张可洋, 王锦涛, 于俊飞, 等. 干法分提协同溶剂法分提高熔点羊油组分工艺优化及饱和脂肪酸的富集 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 226−236. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080245

ZHANG Keyang, WANG Jintao, YU Junfei, et al. Dry Fractionation Combined with Solvent-assisted Fractionation for Process Optimization and Saturated Fatty Acid Enrichment in High-melting-point Mutton Tallow Fractions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 226−236. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080245

· 工艺技术 ·

干法分提协同溶剂法分提高熔点羊油组分工艺优化及饱和脂肪酸的富集

张可洋, 王锦涛, 于俊飞, 吴玲艳, 申岱林, 张　炎, 徐泽权, 马　欣, 王子荣*
（新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052）

摘　要: 为开发高附加值的羊油产品，以阿勒泰羊臀脂为原料，采用干法分提协同溶剂法分提工艺得到高熔点羊油组分。以固脂得率、熔点、过氧化值、酸价为评价指标，通过单因素实验，考察各因素对高熔点羊油组分分提效果的影响；应用 Box-Behnken 响应面法设计试验，结合 AHP-CRITIC 法对各评价指标进行主客观赋权，以综合评分为响应值。并对分提产物的理化性质和脂肪酸组成进行分析。结果表明：最优条件为油与溶剂比例 1∶2、养晶温度 20 ℃、降温速率 8 ℃/h、养晶时间 12 h，在此条件下分提所得固脂得率为 33.23%、熔点为 50.1 ℃、过氧化值为 0.02 mg/g、酸价为 0.42 mg/g、综合评分为 93.88。分提后所得高熔点羊油组分的过氧化值、酸价、皂化值、丙二醛、碘值分别为：0.025 mg/g、0.44 mg/g、195.38 mg/g、1.94 nmol/mL、42.42 g/100 g，显著低于原脂和干法分提所得固脂（28S）（P<0.05）；28S 的饱和脂肪酸由原脂的 43.94% 升高到 47.8%，干法分提协同溶剂法分提后所得固脂（20S）饱和脂肪酸为 63.21%。综上，分提所得高熔点羊油组分氧化稳定性和熔点有明显提升，增强了高熔点羊油组分作为特种油脂的使用价值；相较于原脂饱和脂肪酸显著提高 19.27%（P<0.05），这为高熔点羊油组分的合理开发以及饱和脂肪酸的富集工艺提供了参考。

关键词: 羊臀脂, 干法分提协同溶剂法分提, 高熔点羊油组分, 饱和脂肪酸
中图分类号: TS225.22　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0226−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080245　　本文网刊:

Dry Fractionation Combined with Solvent-assisted Fractionation for Process Optimization and Saturated Fatty Acid Enrichment in High-melting-point Mutton Tallow Fractions

ZHANG Keyang, WANG Jintao, YU Junfei, WU Lingyan, SHEN Dailin, ZHANG Yan, XU Zequan, MA Xin, WANG Zirong*

（College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China）

Abstract: To develop high value-added mutton tallow products, high-melting-point fractions were prepared from Altay sheep rump fat using a dry fractionation process combined with solvent-assisted fractionation. Solid fat yield, melting point, peroxide value, and acid value were selected as evaluation indices. Single-factor experiments were conducted to investigate the effects of various parameters on the fractionation efficiency, followed by Box-Behnken response surface design. The Analytic Hierarchy Process-Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (AHP-CRITIC) method was applied to assign subjective and objective weights to each evaluation index, with the comprehensive score used as the response value. Physicochemical properties and fatty acid composition of the fractionated products were analyzed. The optimal conditions were determined as an oil-to-solvent ratio of 1∶2, crystallization temperature of 20 °C, cooling rate of 8 °C/h, and crystal-

收稿日期: 2025−08−25
基金项目: 国家自然科学基金（32260558）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2022D01B102）；新疆维吾尔自治区羊产业技术体系（XJARS-09-13）。
作者简介: 张可洋（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养, E-mail: 3335355771@qq.com。
*** 通信作者:** 王子荣（1963−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: wangzirong212@126.com。

lization time of 12 h. Under these conditions, the solid fat yield reached 33.23%, melting point was 50.1 ℃, peroxide value was 0.02 mg/g, acid value was 0.42 mg/g, and the comprehensive score was 93.88. The high-melting-point mutton tallow fraction exhibited peroxide value, acid value, saponification value, malondialdehyde content, and iodine value of 0.025 mg/g, 0.44 mg/g, 195.38 mg/g, 1.94 nmol/mL, and 42.42 g/100 g, respectively, which were significantly lower than those of the raw tallow and the solid fat obtained by dry fractionation at 28 ℃ (28S) (P<0.05). The saturated fatty acid content increased from 43.94% in raw tallow to 47.8% in 28S, and further to 63.21% in the solid fat obtained by the combined fractionation method at 20 ℃ (20S). These results indicate that the high-melting-point fraction exhibits markedly enhanced oxidative stability and melting point, thereby improving its potential as a specialty fat. Compared with raw tallow, the saturated fatty acid content increased by 19.27% (P<0.05), providing a reference for the rational development of high-melting-point mutton tallow fractions and the enrichment process of saturated fatty acids.

Key words: sheep rump fat; dry fractionation combined with solvent-assisted fractionation; high-melting-point mutton tallow fraction; saturated fatty acids

羊油是一种优质食用油脂，含有丰富的营养成分和生物活性物质[1]。阿勒泰羊是新疆特色绵羊品种，其臀脂资源丰富，约占出栏体重的 17%。阿勒泰羊臀脂兼具独特风味与优良加工性能，是极具开发价值的区域性动物油脂资源[2−4]。高熔点食用油脂如棕榈硬脂、猪油和牛油等在食品加工业具有广泛用途，如作为涂抹脂、起酥油、人造奶油和煎炸油等特种油脂[5]。其具备高烟点与优良的氧化稳定性，适合开发高温煎炸油[6−7]；特定的高熔点油脂是制备优质起酥油与涂抹脂的理想原料[5]。因此，高效获取高纯度的高熔点油脂组分，对特种油脂的开发至关重要。羊油作为多种不同熔点甘油三酯的混合物，限制了其在食品加工中的应用，可通过分提技术获取特定熔点的功能性组分，以满足特种油脂的精准化生产需求[8]。

油脂干法分提操作简单、成本低，任航歧等[9] 通过多级干法分提羊臀脂得到高熔点羊油组分，发现制作的起酥油面包的品质优于市售猪油基起酥油面包。溶剂法分提能提高分离效率，Salas 等[10] 通过溶剂分提将葵花籽油转化为高硬脂酸黄油，实现了对可可脂的有效替代。但单一的干法分提固液分离效率低，限制了其在高纯度产品制备中的应用[11]；单一的溶剂法分提对高熔点羊油组分的选择性不足[12]。因此迫切需要开发一种高效的分提工艺，用于制备高纯度高熔点羊油组分，本研究提出将干法与溶剂法分提相协同的新工艺，其核心创新在于通过过程耦合与参数优化，同步提升高熔点羊油组分的分提效率与纯度。

本研究以阿勒泰羊臀脂为原料，采用干法分提协同溶剂法分提高熔点羊油组分，通过控制分提过程中的油与溶剂比例、养晶温度、降温速率、养晶时间，利用单因素实验和响应面法优化分提工艺，并对分提产物的理化性质和脂肪酸组成进行分析，研究该工艺对羊油理化性质和脂肪酸组成的影响，为富集饱和脂肪酸拓宽思路，以期突破现有分提技术瓶颈并为高熔点羊油组分的高效制备及特种油脂的开发和利用提供理论依据和技术支持。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

阿勒泰羊臀脂（15 月龄雄性）　新疆乌鲁木齐华凌牛羊屠宰场；硫代硫酸钠、韦氏（Wijs）试剂、37 种脂肪酸甲酯混合标准品　上海源叶生物科技有限公司；丙二醛 ELISA 试剂盒　苏州梦犀生物医药科技有限公司；可溶性淀粉（食品级）　上海麦克林生化科技股份有限公司；氢氧化钾、甲醇、丙酮、异丙醇、正己烷、石油醚（60~90）、三氯甲烷、冰乙酸、碘化钾、乙醚、氢氧化钠、无水乙醇、环己烷、盐酸等　均为分析纯。

Al 204-IC 型电子分析天平　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；HHS（数显式）型电热恒温水浴锅　北京科伟永兴仪器有限公司；SPX-150 型生化培养箱　深圳市三诺仪器仪表经营部；4-20R 型冷冻离心机　江苏恒诺仪器制造有限公司；TG 16-WS 型高速台式离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；FL-1 型可调式封闭电炉　北京市永光明医疗器械有限公司；DZF 型真空干燥箱　恒诺利兴科技有限公司；DHS-16 型水分测定仪　上海菁海仪器有限公司；Agilent 7890B 型气相色谱仪　安捷伦科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　试样的制备　采用王锦涛等[13] 的方法进行制备，羊臀脂去除结缔组织，分割成约 5 cm×5 cm×5 cm 的小块放入绞肉机绞碎，绞碎后，准确称取 100 g 后放入烧杯并用电炉加热，采用干法熬制熔化羊臀脂至不再出油为止，随后用纱布过滤油渣得到粗提羊油，收集液体部分于−25 ℃ 密封保存。

