0.7355	
X_2X_3	0.0020	1	0.0020	0.6257	0.4549	
X_1^2	0.0006	1	0.0006	0.1952	0.6719	
X_2^2	0.1081	1	0.1081	33.41	0.0007	**
X_3^2	0.0888	1	0.0888	27.45	0.0012	**
残差	0.0227	7	0.0032			
失拟项	0.0182	3	0.0061	5.41	0.0683	
纯误差	0.0045	4	0.0011			
总离差	0.7602	16				

由表 4-1、表 4-2 和表 4-3 可知，各模型均极显著 ($P<0.01$)，即各因素对各响应值有显著影响。失拟项均不具显著性 ($P>0.05$)，说明模型对实验数据的拟合效果好，模型残差均来自于随机误差。同时，拟合模型的决定系数 R^2 分别为 0.9625、0.9803、0.9702，表明模型试验值与模型预测值关系密切，进一步验证模型可靠性。

通过对各因素系数和显著性水平分析，可明确各因素对响应值的影响程度。由表 4-1 可知，对于牛油提取率的影响因素排序为：功率>提取时间>液料比值，这可能是由于在微波辅助湿法提油过程中，水分主要作为介质促进热量传递，其用量在合理范围内对油脂溶出的直接影响不如时间和功率显著。交互项中， X_1X_2 （时间×功率）作用极显著 ($P<0.01$)， X_1X_3 （时间×液料比值）作用接近极显著 ($P=0.0197$)，说明延长提取时间需匹配适当功率和水量以避免体系乳化^[4]。

由表 4-2 可以看出，对于最终温度，时间影响显著，功率和液料比值影响极显著，时间越长、功率越高，体系升温越快，这与微波加热的能量累积特性直接相关。且方程中液料比值对温度的影响表现为负相关，即水用量增加稀释热量，导致温度下降，这与单因素试验中液料比值升高时温度总体呈下降趋势的现象相吻合。此外，二次项 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 均显著 ($P<0.01$)，说明温度与各因素之间并非简单的线性关系，存在最优作用区间。

由表 4-3 可知，微波功率对酸价的影响极显著 ($P<0.0001$)，是导致油脂水解和氧化的主要因素，功率过高会加剧热效应，促使过氧化反应和游离脂肪酸生成。液料比值的影响也极显著 ($P=0.0058$)，水用量增加虽能抑制局部过热，但过量水分可能延长体系湿热环境，间接促进酸败。提取时间的影响显著 ($P=0.0349$)，随着时间延长，酸价呈上升趋势，反映出长时间加热对油脂品质的负面影响。交互项 X_1X_2 （时间×功率）极显著 ($P=0.0012$)，表明高功率长时间处理会协同加剧酸价升高，实际工艺中需避免二者同时处于高水平。

2.2.2 响应面图直观分析

根据回归方程作出响应面和等高线，考察拟合响应曲面的形状分析液料比值、微波功率、提取时间对提取率、酸价的影响，如图 4-1、图 4-2、图 4-3、图 4-4 所示。

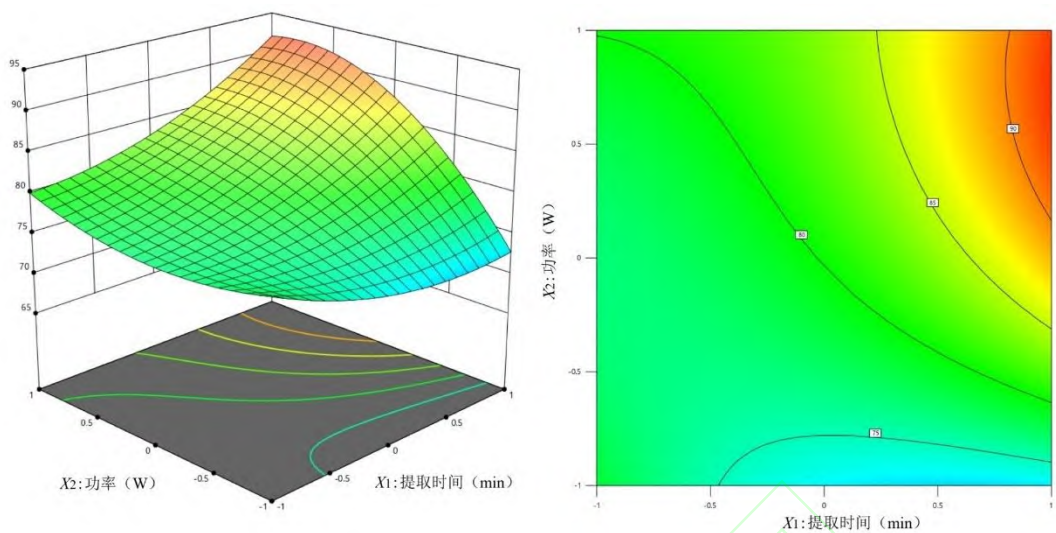


图 4-1 提取时间和微波功率对提取率交互影响的曲面图和等高线图

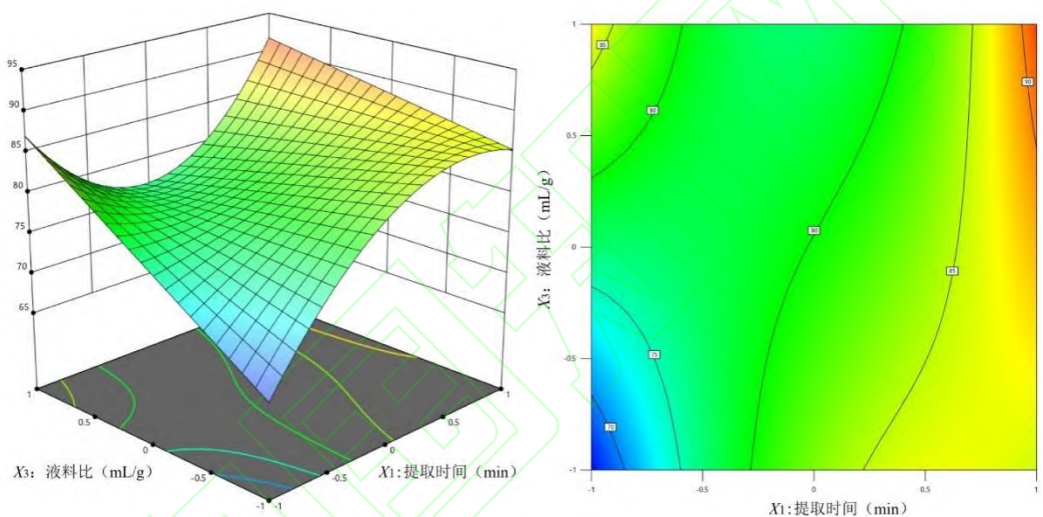


图 4-2 提取时间和液料比值对于提取率交互影响的曲面图和等高线图

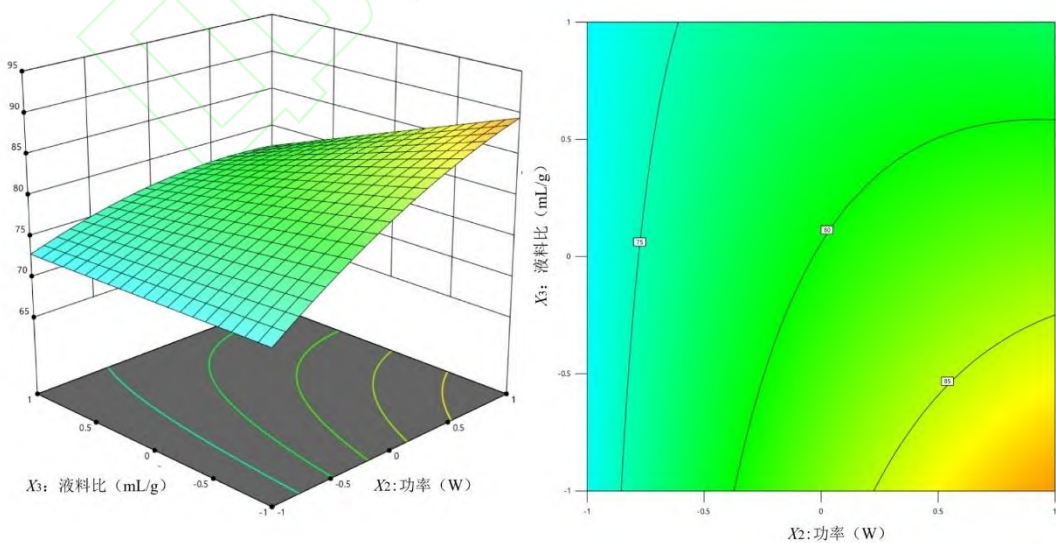


图 4-3 液料比值和微波功率对提取率交互影响的曲面图和等高线图

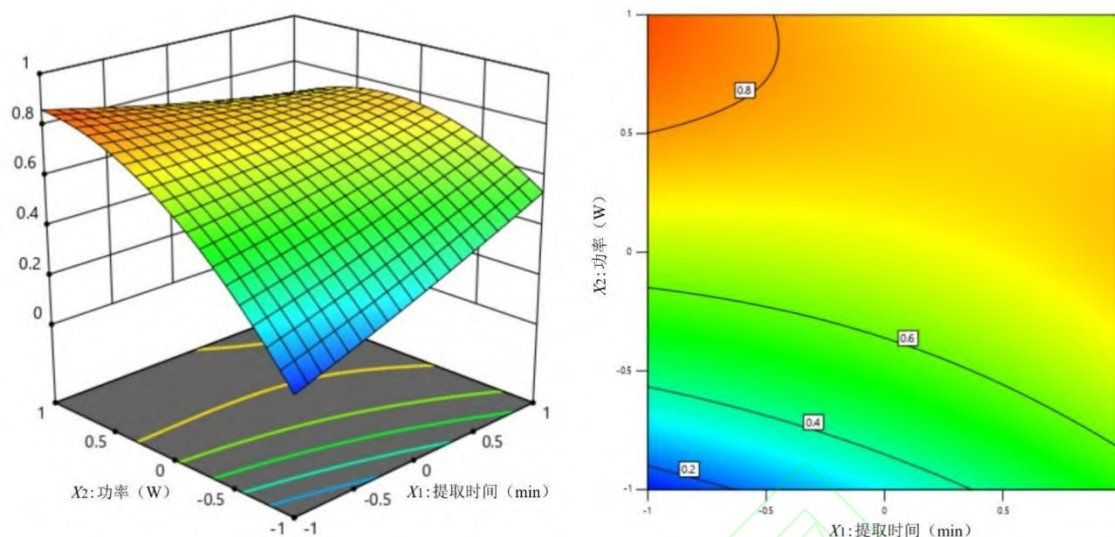


图 4-4 提取时间和微波功率对于酸价交互影响的三位曲面图和等高线图

由图 4-1、图 4-4 可知，提取时间的增加显著提高了提取率，但过长时间导致提取率下降；微波功率的提高促进了提取率的提升，但过高的功率导致体系乳化，反而降低了提取效率。同时，酸价随提取时间和微波功率的增加而持续上升，这可能是由于二者协同作用导致体系温度上升而发生更程度的水解和氧化反应。等高线图呈现椭圆形状，表明两者交互作用显著，存在一个最佳组合点使提取率达到最大值，酸价达到最小值。

由图 4-2、图 4-3 可知，对于牛油提取率的影响因素排序为：功率>提取时间>液料比值，在液料比值较低的情况下，随着时间增加，提取率先上升后下降，液料比值较高情况下，随着时间增加，提取率先下降后上升。由此可推断提取率达最大值的组合点位于提取时间较高、液料比值偏低处。

2.3 验证试验

结合响应面分析结果，最优工艺需平衡提取率与温度，时间过长虽提高提取率，但温度超 100℃会引发油脂氧化^[1]，且参照 GB10146 - 2015《食品安全国家标准食用动物油脂》，提取油脂酸价应符合一级油脂食用标准，故优化提取条件为 7.3min、480.0 W、0.6 mL/g。该条件下，提取率达 92.48%，最终温度 99.87℃、酸价 0.445 mg/g。在此条件下进行 3 次验证实验，得到提取率达到 91.72%，最终温度 98.32℃，酸价 0.51 mg/g，表明响应面模型较可靠，具有实际应用价值。