1.2.2　干法分提协同溶剂法分提流程　称取适量的粗提羊油分装至 50 mL 的离心管中，将其放置水浴锅内加热至 60 ℃，完全熔化后，置于培养箱内加热至平衡温度 60 ℃ 并保持 30 min 以消除结晶记忆，以 8 ℃/h 的降温速率梯度降温至 28 ℃，在此温度下养晶 9 h 后使用冷冻离心机在 4000 r/min 条件下离心 15 min 得到固脂和液油，将 28 ℃ 条件下分提所得固脂（28S）加热至 60 ℃ 完全熔化后，添加溶剂，充分摇匀，置于培养箱内加热至平衡温度 40 ℃ 保持 30 min

以消除结晶记忆，按一定速率降温至养晶温度，养晶一段时间后分离固脂与液油，在 70 ℃、0.08 MPa 条件下真空干燥 4 h 以去除油脂中的溶剂残留，密封后 −25 ℃ 冻藏备用。

1.2.3 溶剂的筛选 根据不同溶剂（异丙醇、丙酮、正己烷、石油醚）的结晶温度，设定养晶温度（异丙醇 30 ℃、丙酮 20 ℃、正己烷 15 ℃、石油醚 15 ℃）。在 8 ℃/h 的降温速率、9 h 的养晶时间、油与溶剂比例 1∶2 的条件下，考察四种分提溶剂对高熔点固脂的得率、熔点的影响，筛选出异丙醇、丙酮两种分提溶剂；继续降低养晶温度（异丙醇 25 ℃、丙酮 15 ℃），在同一条件下，考察分提溶剂对高熔点固脂脂肪酸的影响，筛选出最合适的溶剂进行单因素实验。

1.2.4 单因素实验设计 以分提产物高熔点固脂的得率、熔点、过氧化值、酸价为评价指标，选择油与溶剂比例、养晶温度、降温速率、养晶时间进行单因素实验。

1.2.4.1 油与溶剂比例 在丙酮作为分提溶剂，养晶温度 20 ℃，降温速率 8 ℃/h，养晶时间 9 h 的条件下，考察不同油与溶剂比例（v/v）（1∶1、1∶2、1∶3、1∶4、1∶5）对固脂的得率、熔点、过氧化值、酸价的影响。

1.2.4.2 养晶温度 在丙酮作为分提溶剂，油与溶剂比例 1∶2，降温速率 8 ℃/h，养晶时间 9 h 的条件下，考察不同养晶温度（23、20、17、14、11 ℃）对固脂的得率、熔点、过氧化值、酸价的影响。

1.2.4.3 降温速率 在丙酮作为分提溶剂，油与溶剂比例 1∶2，养晶温度 20 ℃，养晶时间 9 h 的条件下，考察不同降温速率（4、6、8、10、12 ℃/h）对固脂的得率、熔点、过氧化值、酸价的影响。

1.2.4.4 养晶时间 在丙酮作为分提溶剂，油与溶剂比例 1∶2，养晶温度 20 ℃，降温速率 8 ℃/h 的条件下，考察不同养晶时间（3、6、9、12、15 h）对固脂的得率、熔点、过氧化值、酸价的影响。

1.2.5 响应面优化试验设计 在单因素实验的基础上，选取油与溶剂比例（A）、养晶温度（B）、降温速率（C）、养晶时间（D）为自变量，以高熔点固脂各评价指标（固脂的得率、熔点、过氧化值、酸价）的综合评分为响应值，导入 Design-Expert 13 软件进行四因素三水平共 29 个试验点的响应面试验设计，各因素水平表见表 1。

表 1 响应面试验设计因素水平

Table 1 Factors and levels of response surface experimental design

因素	水平		
	−1	0	1
A: 油与溶剂比例（v/v）	1∶1	1∶2	1∶3
B: 养晶温度（℃）	17	20	23
C: 降温速率（℃/h）	6	8	10
D: 养晶时间（h）	9	12	15

1.2.6 综合评分的计算

1.2.6.1 AHP 法确定主观权重 根据相关研究[14−16]，将固脂得率、熔点、过氧化值、酸价 4 个评价指标按照重要程度分为 4 个层次，构造判断矩阵，并进行一致性检验，计算结果见表 2，所得各评价指标的权重 WAHPi 依次为：固脂得率 0.2630、固脂熔点 0.4547、固脂过氧化值 0.1411、固脂酸价 0.1411，一致性比率 CR 为 0.004<0.1，符合一致性检验要求。

表 2 高熔点固脂评价指标判断矩阵

Table 2 Evaluation index judgment matrix for high-melting-point solid fats

考察指标	判断矩阵				Wi	CR
	熔点	得率	过氧化值	酸价		
熔点	1.000	2.000	3.000	3.000	0.4547	0.004
得率	0.500	1.000	2.000	2.000	0.2630	
过氧化值	0.333	0.500	1.000	1.000	0.1411	
酸价	0.333	0.500	1.000	1.000	0.1411	

1.2.6.2 CRITIC 法确定客观权重 根据相关研究[14−16]，通过 CRITIC 法计算各评价指标客观权重系数，使用 SPSS27.0 对实验数据进行归一化处理，对归一化的数据进行 CRITIC 分析，计算所得各评价指标的权重 WCRITICi 依次为：固脂得率 0.2397、固脂熔点 0.2230、固脂过氧化值 0.3014、固脂酸价 0.2358。

1.2.6.3 AHP-CRITIC 法确定复合权重 AHP 是主观赋权法，CRITIC 法是客观赋权法，将 AHP 法和 CRITIC 法进行结合，相较于单一赋权法能够更科学合理地评估各指标的综合权重。因此选择 AHP-CRITIC 法按照公式（1）计算响应面试验中各指标的综合权重。综合权重系数 $W_{AHP\text{-}CRITIC}$ 分依次为：固脂得率 0.2624、固脂熔点 0.4220、固脂过氧化值 0.1770、固脂酸价 0.1385。

$$W_{AHP-CRITIC}=\frac{W_{AHP}\times W_{CRITIC}}{\sum_{j=1}^{n}W_{AHP\times CRITIC}} \quad 式（1）$$

根据综合权重系数按照公式（2）和公式（3）计算评价指标的综合评分：W_j 为第 j 个指标的综合权重系数；F_j 为第 j 个评价指标的实验结果；$(F_j)_{max}$ 为实验组中第 j 个指标的最大值；$(F_j)_{min}$ 为实验组中第 j 个指标的最小值。其中固脂得率和固脂熔点两个评价指标的综合评分采用公式（2）进行计算为 M1；固脂过氧化值和固脂酸价两个评价指标的综合评分采用公式（3）进行计算为 M2，四个评价指标的综合评分为两次计算结果的加和，即 M1+M2。

$$M1=\sum_{j=1}^{n}\frac{W_j\times F_j}{(F_j)_{max}}\times 100 \quad 式（2）$$

$$M2=\sum_{j=1}^{n}\frac{W_j\times (F_j)_{min}}{F_j}\times 100 \quad 式（3）$$

1.2.7 理化指标的测定 得率的计算公式如下：

$$R(\%)=\frac{m}{M}\times 100 \quad 式（4）$$

式中：R 为固脂得率(%)；M 为干法分提所得 28S 的重量(g)；m 为分提所得固脂的重量(g)。

熔点的测定参照 GB/T 12766-2008《动物油脂熔点的测定》；过氧化值的测定参照 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》；酸价的测定参照 GB 5009.229-2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》；碘值的测定参照 GB/T 5532-2022《动植物油脂碘值的测定》；皂化值的测定参照 GB/T 5534-2008《动植物油脂皂化值的测定》；水分的测定参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》；丙二醛采用 ELISA 试剂盒进行测定。

1.2.8　羊油脂肪酸组成的测定

1.2.8.1　甲酯化　参考 Ide[17] 的方法并作适当修改。准确称取 0.1 g 油脂置于试管中，加入 5 mL 正己烷，振荡 5 min 使油脂完全溶解；随后加入 2 mL 0.5 mol/L 氢氧化钾甲醇溶液，充分摇匀后置于 60 ℃ 水浴中加热 30 min 完成甲酯化反应。静置 1 h 后分层，取上清液通过 0.22 μm 有机滤膜以去除杂质。滤液用于气相色谱(Gas chromatography，GC)分析，进样量为 1 μL。

1.2.8.2　气相色谱条件　参考 Rebechi 等[18] 的分析条件并进行优化。Cd-2560 毛细管气相色谱柱(100 m×0.25 mm×0.25 μm)；载气为氮气；进样口温度为 250 ℃，分流比为 100∶1，进样量为 1 μL，升温程序为初始温度 140 ℃，保持时间 5 min；以 4 ℃/min 的升温速率升至 240 ℃，保持时间 30 min。通过 37 种脂肪酸甲酯混合标准品进行脂肪酸定性，脂肪酸相对百分比含量采用面积归一化法计算。每个样品平行测定 3 次，结果取平均值。

1.3　数据处理

使用 Excel 2024 和 SPSS 27.0 软件对实验数据进行统计和单因素方差分析(one way ANOVA)，使用 Origin 2024 进行作图，使用响应面 Design-Expert 13 软件进行响应面分析。各因素在相同条件下平行测定 3 次，实验统计数据以平均值±标准差表示。

2　结果与分析

2.1　溶剂的筛选

经过观察可以发现，丙酮作为分提溶剂，油脂在 20 ℃ 的养晶温度下开始结晶；异丙醇作为分提溶剂，油脂在 30 ℃ 的养晶温度下开始结晶；正己烷和石油醚作为分提溶剂，油脂在 15 ℃ 的养晶温度下开始结晶。分提所得固脂的得率及熔点变化如图 1 所示。正己烷和石油醚作为分提溶剂时结晶温度较低为 15 ℃，所得固脂(正己烷 15S、石油醚 15S)得率显著低于丙酮组和异丙醇组(P<0.05)，且晶体生长需要较长时间，因此这两种溶剂不适合作为分提溶剂使用。而丙酮组在 20 ℃ 的养晶温度下结晶所得固脂(丙酮 20S)得率为 35.09%，固脂熔点为 49.74 ℃，显著高于异丙醇组(P<0.05)。异丙醇组在 30 ℃ 养晶温度下所得固脂(异丙醇 30S)得率显著高于丙酮 20S(P<0.05)，但其熔点显著最低(P<0.05)，为 44.7 ℃。

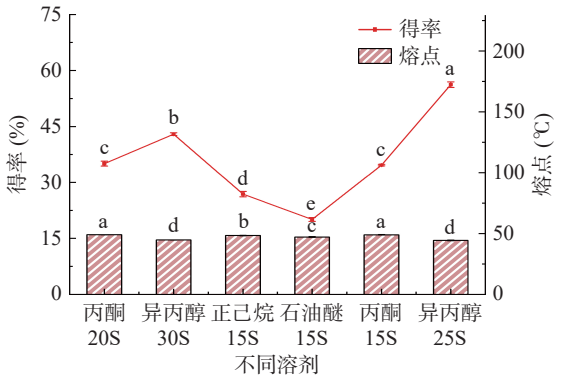


图 1　不同分提溶剂对高熔点固脂得率和熔点的影响

Fig.1　Effect of different extraction solvents on yield and melting point of high-melting-point solid fat

注：不同小写字母代表数值间存在显著性差异(P<0.05)，图 2~图 5 同。

为继续筛选异丙醇和丙酮两种溶剂并探究其对饱和脂肪酸的富集效果，养晶温度由 30 ℃ 和 20 ℃ 降低至 25 ℃ 和 15 ℃，养晶结束得到固脂(异丙醇 25S 和丙酮 15S)，检测这两种分提溶剂所得固脂的脂肪酸组成，结果如表 3 所示。可以发现在 28S 中添加溶剂后，丙酮 20S 的饱和脂肪酸由 47.8% 升高到 63.21%，显著高于异丙醇组(P<0.05)。由图 1 可知，随着养晶温度的降低，丙酮组的固脂得率和熔点均无显著性变化，异丙醇组的固脂得率显著升高为 56.21%(P<0.05)。通过对脂肪酸组成进行分析发现，降低养晶温度并没有显著提高丙酮组的饱和脂肪酸含量，但异丙醇 25S 的饱和脂肪酸含量显著降低(P<0.05)。因此，结合固脂得率、熔点及脂肪酸变化，选择丙酮作为分提溶剂进行后续实验。

2.2　单因素实验结果

2.2.1　不同油与溶剂比例对高熔点固脂的影响　从图 2 可以看出，油与溶剂比例对固脂得率和熔点有明显影响。固脂得率随着溶剂的增加呈现先上升后下降的变化，在 1∶1~1∶4 的油与溶剂比例下，固脂熔点显著升高(P<0.05)。在 1∶2 的油与溶剂比例下，固脂得率显著最高(P<0.05)，为 33.79%，进一步增加溶剂添加量，固脂得率开始下降，当油与溶剂比例增加到 1∶4 时，固脂熔点显著最高(P<0.05)，当油与溶剂比例增加到 1∶5 时，固脂得率和熔点均无显著变化，这一现象可能源于过多的丙酮导致溶液浓度变小，而结晶和晶体的生长需要合适的浓度差来推动，固脂的形成就会变慢，其中饱和脂肪酸的组成和含量也会达到相对稳定的状态，熔点也就相对稳定[19]。

酸价越低表明油脂的新鲜度越好，过氧化值越低表明油脂的氧化稳定性越好。从图 2 可以看出，油与溶剂比例对固脂过氧化值和酸价均有明显影响。过氧化值和酸价均呈现先下降后上升的变化，在油与溶剂比例为 1∶2 时，过氧化值和酸价显著最低

表 3 不同分提溶剂下高熔点固脂脂肪酸组成

Table 3 Composition of high-melting-point solid fat fatty acids under different extraction solvents

脂肪酸(%)	28S	丙酮20S	丙酮15S	异丙醇30S	异丙醇25S
肉豆蔻酸	2.87±0.00^{d}	3.13±0.01^{b}	3.32±0.02^{a}	2.92±0.03^{c}	2.90±0.02^{c}
肉蔻油酸	0.31±0.00^{a}	0.20±0.00^{d}	0.20±0.00^{d}	0.25±0.00^{c}	0.27±0.00^{b}
十五(烷)酸	1.48±0.00^{ab}	1.44±0.01^{d}	1.49±0.00^{a}	1.46±0.01^{cd}	1.47±0.01^{bc}
棕榈酸	23.36±0.03^{e}	27.86±0.19^{b}	28.25±0.03^{a}	25.98±0.17^{c}	24.60±0.15^{d}
棕榈油酸	2.79±0.00^{a}	2.19±0.01^{e}	2.23±0.00^{d}	2.45±0.02^{c}	2.62±0.02^{b}
十七(烷)酸	3.14±0.00^{e}	3.77±0.03^{b}	3.82±0.01^{a}	3.52±0.02^{c}	3.31±0.02^{d}
硬脂酸	16.95±0.02^{d}	27.01±0.25^{a}	26.77±0.10^{a}	22.76±0.09^{b}	19.62±0.11^{c}
反-9-十八稀酸	4.00±0.01^{a}	2.92±0.05^{c}	3.05±0.03^{bc}	3.22±0.53^{bc}	3.64±0.57^{ab}
油酸	36.56±0.00^{a}	25.37±0.16^{d}	25.05±0.03^{e}	30.44±0.16^{c}	33.80±0.23^{b}
反亚油酸	0.91±0.00^{a}	0.67±0.01^{d}	0.68±0.01^{d}	0.78±0.01^{c}	0.86±0.00^{b}
亚油酸	3.66±0.01^{a}	2.42±0.01^{d}	2.36±0.00^{e}	3.00±0.03^{c}	3.34±0.02^{b}
亚麻酸	1.38±0.00^{a}	0.91±0.00^{d}	0.88±0.00^{e}	1.13±0.01^{c}	1.28±0.01^{b}
饱和	47.80±0.01^{d}	63.21±0.49^{a}	63.64±0.12^{a}	56.63±0.32^{b}	51.90±0.31^{c}
不饱和	49.61±0.01^{a}	34.61±0.13^{d}	34.43±0.05^{d}	41.26±0.31^{c}	45.81±0.29^{b}

注: 同行字母不同代表各组间有显著性差异(P<0.05), 表7、表8同。

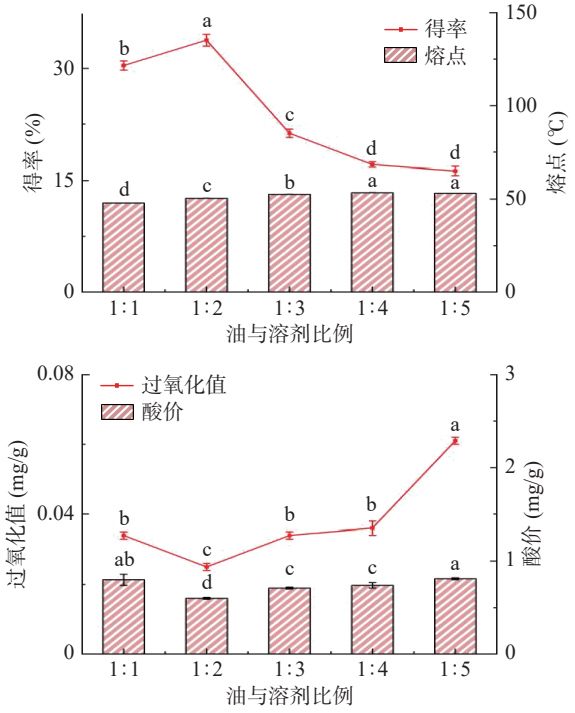


图 2 不同油与溶剂比例对高熔点固脂的影响

Fig.2 Effect of different oil and solvent ratio on high-melting-point solid fat

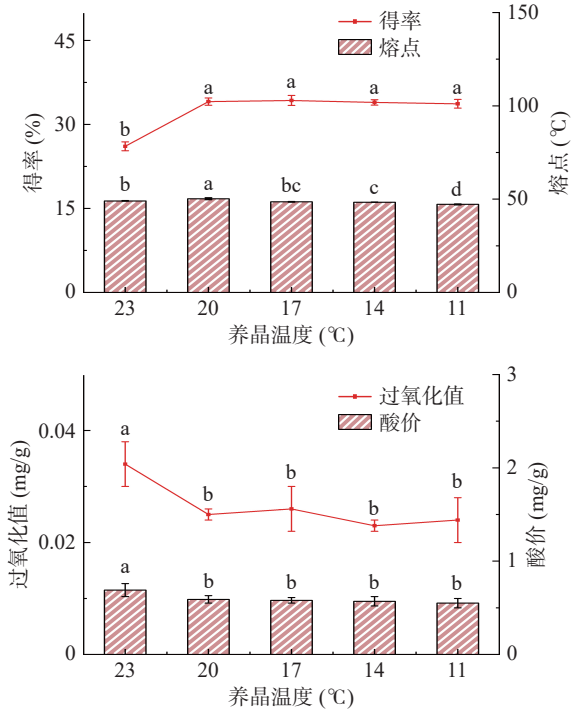


图 3 不同养晶温度对高熔点固脂的影响

Fig.3 Effects of different crystal curing temperatures on high-melting-point solid fat