2.4 提取牛油理化性质测定结果

参照 GB 5009.229-2016、GB 5009.227-2023 分别对提取牛油的酸价和过氧化值进行测定，参考硫代巴比妥酸比色法对提取牛油的丙二醛进行滴定，参照 GB 5009.236-2016 测量水分及挥发物含量结果见表 5。

表 5 提取牛油理化性质测定结果

理化指标	结果	国标要求
酸价 (mg/g)	0.51±0.03	≤2.50
过氧化值 (g/100g)	0.05±0.00	≤0.20
丙二醛 (μmol/g)	0.28±0.02	≤0.25
水分及挥发物 (%)	1.28±0.03	-

由表 5 可知，参照 GB 10146 2015《食品安全国家标准 食用动物油脂》，提取油脂酸价

符合一级油脂食用标准，风味良好。

2.5 不同工艺提取牛油脂肪酸组成

对不同工艺提取牛油样品进行脂肪酸测定，得到脂肪酸组成如图 5。

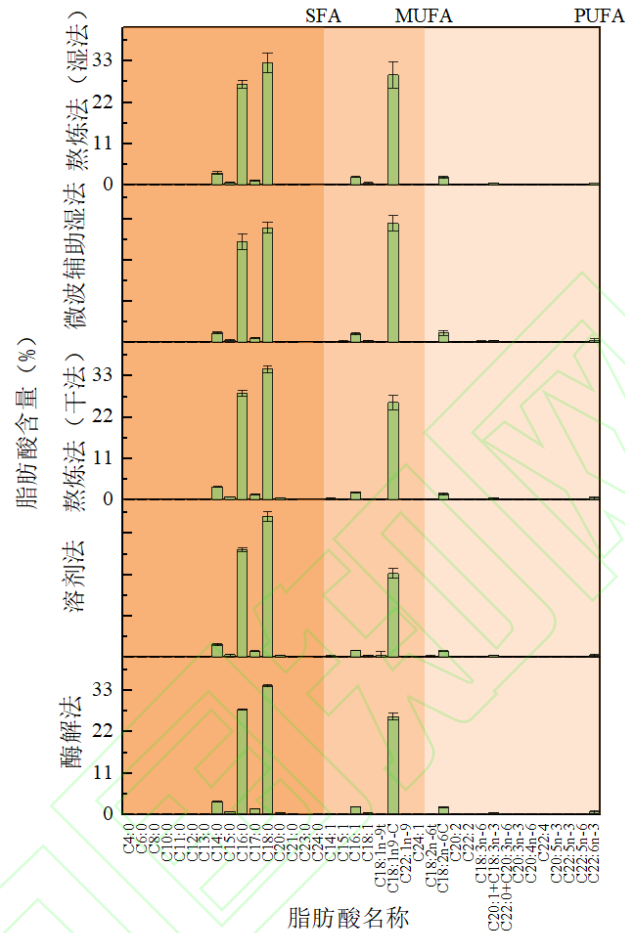


图 5 不同工艺提取牛油脂肪酸组成

注：其中，SFA 为饱和脂肪酸，MUFA 为单不饱和脂肪酸，PUFA 为多不饱和脂肪酸。

由图 5 可知，提取方法对脂肪酸组成有显著影响。酶解法与溶剂法的饱和脂肪酸(SFA)占比分别为 67.88% 和 72.08%，其中硬脂酸和棕榈酸占主导地位。溶剂法硬脂酸含量明显高于其他工艺，这赋予油脂高熔点(>50℃)和强抗氧化性，使其适用于煎炸等高温烹饪的场景。然而，长期摄入高 SFA 油脂可能提升低密度脂蛋白胆固醇水平，增加心血管疾病风险^[16]。相比之下，微波辅助湿法的 SFA 占比最低(62.02%)，硬脂酸和棕榈酸含量明显低于溶剂法，表明微波处理通过调控脂质分子排列减少饱和脂肪酸富集，更适合开发低温流动性产品(如沙拉酱基料)。在单不饱和脂肪酸(MUFA)方面，微波辅助湿法的 MUFA 占比最高，其中油酸作为油核心成分，可通过激活脂蛋白脂肪酶活性降低血清甘油三酯水平，同时抑制动脉粥样硬化斑块形成^[17]。其高保留率可能与微波的快速均匀加热特性有关，减少不饱和脂肪酸的热氧化损失^[18]。所有工艺的多不饱和脂肪酸(PUFA)总占比均在 3%左右，亚油酸与 α -亚麻酸仅在酶解法和传统湿法中检出，但总量远低于世界卫生组织推荐的 ω -6/ ω -3 比例(4:1~10:1)。为满足必需脂肪酸需求，需复配亚麻籽油(α -亚麻酸>50%)或鱼油(EPA/DHA 含量高)。值得注意的是，酶解法中检出微量反式亚油酸(0.18%)，原因可能是亚油酸双键发生异构化^[19]。

综合来看，微波辅助湿法表现最佳，兼具低 SFA、高 MUFA 和零反式脂肪酸的优点，相对接近健康油脂标准（MUFA>35%），是功能性调和油基料的理想选择^[20]。

2.6 不同工艺提取牛油品质比较

从氧化程度、游离脂肪酸含量等维度量化分析各工艺所得牛油质量差异，选出优质提取工艺，对响应面优化提取牛油与其他提取方法得到的油脂产品的理化指标、提取率进行对比分析，结果见表 6。

表 6 不同工艺提取牛油品质比较

提取方法	酸价 (mg/g)	过氧化值 (g/100g)	温度 (°C)	提取率 (%)
熬炼法（干法）	1.48±0.03 ^a	0.15±0.02 ^a	159.37±0.97 ^b	96.66±0.66 ^a
熬炼法（湿法）	0.77±0.08 ^c	0.06±0.02 ^c	97.26±0.99 ^c	92.77±0.61 ^b
溶剂提取法	1.33±0.02 ^b	0.13±0.02 ^b	67.73±0.71 ^b	94.42±0.50 ^d
酶解法	1.36±0.11 ^d	0.19±0.02 ^b	78.59±0.60 ^a	82.73±0.51 ^c
微波辅助湿法	0.51±0.03 ^c	0.05±0.00 ^d	98.32±1.22 ^c	91.72±0.84 ^b

注：试验结果以平均值±标准差表示，同一列不同字母差异显著（ $P<0.05$ ）。

由表 6 可知，微波辅助湿法提取牛油在酸价和理化指标 结果过氧化值均显著优于其他方法，表明该工艺有效减少油脂氧化，最大程度保留油脂天然品质。温度较干法大幅降低，有助于保护油脂中的热敏性成分，避免高温对油脂的不良影响，更有利于下一步精炼处理。尽管其提取率略低于熬炼法和溶剂法，但显著高于酶解法，结合提取时间来看，微波辅助湿法仅需 7.3 min，其余方法用时均超过 2 h（传统熬炼法需 1.5~2 h，酶解法约 2.5 h，溶剂法约 6 h），综合品质与效率微波辅助湿法优势突出。且王呈馨等研究指出，工艺条件优化的提取技术可通过降低氧化指标显著提升油脂稳定性，而微波辅助湿法通过非高温、少溶剂的特性，进一步验证了绿色工艺对油脂品质的积极影响，适用于工业化生产中高质量牛油的制备^[21]。