(P<0.05), 分别是 0.025 mg/g 和 0.6 mg/g, 潜在原因是当油与溶剂为 1∶2 时, 丙酮对固脂中的氧化产物溶解度更高, 造成了氢过氧化物的分解, 且分解速度大于其生成速度, 同时游离脂肪酸也被丙酮溶解, 从而有效降低酸价和过氧化值[20]。比例过低, 游离脂肪酸和氧化产物无法被充分溶解; 比例过高, 丙酮难以完全回收, 残留溶剂可能催化后续的氧化反应, 从而增加氧化酸败的风险。

综合上述结果, 选择油与溶剂比例 1∶2 作为最适比例开展后续实验。

2.2.2 不同养晶温度对高熔点固脂的影响 从图 3 可以看出, 养晶温度对固脂得率和熔点有明显影响。23 ℃ 养晶温度下的固脂得率和熔点显著低于 20 ℃ 养晶温度下的固脂得率及熔点(P<0.05), 且在 20 ℃ 养晶温度下固脂得率和熔点均显著最高(P<0.05), 得率从 26.1% 升高到 34.09%, 熔点从 49.03 ℃ 升高到 50.23 ℃。继续降低养晶温度, 固脂的得率无显著变化, 固脂熔点继续降低, 其主要原因在于较低的养晶温度会造成体系黏度增加, 脂肪酸在该环境中移动困难, 减缓晶体的生长, 导致固脂得率不再显著变化[21]; 较低的养晶温度也会导致部分熔点较低的甘油三酯进入固脂, 使固脂的饱和脂肪酸含量降低, 固脂熔点

也随之下降[22]。在 23~20 ℃ 的养晶温度范围内固脂的得率和熔点均显著增加(P<0.05)，说明在该温度范围内分提工艺对高熔点固脂的影响最大，合适的养晶温度可以提高分提效率，一定程度上减少工业生产过程中形成的误差。

油脂中多不饱和脂肪酸含量越高，越易氧化[23]。观察图 3 可以发现，养晶温度对固脂过氧化值和酸价均有明显影响。23 ℃ 养晶温度下，过氧化值和酸价最高，养晶温度降低到 20 ℃ 时，过氧化值和酸价显著降低(P<0.05)，过氧化值从 0.034 mg/g 降低到 0.025 mg/g，酸价从 0.69 mg/g 降低到 0.59 mg/g。继续降低养晶温度，过氧化值和酸价均无显著变化。这可能是因为在 20 ℃ 养晶温度下，高熔点饱和甘油三酯优先结晶，游离脂肪酸和多不饱和脂肪酸保留在液相中，导致固脂氧化稳定性较高，继续降温，导致部分中熔点、低熔点甘油三酯可能共结晶带入少量的多不饱和脂肪酸，但由于油与溶剂比例已经固定为 1∶2，影响有限，所以继续降温，其过氧化值和酸价无显著变化。在薛淼等[24]的研究中，鸡油加工储藏过程中，温度过高会导致油脂的品质下降，过氧化值降低、同时也会导致蛋白质变性程度增大，脂酶活性下降，分解脂肪能力减弱，酸价降低，造成油脂酸败变质。这与上述研究结果一致。

综合上述结果，选择养晶温度 20 ℃ 作为最适养晶温度开展后续实验。

2.2.3　不同降温速率对高熔点固脂的影响　合适的降温速率可以保证油脂在分提过程中形成最稳定的晶型。如果采用温差过大的急骤冷却，易使油脂中形成无法分离的玻璃脂质体，快速冷却会促进不稳定多晶型物的结晶而形成晶束，导致结晶的互溶性和选择性差，只有通过缓慢冷却至一定的结晶温度，才能得到相应的晶型[25]。从图 4 可以看出，不同的降温速率对固脂的得率有显著影响，但对固脂熔点无显著影响。在 4 ℃/h 的降温速率下，固脂得率显著低于其他组(P<0.05)，这是因为过慢的降温速率造成晶核生成和晶体生长的时间延长，固液相不易分离而降低了固脂得率；在 6 ℃/h 的降温速率下固脂得率最高，继续增加降温速率固脂得率逐渐减小，但并无显著变化，主要归因于 8~12 ℃/h 降温范围内，降温速率过快，导致晶体成核过冷，晶核瞬间形成，养晶时间不足以支撑晶体的充分成长，造成晶体分布不均匀，体系黏度增大，但丙酮的加入在一定程度上降低体系黏度，增强分子扩散，使高熔点甘油三酯仍能有序的结晶，减少了液相包裹，使固脂得率和熔点维持在稳定状态，不再显著变化。张东明等[26]在一次干法分提和二次干法分提制备液态猪油过程中所得研究结论与此基本相符。

过氧化值反映的是油脂初级氧化产物(过氧化物)的积累量。从图 4 可以发现，降温速率 4 ℃/h 时的过氧化值显著高于 6 ℃/h 时的过氧化值(P<0.05)，因为以 4 ℃/h 降温速率降温时，温度下降缓慢，晶体

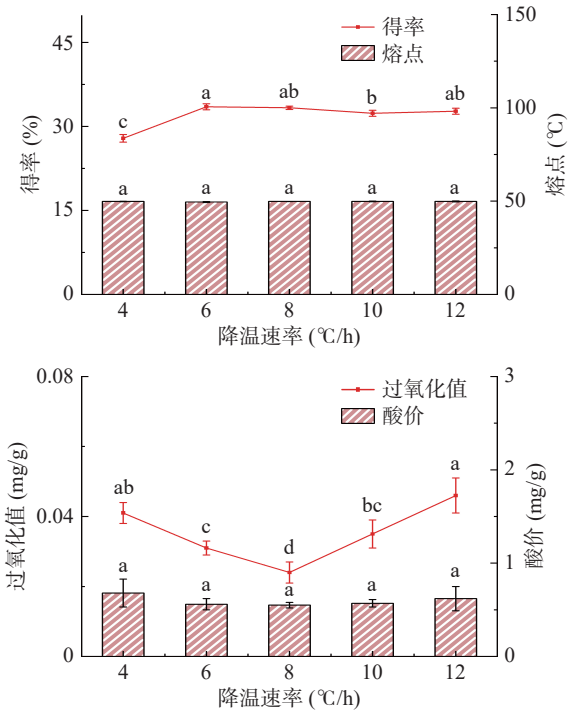


图 4　不同降温速率对高熔点固脂的影响

Fig.4　Effects of different cooling rates on high-melting-point solid fat

生长时间充足，易形成粗大的固脂晶体。这类晶体结构疏松，会吸附更多液脂，同时由于体系长时间处于中低温过渡阶段，可能会导致过氧化物的生成[27]；当降温速率为 8 ℃/h 时，过氧化值显著最低(P<0.05)，为 0.024 mg/g，这可能是因为在 8 ℃/h 的降温速率下，形成细小且紧密的固脂晶体结构，有效减少液脂残留，导致不饱和脂肪酸含量不足以支撑固脂发生氧化反应，且降温速率适中，避免其长时间处在中低温过渡阶段，减少了过氧化物的产生，显著降低了过氧化值(P<0.05)；当降温速率在 10~12 ℃/h 的范围内，温度下降过快，晶体未进行有序排列而形成细小且不规则的晶体，与氧气、溶剂的接触面积变大，促进固脂晶体表面的不饱和脂肪酸氧化，从而导致过氧化值的增加，同时，在 8 ℃/h 降温速率下所得固脂的酸价也达到最低，为 0.55 mg/g，继续增加降温速率，酸价无显著变化，猜测可能是因为极性溶剂丙酮对游离脂肪酸的溶解度远高于对非极性甘油三酯的溶解度，导致固脂中的游离脂肪酸极少，不会对酸价造成显著影响[28]。

综合上述结果，选择降温速率 8 ℃/h 作为最适降温速率开展后续实验。

2.2.4　不同养晶时间对高熔点固脂的影响　油脂的结晶过程包括晶核的形成和晶体生长 2 个阶段，从晶核的形成到晶体的生长需要一定时间才会形成稳定的晶体形态[29]。从图 5 可以看出，随着养晶时间的增加，固脂得率呈现先显著上升后缓慢下降的变化，固脂熔点变化平缓。3~9 h 养晶时间下的固脂得率显著上升(P<0.05)，12 h 的养晶时间下固脂得率最大，从 32.04% 升高到 33.40%，继续增加养晶时间，

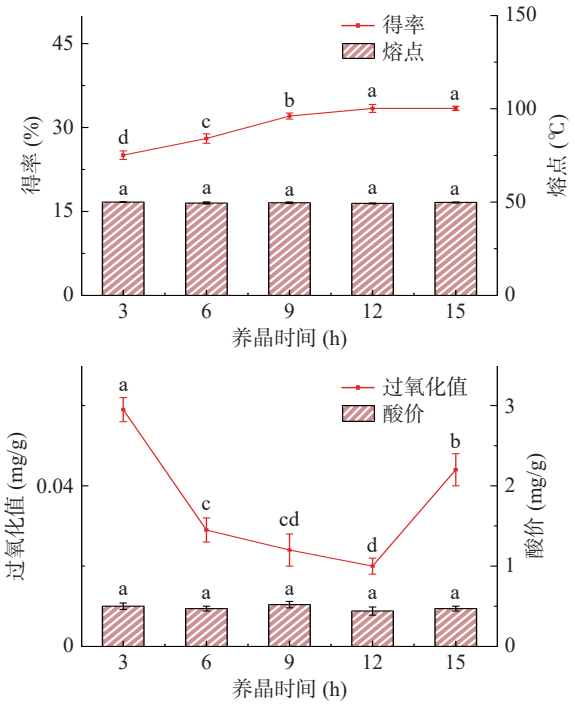


图 5 不同养晶时间对高熔点固脂的影响

Fig.5 Effects of different crystal cultivation times on high-melting-point solid fat

固脂得率无显著变化，引起这种现象的原因是 3~9 h 的养晶时间过短，晶体生长还没有达到稳定状态，高熔点甘油三酯还没有结晶充分，导致 3~9 h 养晶时间下的固脂得率在不断上升，当养晶时间为 12 h 时，固脂得率显著最大(P<0.05)，此时晶体生长已经达到稳定状态，继续增加养晶时间，固脂得率缓慢下降，但并无显著性差异。贾晓童[30] 在对羊油干法分提过程中，固脂得率和熔点也有相似变化，表明养晶时间过长会导致部分不饱和脂肪酸形成结晶进入固脂晶体，造成固脂得率缓慢下降，同时养晶时间过长还可能会降低固脂的氧化稳定性[31]。

随着养晶时间的增加，固脂的过氧化值呈现先下降后上升的变化，在 12 h 的养晶时间下，其过氧化值最低，为 0.02 mg/g，继续增加养晶时间其过氧化值显著升高(P<0.05)。养晶时间为 3 h 时，固脂晶体较小，晶体状态不稳定，易吸附不饱和脂肪酸，导致过氧化物的生成底物充足。随着养晶时间的增加，固脂晶体达到稳定状态，会优先保留饱和脂肪酸，而多不饱和脂肪酸则会更多的存在液相中，减少了固脂的氧化底物，同时，固脂晶体对脂溶性的抗氧化物质包裹能力增强，抑制过氧化物生成，从而导致过氧化值显著降低(P<0.05)。当养晶时间大于 12 h 时，养晶时间过长，可能会导致原本包裹的抗氧化物质释放到液相中，固脂抗氧化能力降低，导致过氧化值显著增加(P<0.05)[32]。养晶时间为 12 h 的酸价与过氧化值相似，达到最低，为 0.44 mg/g，继续增加养晶时间，酸价无显著变化，说明 12 h 的养晶时间下油脂品质较好。

在后续的优化过程中，需要综合考虑养晶时间这一关键因素，合理地控制养晶时间可以提高固脂的纯度以及品质，从而实现最佳的分提固脂效果。

2.3 响应面法优化试验结果分析

2.3.1 Box-Behnken 响应面试验 根据前期单因素实验结果，运用 Design-Expert 13 软件进行 Box-Behnken 响应面试验对分提工艺进一步优化，响应面试验设计与结果见表 4，方差分析结果见表 5。

表 4 响应面试验设计与结果

Table 4 Box-Behnken design and corresponding experimental results

试验号	A: 油与溶剂比例	B: 养晶温度(℃)	C: 降温速率(℃/h)	D: 养晶时间(h)	Y: 综合评分
1	1∶1	17	8	12	77.80
2	1∶3	17	8	12	74.90
3	1∶1	23	8	12	76.34
4	1∶3	23	8	12	68.88
5	1∶2	20	6	9	79.97
6	1∶2	20	10	9	75.81
7	1∶2	20	6	15	79.58
8	1∶2	20	10	15	77.11
9	1∶1	20	8	9	76.51
10	1∶3	20	8	9	69.29
11	1∶1	20	8	15	75.90
12	1∶3	20	8	15	71.32
13	1∶2	17	6	12	82.82
14	1∶2	23	6	12	75.50
15	1∶2	17	10	12	78.59
16	1∶2	23	10	12	76.97
17	1∶1	20	6	12	76.73
18	1∶3	20	6	12	72.90
19	1∶1	20	10	12	77.79
20	1∶3	20	10	12	69.75
21	1∶2	17	8	9	78.45
22	1∶2	23	8	9	74.16
23	1∶2	17	8	15	80.47
24	1∶2	23	8	15	75.84
25	1∶2	20	8	12	93.08
26	1∶2	20	8	12	93.04
27	1∶2	20	8	12	93.59
28	1∶2	20	8	12	93.36
29	1∶2	20	8	12	95.98

2.3.1.1 响应面模型分析 对表 4 中的实验数据进行回归分析，利用 Design-Expert 13 对油与溶剂比例(A)、养晶温度(B)、降温速率(C)、养晶时间(D)与各评价指标的综合评分(Y)进行二项式拟合，得到拟合方程为：

$$Y=93.81-2.84A-2.11B-0.96C+0.50D-1.14AB-1.05AC+0.66AD+1.43BC-0.08BD+0.42CD-11.86A^2-7.79B^2-7.44C^2-8.58D^2$$

决定系数 R^2=0.9924、校正系数 R_{adj}^2=0.9849 说明最佳工艺条件下试验值与模型预测值拟合较好[33]。对模型进行方差分析，由表 5 可知，回归模型 P<0.0001，同时失拟项不显著(P=0.8902>0.05)，说明拟合方程的预测值与实际值有较好的相关性，不确定

表 5　回归模型方差分析

Table 5　Regression model analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F*值	*P*值	显著性
模型	1598.79	14	114.2	131.14	<0.0001	**
A	96.46	1	96.46	110.78	<0.0001	**
B	53.56	1	53.56	61.5	<0.0001	**
C	10.96	1	10.96	12.59	0.0032	**
D	3.02	1	3.02	3.47	0.0837	
AB	5.19	1	5.19	5.97	0.0285	*
AC	4.44	1	4.44	5.1	0.0404	*
AD	1.75	1	1.75	2.01	0.1783	
BC	8.13	1	8.13	9.33	0.0086	**
BD	0.0281	1	0.0281	0.0323	0.8599	
CD	0.7152	1	0.7152	0.8213	0.3801	
A^2	913.09	1	913.09	1048.56	<0.0001	**
B^2	393.77	1	393.77	452.19	<0.0001	**
C^2	359.01	1	359.01	412.28	<0.0001	**
D^2	477.31	1	477.31	548.12	<0.0001	**
残差	12.19	14	0.8708			
失拟项	6.1	10	0.6101	0.4007	0.8902	
纯误差	6.09	4	1.52			
总离差	1610.98	28				