为从色泽、气味、口感等直观维度评估各工艺所得牛油的实际品质与市场接受度，对比响应面优化提取牛油与其他提取方法所得油脂产品的感官评分，感官分析对比结果见图 6。

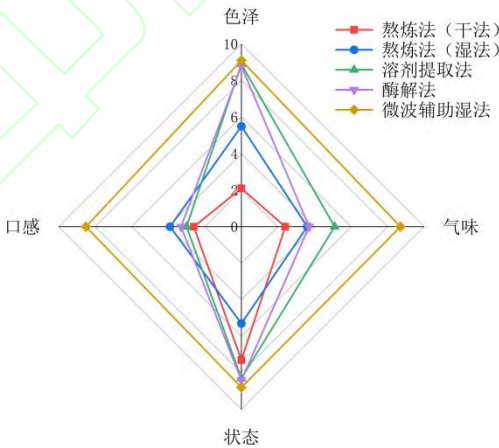


图 6 不同工艺提取牛油感官评定雷达图

由图 6 可以看出，微波辅助湿法在 5 种提取工艺中展现出明显优势。雷达图形态表明，该工艺的多边形覆盖面积最大且形态趋近圆形，直观反映了其在色泽、气味、状态及口感四维度的均衡性，无明显感官短板。微波法在关键指标（气味与口感）上也明显优于传统熬炼法、溶剂法及酶解法，表明微波加热的均匀性能够有效保留牛油风味并增强适口性。相比之下，

传统熬炼法因高温处理导致色泽与气味评分显著偏低，雷达图形态呈局部凹陷，感官缺陷明显；溶剂与酶解法虽在状态维度表现接近微波法，但气味接受度不高，极大限制牛油的综合应用。综上，微波辅助湿法牛油品质具有明显优势，其他工艺的适用性需依据特定需求（如色泽或风味保留）进行针对性取舍。

3 小结

本文以单因素试验为基础，采用微波辅助提取工艺，系统分析了液料比值、微波功率和提取时间对牛脂肪提取率的影响。结果表明，优化提油工艺条件为提取时间 7.3 min、微波功率 480.0 W、液料比值 0.6 mL/g，该条件下，提取率为 91.72%，最终温度 98.32℃，酸价 0.51 mg/g。提取牛油的各项理化指标符合相关国家标准要求，表明优化提取工艺是可行的。且感官品质突出：色泽、气味、状态、口感评分均明显优于传统方法，无溶剂味、酸败味，质地均匀透亮。脂肪酸组成分析表明，该工艺提取的牛油 SFA 含量 62.02%，MUFA 含量 34.88%，PUFA 含量 3.23%，零反式脂肪酸，优于溶剂法的高饱和脂肪和酶解法的潜在反式酸风险。对比其余提取工艺，微波辅助湿法保持较高提取率的同时，提取牛油的 SFA 含量更低，MUFA 含量更高，更接近“低 SFA、高 MUFA”现代健康油脂标准，在营养层面表现出明显优势，为牛油的绿色高效加工提供了新思路。

参考文献：

- [1] 李桂华, 王成涛, 张玉杰, 等. 食用牛油理化特性及组成分析的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010,31(1):30-32+36.
- [2] 王家升, 张慧, 丁秀臻, 等. 食用牛油的制备及深加工技术综述[J]. 粮油食品科技, 2017,25(5):32-36.
- [3] 宋宇, 张丽梅, 黄志刚. 油脂压榨机榨膛流场域浓度仿真分析[J]. 机电信息, 2019,(14):49-50.
- [4] 毛棋, 覃小丽, 胡晓, 等. 微波辅助低液固比水剂法提取青梅核仁油[J]. 食品与发酵工业, 2024,50(10): 230-236.
- [5] YUSOFF M M, GORDON H M, NIRANJAN K. Aqueous enzyme assisted oil extraction from oilseeds and emulsion de-emulsifying methods: A review[J]. *Trends in Food Sci Technol*, 2015, 41 (1) : 60-82.
- [6] LI X, LI Z, WANG X, et al. Application of cavitation system to accelerate aqueous enzymatic extraction of seed oil from *Cucurbita pepo* L. and evaluation of hypoglycemic effect[J]. *Food Chem*, 2016, 212 : 403-410.
- [7] 刘义军, 卜梦婷, 谭戈, 等. 不同提取方法对牛油果油理化特性、抗氧化性能及脂肪酸组成的对比研究[J]. 四川农业大学学报, 2020,38(2):161-167.
- [8] 贺洋洋, 张明真, 刘旭旭, 等. 响应面法优化甘肃平凉牡丹籽超声-微波提取工艺的研究[J]. 声学技术, 2023, 42(1):52-56.
- [9] 罗云云, 杜伟锋, 应泽茜, 等. 响应面法协同正交试验设计优化薏苡仁多糖提取工艺研究[J]. 中华中医药杂志, 2019,34(10):4847-4815.
- [10] Vechtomova E, Kozlova O, Orlova M. Evaluation of methods for obtaining rendered animal fats[J]. *Food Process. Tech. Technol*, 2022, 52 (4) : 797–806.
- [11] GAO P, LIU R, JIN Q, et al. Effects of processing methods on the chemical composition and antioxidant capacity of walnut (*Juglans regia* L.) oil [J]. *LWT-Food Sci. Technol*, 2021, 135: 109958.
- [12] 孙龙珠, 郭玉杰, 李娟, 等. 不同动物油脂酶解法制备及其品质对比分析[J]. 中国调味品, 2025, 50(1): 28-34.
- [13] CAMEL V. Recent extraction techniques for solid matrices-supercritical fluid extraction, pressurized fluid extraction and microwave-assisted extraction: their potential and pitfalls[J]. *Analyst*, 2001, 126 (3) : 1182-1187.