注：**差异极显著，*P*<0.01；*差异显著，*P*<0.05。

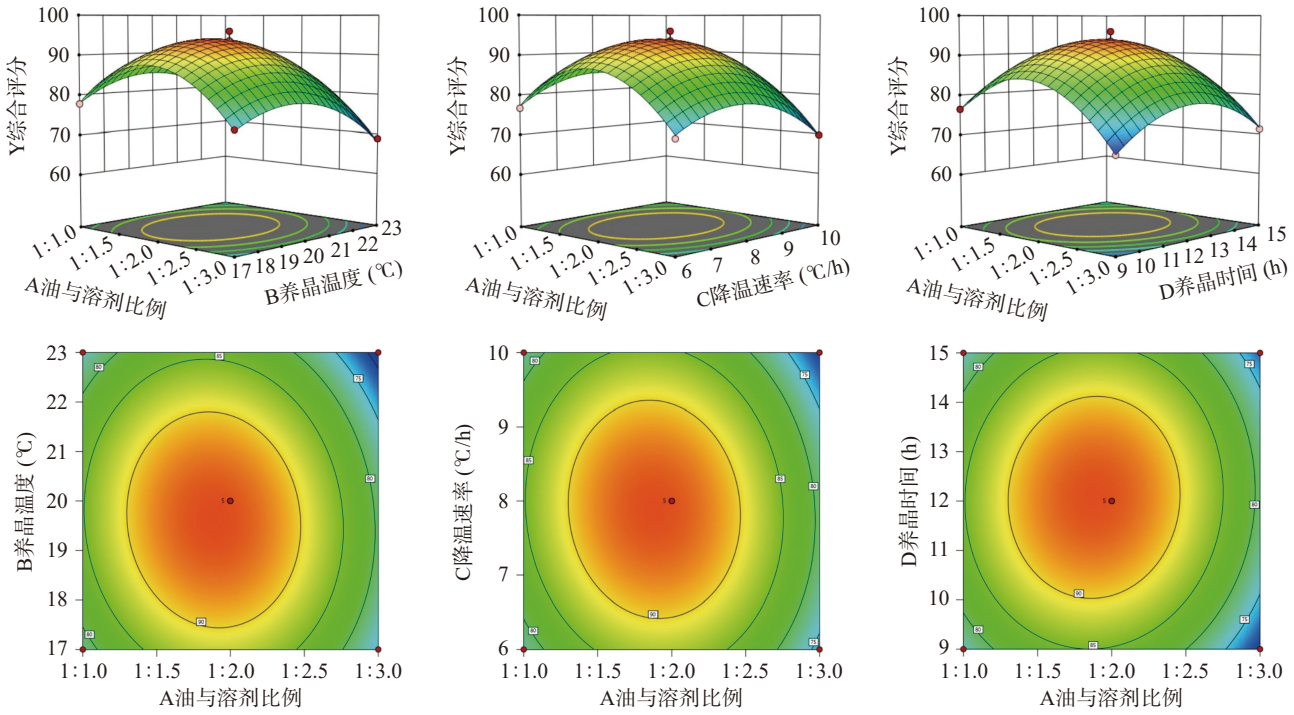
因素并未对模型的构建产生显著影响，因此该模型拟合良好[34]，可以有效地反映因素对综合评分的影响。各因素对综合评分的影响顺序为：油与溶剂比例(A)>养晶温度(B)>降温速率(C)>养晶时间(D)；观察各因素的 *P* 值可以发现一次项 A、B、C 均呈现极显著影响(*P*<0.01)，二次项 A^2、B^2、C^2、D^2 具有极显著影响(*P*<0.01)，模型中的交互项 AB、AC 影响显著(*P*<0.05)，BC 影响极显著(*P*<0.01)，表明因素与综合评分之间并非只是单一的线性关系。

干法分提协同溶剂法工艺优化的 3D 响应面图和等高线图可以直观地反映油与溶剂比例、养晶温度、降温速率、养晶时间对综合评分的影响及交互作用。曲面越陡，等高线越密集，影响越显著；等高线呈圆形表明两因素之间交互作用不明显，等高线呈明显椭圆表明两因素之间交互作用明显[35−36]。本模型的 3D 响应面图和等高线图见图 6。由图可知，AB、AC、BC 的响应面图曲面比较陡，等高线密集呈现椭圆，说明油与溶剂比例与养晶温度、油与溶剂比例与降温速率、养晶温度与降温速率交互作用较强，对综合评分影响显著；AD、BD、CD 响应面图平缓，等高线稀疏且呈现圆形，表明油与溶剂比例与养晶时间、养晶温度与养晶时间、降温速率与养晶时间交互作用不明显，对综合评分的影响较弱。上述分析结果与方差分析中各交互项的显著性检验结果一致。

2.3.1.2　最佳工艺验证实验　通过 Design-Expert 13 预测处理得到最佳结果，预测所得最佳分提工艺条件为：溶剂与油比例 1∶1.891，养晶温度 19.599 ℃，降温速率 7.863 ℃/h，养晶时间 12.075 h，综合评分为 94.146。考虑到实际操作的可行性，将最佳分提工艺参数调整为：溶剂与油比例 1∶2，养晶温度 20 ℃，降温速率 8 ℃/h，养晶时间 12 h。在该条件下，进行 3 次验证实验，分提所得固脂得率为 33.23%、熔点为 50.1 ℃、过氧化值为 0.02 mg/g、酸价为 0.42 mg/g、综合评分为 93.88，结果见表 6，相对标准偏差(RSD)为 0.42%，表明实际值与预测值非常接近，说明该工艺条件稳定，重复性好，具有实际应用价值。

2.4　理化指标分析

对分提前后羊臀脂的理化性质进行分析检测，结果见表 7，可知分提后得到的 28S 和 20S 的各项理化指标相较于原脂均有显著变化(*P*<0.05)。28S 与原脂相比，过氧化值显著降低为 0.048 mg/g(*P*<0.05)；酸价显著降低为 0.54 mg/g(*P*<0.05)；丙二醛



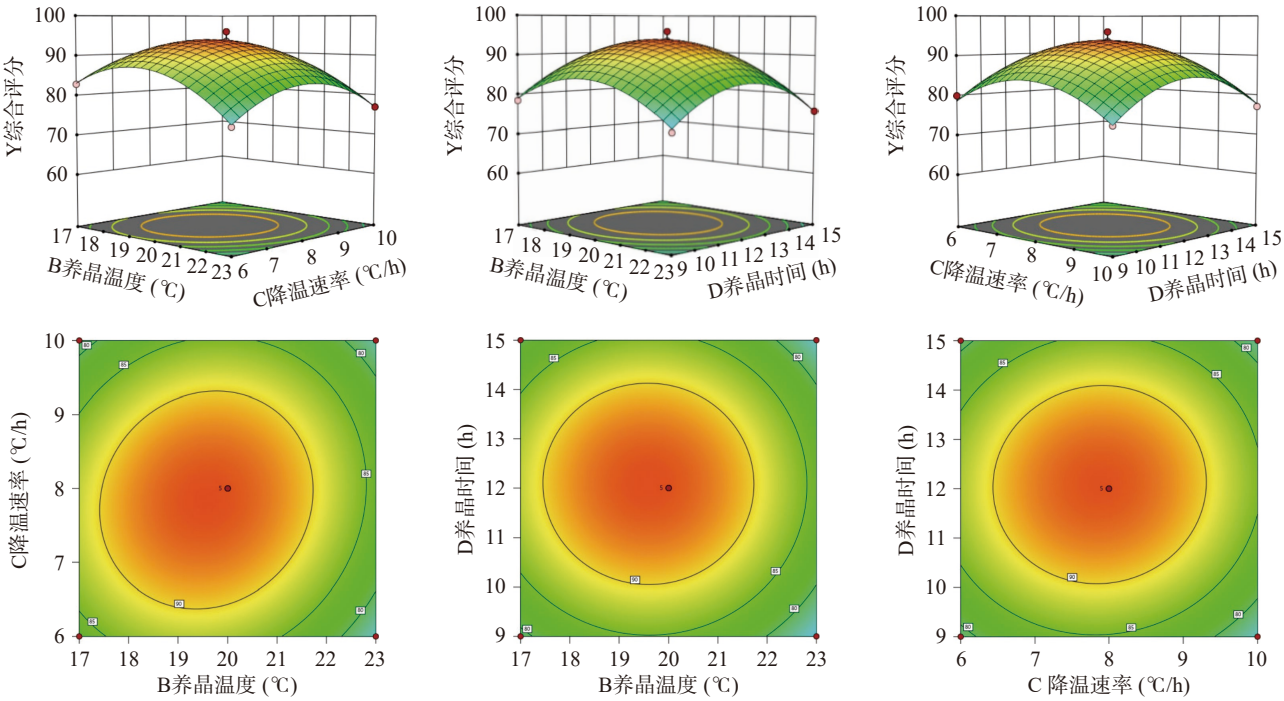


图 6 不同因素对综合评分的影响

Fig.6 Influence of different factors on the overall score

表 6 验证实验结果

Table 6 Results of validation tests

实验号	固脂得率 (%)	固脂熔点 (℃)	过氧化值 (mg/g)	酸价 (mg/g)	综合评分
1	33.50	49.4	0.022	0.42	94.08
2	32.80	50.4	0.023	0.43	93.43
3	33.40	50.5	0.024	0.40	94.13
平均值	33.23	50.1	0.020	0.42	93.88

表 7 分提前后羊臀脂的理化指标

Table 7 Physicochemical indexes of sheep buttock fat before and after fractionation

理化指标	原脂(分提前)	28℃固脂(28S)	分提后固脂(20S)
水分(%)	0.47±0.03^a	0.22±0.02^b	0.22±0.01^b
过氧化值(mg/g)	0.06±0.002^a	0.048±0.003^b	0.025±0.003^c
酸价(mg/g)	0.7±0.05^a	0.54±0.04^b	0.44±0.03^c
碘值(g/100 g)	52.19±1.96^a	46.72±1.37^b	42.42±1.99^c
皂化值(mg/g)	202.03±1.55^a	197.65±0.88^b	195.38±1.55^c
丙二醛(nmol/mL)	2.49±0.10^a	2.18±0.12^b	1.94±0.12^c