- [14] 王晨曦, 夏依旦·买合苏木, 房徐涵, 等. 芜菁子油脂微波提取工艺及其脂肪酸和生物活性研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(10):56-62.
- [15] SARA M, ALIREZA F, HAMID H. Microwave-assisted hydro-distillation of essential oil from rosemary: Comparison with traditional distillation [J]. *Avicenna J. Med. Biotechnol*, 2018, 10 (1) : 22-28.
- [16] Hayley G Law, Muhammad A Khan, Wei Zhang, et al. Reducing saturated fat intake lowers LDL - C but increases Lp (a) levels in African Americans: the GET - READI feeding trial [J]. *J Lipid Res.*, 2023, 64(9) : 100420.
- [17] Amar M J A, Sakurai T, Sakurai-Ikuta A, et al. A novel apolipoprotein C-II mimetic peptide that activates lipoprotein lipase and decreases serum triglycerides in apolipoprotein E-knockout mice[J]. *J. Pharmacol. Exp. Ther*, 2015, 352 (2) : 227-235.
- [18] Hwang C-C, Chien H-I, Lee Y-C et al. Physicochemical quality retention during cold storage of pre packaged barramundi meat processed with a new microwave-assisted induction heating technology. *Food*. 2023, 12 (16) : 3140.
- [19] Luo S, Song Y, Wang R, et al. Preparation of conjugated linoleic acid by ultrasound-assisted nanonickel catalyst isomerization of sunflower oil[J]. *J Oleo Sci.* 2021, 70 (10) : 1357-1366.
- [20] Zhou Y, Yang L, Chu C, et al. Normal fat intake with high MUFA content and an appropriate SFA /MUFA/PUFA ratio improved the health of rats[J]. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 2024, 126 (6) : 2300214. DOI: 10.1002/ejlt.202300214.
- [21] 王呈馨, 张忠, 范柳萍, 等. 翅果油超临界CO₂流体萃取工艺优化及其不同提取方法的比较[J]. 中国油脂, 2019,44(7):12-15.

获奖证书

Certificate of Award

学校：西北农林科技大学

学生：党景遥 邵一诺 侯伊彤

指导老师：党亚爱 张敏

参赛作品：声速的测量

在2025年第三届西北地区大学生物理实验竞赛中荣获

一等奖

特发此证，以资鼓励！

全国大学生物理实验竞赛组委会西北地区分会
陕西师范大学物理学与信息技术学院（代章）

2025年8月28日



证书编号
25WLSYCK-XB-003-013

证书编号：2025070170023

中国知网学术期刊网络首发论文出版证书

《中国学术期刊（网络版）》是中国核工业集团有限公司主管、中核战略规划研究总院有限公司主办、国家新闻出版署 2015 年 8 月 14 日批准的网络版连续出版物（国际标准连续出版物号 ISSN 2096-4188；国内统一连续出版物号 CN 11-6037/Z），在《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司的互联网出版网站中国知网（www.cnki.net，网出证（京）字第 416 号）上进行出版。

《中国油脂》与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司合作，在中国知网创办了与《中国油脂》内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷版出版之前刊发纸质期刊已正式录用定稿的论文，著作权受法律保护。论文发表时间按中国知网的网络出版时间确认。

兹有，邵一诺，ABDIRAKHMAN Dana，林张，黄丹，刘重阳，刘晓丽，李琪，于修焯同志的题为《基于响应面法的牛油微波提取工艺优化研究》的论文

DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.250270

链接地址: <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.250270>

已于 2025 年 7 月 1 日在中国知网出版，出版证书验证地址 www.cnki.net，特此证明。

《中国油脂》编辑部（签章）



《中国学术期刊（光盘版）》
电子杂志社有限公司（签章）



文献知网节

文章目录

- 1 材料与方法
- 1.1 材料
- 1.1.1 原料与试剂
- 1.1.2 仪器
- 1.2 牛油提取工艺
- 1.3 单因素试验研究
- 1.3.1 提取时间对提取的影响
- 1.3.2 微波功率对提取的影响
- 1.3.3 液料比值对提取的影响
- 1.4响应面试验设计
- 1.5 牛油不同提取工艺
- 1.5.1 熬炼法牛油提取
- 1.5.2 溶剂萃取法牛油提取
- 1.5.3 酶解法提取牛油
- 1.6牛油物理化学指标测定
- 1.7 牛油的不饱和脂肪酸的测定
- 1.8 牛油感官评定
- 1.9数据统计与分析
- 2 结果与分析

中国油脂 · 查看该刊数据库收录来源

(录用定稿) 网络首发时间: 2025-07-01 09:56:58

网络首发证书下载

基于响应面法的牛油微波提取工艺优化研究

网络首发

邵一诺¹ ABDIRAKHMAN Dana¹ 林张¹ 黄丹² 刘重阳³ 刘晓丽¹ 李琪¹ 于修敏¹

1.西北农林科技大学食品科学与工程学院 2.渭南长安花粮油股份有限公司 3.杨凌秦阳农业科技有限公司

摘要: 为了进一步提高牛油微波提取率和优化提油工艺, 本文以牛油磷脂脂肪为原料, 采用微波辅助湿法提油工艺, 通过单因素和响应面优化试验考察液料比值、微波功率和提取时间对牛油提取率、最终温度、酸价的影响。研究结果表明: 最优提油工艺条件为提取时间7.3 min、微波功率480 W、液料比值为0.6 mL/g (水体积与牛油脂肪质量比), 在该条件下, 牛油提取率达91.72%, 最终温度98.32℃, 酸价0.51 mg/g, 相较于传统熬炼法、溶剂法和酶解法, 微波辅助湿法提取时间缩短超94%以上, 牛油氧化程度最低, 感官评分最优, 综合效率与品质优势突出, 提取的牛油各项理化指标符合相关国家标准要求, 表明牛油微波提取优化工艺是可行的。

关键词: 牛油, 提取, 微波辅助, 响应面优化, 工艺优化,

基金资助: 陕西省“科学家+工程师”队伍项目 (2024QCY-KXJ-079) ; 陕西省科技创新团队项目 (2024RS-CXTD-70) ;

DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.250270

编辑: 工程技术 I 辑

专题: 一般化学工业/轻工工业工业

分类号: TS225.22

在线公开时间: 2025-07-01 (知网平台在线公开时间, 不代表文章的发表时间)

中国知网网络首发, 未经许可, 禁止转载、摘编。

手机阅读

CNKI AI阅读

HTML阅读

网页阅读

CAJ下载

PDF下载

我是作者, 免费下载

学位论文投稿



全国中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国精品科技期刊
国家期刊奖百种重点期刊 中国科学引文数据库核心期刊

ISSN 1003-7969
CODEN ZHYOEG

中国油脂

CHINA OILS AND FATS

8

2025年 第50卷
2025年 8月出版



迈安德

—成就客户 共创美好—

MYANDE

专业技术 全球共享

Professionalism & expertise for worldwide market



数字孪生工厂



>> 优越预处理设备



>> 全球安全标准的浸出



>> 更健康营养的精炼



>> 智能油脂工厂

ISSN 1003-7969



9 771003 796252

迈安德集团有限公司
MYANDE GROUP CO., LTD.

地址:江苏省扬州市吉安南路199号
网址:www.myande.com
电话:0514-87848882 87849000



微信扫码

微信公众号