显著降低为 2.18 nmol/mL(P<0.05)，与过氧化值和酸价的变化结果一致；碘值显著降低为 46.72 g/100 g (P<0.05)；皂化值降低为 197.65 mg/g(P<0.05)。干法分提协同溶剂法得到的 20S 与 28S 相比，过氧化值从 0.048 mg/g 显著降低为 0.025 mg/g(P<0.05)；酸价从 0.54 mg/g 显著降低为 0.44 mg/g(P<0.05)，远低于 GB 10146-2015《食品安全国家标准 食用动物油脂》最高限(2.50 mg/g 和 2 mg/g)[37]；丙二醛从 2.18 nmol/mL 显著降低为 1.94 nmol/mL(P<0.05)，说明相较于干法分提，溶剂的加入显著提高了高熔点羊油组分的氧化稳定性，碘值从 46.72 g/100 g 显著降低为 42.42 g/100 g(P<0.05)，表明溶剂的加入更利于固脂的结晶，显著提高了高熔点羊油组分的饱和程度，这与表 8 饱和脂肪酸的变化趋势一致；皂化值从 197.65 mg/g 显著降低为 195.38 mg/g(P<0.05)，碘值的降低会提高 20S 的饱和脂肪酸含量，从而使其平均相对分子量更高，导致皂化值相对较低，皂化性较好[38]。综合以上分析可知，阿勒泰羊臀脂经干法分提协同溶剂法分提得到的高熔点羊油组分的各项理化指标均有显著变化，油脂品质较好。

2.5 脂肪酸组成分析

分提前后羊臀脂中的主要脂肪酸组成及含量如表 8 所示，可以发现一共检测出 12 种脂肪酸。原脂中棕榈酸、硬脂酸等饱和脂肪酸占比约 43.94%；油酸、棕榈油酸等不饱和脂肪酸占比约 53.25%。分提得到的 28S 和 20S 与原脂相比饱和脂肪酸含量都显著升高(P<0.05)，分别升高了 3.86%、19.27%，说明该分提工艺可以显著富集固脂中的饱和脂肪酸。28S 与原脂相比，主要饱和脂肪酸的含量均有显著变化：肉豆蔻酸升高了 0.14%，棕榈酸升高了 1.26%，硬脂酸升高了 2.28%；主要不饱和脂肪酸也有相似的显著变化(P<0.05)：油酸降低了 2.99%，亚油酸降低了 0.32%，这是因为饱和脂肪酸熔点较高，在冷却过程中先析出晶体形成固脂，从而使得到的固脂中的饱和脂肪酸含量增加，说明干法分提在提升固脂饱和度方面有一定作用，研究人员[39−40]均在干法分提过程中得到一致研究结果。20S 与 28S 相比，饱和脂肪酸含量进一步升高，从 47.8% 升高到 63.21%，呈显著差异(P<0.05)，其中肉豆蔻酸从 2.87% 升高到 3.13%，棕榈酸由 23.36% 升高到 27.86%，硬脂酸从 16.95% 升高到 27.01%；不饱和脂肪酸显著降低(P<0.05)，

从 49.61% 降低到 34.61%，其中油酸从 36.56% 降低到 25.37%，棕榈油酸从 2.79% 降低到 2.19%，亚麻酸从 1.38% 降低到 0.91%。分提前后主要变化的脂肪酸是硬脂酸、棕榈酸和油酸，这是因为硬脂酸和棕榈酸熔点较高，油酸熔点较低，因此在分提后固脂中的含量呈显著变化，符合其他研究者的观点[41]。相较于单一的干法分提所得高熔点羊油组分，干法分提协同溶剂法使饱和脂肪酸被进一步高度富集，溶剂的加入提高了分提效率，得到更高纯度的高熔点羊油组分，Zhang 等[42] 研究发现高熔点分提组分具有很好的延展性，适合开发高温煎炸油、起酥油、代可可脂等特种油脂和更高附加值的产品。因此，高熔点羊油组分具有独特的应用价值。

表 8　分提前后羊臀脂的脂肪酸组成

Table 8　Fatty acid composition of sheep buttock fat before and after fractionation

脂肪酸(%)	原脂(分提前)	28℃固脂(28S)	分提后固脂(20S)
肉豆蔻酸	2.73±0.01^{c}	2.87±0.00^{b}	3.13±0.01^{a}
肉蔻油酸	0.34±0.00^{a}	0.31±0.00^{b}	0.20±0.00^{c}
十五(烷)酸	1.47±0.01^{a}	1.48±0.00^{a}	1.44±0.01^{b}
棕榈酸	22.10±0.01^{c}	23.36±0.03^{b}	27.86±0.19^{a}
棕榈油酸	2.92±0.01^{a}	2.79±0.00^{b}	2.19±0.01^{c}
十七(烷)酸	2.97±0.01^{c}	3.14±0.00^{b}	3.77±0.03^{a}
硬脂酸	14.67±0.04^{c}	16.95±0.02^{b}	27.01±0.25^{a}
反-9-十八稀酸	4.00±0.01^{a}	4.00±0.01^{a}	2.92±0.05^{b}
油酸	39.55±0.00^{a}	36.56±0.00^{b}	25.37±0.16^{c}
反亚油酸	0.96±0.00^{a}	0.91±0.00^{b}	0.67±0.01^{c}
亚油酸	3.98±0.01^{a}	3.66±0.01^{b}	2.42±0.01^{c}
亚麻酸	1.50±0.01^{a}	1.38±0.00^{b}	0.91±0.00^{c}
饱和	43.94±0.02^{c}	47.80±0.01^{b}	63.21±0.49^{a}
不饱和	53.25±0.01^{a}	49.61±0.01^{b}	34.61±0.13^{c}

3　结论

本研究通过单因素与响应面试验，以固脂得率、熔点、过氧化值和酸价为指标优化干法分提协同溶剂法分提工艺，并对比分析分提前后羊臀脂的理化特性与脂肪酸组成变化。结果表明：分提工艺最佳条件为油与溶剂比例 1∶2、养晶温度 20 ℃、降温速率 8 ℃/h、养晶时间 12 h，在此条件下分提所得固脂得率为 33.23%、熔点为 50.1 ℃、过氧化值为 0.02 mg/g、酸价为 0.42 mg/g、综合评分为 93.88。分提所得高熔点羊油组分各项理化指标表现较好，氧化稳定性有明显提升，符合食用动物油的食品安全国家标准；相较于单一干法分提，干法分提协同溶剂法分提工艺可以更为显著地富集饱和脂肪酸，所得高熔点羊油组分的饱和脂肪酸含量升高到 63.21%，显著提高 15.41%（P<0.05），为富集饱和脂肪酸提供新思路，同时为高附加值的羊油副产品及特殊用途油脂的深入开发与合理应用提供理论依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 张韶清，徐红仙，黄秋霞，等. 羊油综合开发利用研究进展[J]. 化学工程与装备，2024(8)：165−167. [ZHANG S Q, XU H X, HUANG Q X, et al. Research progress on comprehensive development and utilization of sheep oil[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2024(8): 165−167.]

[2] 于俊飞，周建中，张可洋，等. 靶向代谢组学分析阿勒泰羊臀脂与分提产物对小鼠盲肠短链脂肪酸的影响[J]. 食品与发酵工业，2026, 52(6)：182−191. [YU J F, ZHOU J Z, ZHANG K Y, et al. Targeted metabolomics reveals effects of Altay sheep tail fat fractions on cecal short-chain fatty acids in mice[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(6): 182−191.]

[3] 李涛，卢岩，陈卫林，等. 哈萨克羊不同部位脂肪溶剂法分提产物的性质分析[J]. 现代食品科技，2018, 34(4)：81−87. [LI T, LU Y, CHEN W L, et al. Fractionated extrative property analysis of different parts of fat fromhazake sheep by solvent extraction[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(4): 81−87.]

[4] 刘丹，何鑫，李涛，等. 不同品种脂臀羊尾脂品质的比较分析[J]. 现代食品科技，2019, 35(4)：244−249,300. [LIU D, HE X, LI T, et al. Comparative analysis of the quality of different varieties of fat buttocks[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 244−249,300.]

[5] 万力婷. 高熔点棕榈油分提物的体内外代谢机制及其对肠道菌群的影响研究[D]. 广州：华南理工大学，2021. [WAN L T. Metabolic mechanisms of a high melting point palm oil fraction *in vitro* and *in vivo* and its effects on gut microbiota[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.]

[6] 韩山山，孟宗，李进伟，等. 磷脂与游离脂肪酸对油脂烟点和氧化稳定性的影响[J]. 中国油脂，2014, 39(4)：23−26. [HAN S S, MENG Z, LI J W, et al. Effects of phospholipids and free fatty acids on smoke point andoxidative stability of oils[J]. China Oils and Fats, 2014, 39(4): 23−26.]

[7] 叶展，罗舒凡，吕亚萍，等. 食用油脂热烹饪油烟组分特征、健康风险及其影响因素的研究进展[J]. 食品科学，2024, 45(12)：324−339. [YE Z, LUO S F, LÜ Y P, et al. Research progress in the compositional characteristics, health risks and influential factors of cooking oil fume[J]. Food Science, 2024, 45(12): 324−339.]

[8] 马欣，徐泽权，朱明睿，等. 溶剂法分提对阿勒泰羊臀脂的脂肪酸分布及其对小鼠血脂水平影响机制[J]. 食品科学，2025, 46(17)：153−160. [MA X, XU Z Q, ZHU M R, et al. Mechanistic studies on the effects of solvent fractionation on the fatty acid distribution of Altay sheep tail fat and blood lipids in mice[J]. Food Science, 2025, 46(17): 153−160.]

[9] 任航歧，刘霖泽，王露，等. 苏尼特羊尾油的多级干法分提及理化性质分析[J]. 食品与发酵工业，2026, 52(4)：303−310. [REN H Q, LIU L Z, WANG L, et al. Multi-step dry fractionation and physicochemical property analysis of tail oil of Sunit sheep[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(4): 303−310.]

[10] SALAS J J, BOOTELLO M A, MARTÍNEZ-FORCE E, et al. Production of stearate-rich butters by solvent fractionation of high stearic-high oleic sunflower oil[J]. Food Chemistry, 2011, 124(2): 450−458.

[11] REN Q X, FU L, DUDU O E, et al. New insights into the digestion and bioavailability of a high-melting-temperature solid triacylglycerol fraction in bovine milk fat[J]. Food & Function, 2021, 12(12): 5274−5286.

[12] IBRAHIM A P, OMILAKIN R O, BETIKU E. Optimization of microwave-assisted solvent extraction of non-edible sandbox (*Hura crepitans*) seed oil: A potential biodiesel feedstock[J]. Renewable Energy, 2019, 141: 349−358.

[13] 王锦涛，刘权辉，吴玲艳，等. 羊油干法分提条件对其得率、熔点及脂肪酸组成的影响[J]. 中国油脂，2026, 51(2)：69−74. [WANG Jintao, LIU Quanhui, WU Lingyan, et al. Effects of dry fractionation conditions of mutton tallow on its yield, melting point and fatty acid composition[J]. China Oils and Fats, 2026, 51(2): 69−74.]

[14] 谢琦楠, 王承潇, 韩伟. 基于 AHP-CRITIC 赋权结合响应面法多指标优选醉鱼草的微波提取工艺[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(4): 486−496. [XIE Q N, WANG C X, HAN W. Optimization of microwave extraction process for *Buddleja lindleyana* based on AHP-CRITIC weighting combined with response surface methodology for polydactyly standard[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 51(4): 486−496.]

[15] MORANO C, CAS M D BERGAMASCHI R F, et al. Fractioning and compared 1H NMR and GC-MS analyses of lanolin acid components[J]. Molecules, 2023, 28(4): 1635.

[16] LEE D H, HA N, BU Y M, et al. Neuroprotective effect of *Buddleja officinalis* extract on transient middle cerebral artery occlusion in rats[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2006, 29(8): 1608−1612.

[17] IDE T. γ-Linolenic acid-rich oil- and fish oil-induced alterations of hepatic lipogenesis, fatty acid oxidation, and adipose tissue mRNA expression in obese KK-A^{y} mice[J]. Journal of Oleo Science, 2023, 72(3): 313−327.

[18] REBECHI S R, VÉLEZ M A, VAIRA S, et al. Adulteration of argentinean milk fats with animal fats: Detection by fatty acids analysis and multivariate regression techniques[J]. Food Chemistry, 2016, 192(2): 1025−1032.

[19] 李峰. 高 sn-2 位 DHA 结构甘油三酯的分析、制备及理化性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [LI F. Analysis, preparation, and physicochemical properties of high Sn-2 DHA specific-structured triacylglycerol[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]

[20] JIANG Yifan, SU Mengke, YU Ting, et al. Quantitative determination of peroxide value of edible oil by algorithm-assisted liquid interfacial surface enhanced Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128709.

[21] 邢田, 韩玲, 余群力, 等. 牛油的干法分提工艺优化及其对脂肪酸组成的影响[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(6): 1−6. [XING T, HAN L, YU Q L, et al. Optimization of tallow dry separation process and its effecton fatty acid composition[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2020, 56(6): 1−6.]

[22] SAADI S, ARIFFIN A A, GHAZALI H M, et al. Application of differential scanning calorimetry (DSC), HPLC and pNMR for interpretation primary crystallisation caused by combined low and high melting TAGs[J]. Food Chemistry, 2012, 132(1): 603−612.

[23] 徐子扬. 高油酸植物油在加热过程中的组分变化与评价[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [XU Z Y. Analysis and evaluation on the changes of components in high oleic vegetable oils during thermal treatment[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]

[24] 薛森, 何新益, 李旭, 等. 鸡油加工过程中产品品质的变化[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 163−166. [XUE M, HE X Y, LI X, et al. Studies on quality change of chicken oil in processing[J]. Food and Machinery, 2019, 35(2): 163−166.]

[25] 许建鑫, 杨扬, 刘慧婷, 等. 液态羊尾油的分离提取及质量评定[J]. 核农学报, 2024, 38(11): 2183−2190. [XU J X, YANG Y, LIU H T, et al. Isolation and quality evaluation of liquid lamb tail oil[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(11): 2183−2190.]

[26] 张东明, 马美湖. 干法分提制备液化猪油工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(14): 78−84. [ZHANG D M, MA M H. Preparation of liquefied lard by dry fractionation[J]. Food Science, 2012, 33(14): 78−84.]

[27] PETRARU A, AMARIEI S, SENILA L. Flaxseed oilcake: An ingredient with high nutritional value in the realization of innovative food products[J]. Foods, 2025, 14(7): 1087.

[28] ZHOU S, LEE Y Y, XIE X D, et al. Characterization, fractionation, and compatibility properties of *Litsea cubeba* kernel oil with potential value for industrial application as a lauric acid-based oil source[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 194(11): 116295.

[29] 陈娜. 金枪鱼油精制及鱼油挥发性成分分析研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2016. [CHEN N. Preparation and analysis of the volatile components of tuna oil[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2016.]

[30] 贾晓童. 羊油品质改良关键技术开发[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024. [JIA X T. Development of key technology for improving quality of sheep oil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.]

[31] HARRISON P D, SMITH K W, BHAGGAN K, et al. Image analysis of palm oil crystallisation as observed by hot stage microscopy[J]. Journal of Crystal Growth, 2016, 444: 28−38.

[32] 李鹏, 孙京新, 王宝维, 等. 干法分提鸡油的贮藏稳定性[J]. 肉类研究, 2018, 32(7): 54−58. [LI P, SUN J X, WANG B W, et al. Storage stability of chicken fat obtained by dry fractionation[J]. Meat Research, 2018, 32(7): 54−58.]

[33] 刘嘉琪, 杨涛, 缪芝硕, 等. 响应面优化栀子果实不同部位油脂提取工艺及其脂肪酸分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 114−121,128. [LIU J Q, YANG T, MIU Z S, et al. Optimization of extraction technologies of different parts of *Gardenia jasminoides* oils by response surface methodology and their fatty acids analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(23): 114−121,128.]

[34] 赵旭珠, 赵静, 靳春平, 等. 响应面法优化低熔点牛油的分提工艺[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(1): 55−58,63. [ZHAO X Z, ZHAO J, JIN C P, et al. Optimization of fractionation process of low melting point beef tallow by response surface method[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(1): 55−58,63.]

[35] 麻成金, 吴竹青, 黄伟, 等. 响应面法优化茶叶籽油超临界二氧化碳萃取工艺[J]. 食品科学, 2011, 32(20): 108−113. [MA C J, WU Z Q, HUANG W, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction process for tea seed oil by using response surface methodology[J]. Food Science, 2011, 32(20): 108−113.]

[36] 邓楚津, 刘书成, 陶柳清, 等. 溶剂法提取火龙果籽油工艺优化及其理化性质[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 184−189. [DENG C J, LIU S C, TAO L Q, et al. Optimization of extraction with the solvent method and physicochemical properties of pitaya seed oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 184−189.]

[37] 曾志龙, 潘玥蒙, 薛怡, 等. 不同部位羊油的挥发性风味物质和理化性质比较[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 269−277. [ZENG Z L, PAN Y M, XUE Y, et al. Volatile flavor compounds and physicochemical properties of sheep fat in different parts[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(7): 269−277.]

[38] 王玉丹, 马玉莹, 韩玲, 等. 水酶法提取羊油的工艺优化及理化分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(2): 200−208. [WANG Y D, MA Y Y, HAN L, et al. Optimization of aqueous-enzymatic extraction process and physical and chemical analysis of sheep oil[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(2): 200−208.]

[39] 孙美青. 牦牛乳脂肪干法分提及分提物性质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. [SUN M Q. Study on yak milk fat dry fractionation and properties of the fractions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.]

[40] 宦慧琳, 邵昱龙, 崔利敏, 等. 无水黄油干法分提组分特性研究[J]. 中国油脂, 2025, 50(10): 122−128. [HUAN H L, SHAO Y L, CUI L M, et al. Characteristics of dry fractionated fraction of anhydrous butter[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(10): 122−128.]

[41] YANG X, SAUNDERS A, MOHAN M S. Effect of temperature on the rheological, textural, and sensory properties of butters from New Zealand market[J]. Journal of Texture Studies, 2024, 55(4): e12859.

[42] ZHANG X, LIN L, HE X, et al. Comparative analysis of thermal behavior, isothermal crystallization kinetics and polymorphism of palm oil fractions[J]. Molecules, 2013, 18(1): 1036−1052.