

超临界 CO₂ 萃取苹果籽油工艺优化 及其品质分析

苟丽娜, 曾朝珍, 康三江

(甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 系统比较超临界 CO₂ 萃取与传统溶剂萃取对苹果籽油质量的关键理化指标的影响, 为选择合适的萃取工艺和开发高品质苹果籽油提供科学依据。以红富士苹果籽为原料, 通过单因素试验及正交试验优化了超临界 CO₂ 萃取工艺条件, 分别采用超临界 CO₂ 萃取和石油醚萃取提取苹果籽油, 并对其理化指标和脂肪酸组成进行系统比较。结果表明, 超临界 CO₂ 萃取最佳工艺条件为萃取压力 30 MPa、萃取温度 55 °C、萃取时间 2.0 h、CO₂ 流量 25 L/h, 苹果籽油得率达 23.72%。理化指标分析结果显示, 与传统溶剂萃取相比, 超临界 CO₂ 萃取的苹果籽油具有较低的过氧化值(0.70 g/kg)和较高的皂化值(189 mg/g), 表明其具有更好的稳定性和较高的长链脂肪酸含量。脂肪酸分析结果表明, 2 种萃取方法所得苹果籽油的脂肪酸组成相似, 均以不饱和脂肪酸为主, 主要包括亚油酸(51.973%~52.050%)和油酸(36.206%~36.293%)。综上所述, 超临界 CO₂ 萃取法在提升苹果籽油品质方面具有一定优势, 适用于生产高品质苹果籽油产品。

关键词: 苹果籽油; 超临界 CO₂ 萃取; 工艺优化; 理化特性; 脂肪酸组成

中图分类号: TS225.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)05-0452-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.05.011

Optimization of Supercritical CO₂ Extraction of Apple Seed Oil and Its Quality Analysis

GOU Lina, ZENG Chaozhen, KANG Sanjiang

(Agricultural Product Storage and Processing Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences,
Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: To systematically compare the effects of supercritical CO₂ extraction and traditional solvent extraction on key physicochemical indicators of apple seed oil quality, in this study, red Fuji apple seeds were used as raw materials, and apple seed oil was extracted using two methods: supercritical CO₂ extraction and petroleum ether extraction, aiming to provide scientific evidence for selecting appropriate extraction technologies and developing high-quality apple seed oil. The physicochemical properties and fatty acid composition of the extracted oils were systematically compared. The supercritical CO₂ extraction process conditions were optimized through single-factor and orthogonal experiments. Results showed that extraction pressure, temperature, and extraction time had significant effects on the oil yield. The optimal extraction conditions were determined as follows: extraction pressure of 30 MPa, extraction temperature of 55 °C, extraction time of 2.0 hours, and CO₂ flow rate of 25 L/h. Under these conditions, the maximum oil yield reached 23.72%. Analysis of physicochemical properties revealed that the apple seed oil extracted via supercritical CO₂ exhibited a lower peroxide value (0.70 g/kg) and a higher saponification value (189 mg/g), indicating better oxidative stability and a higher content of long-chain fatty acids. Fatty acid analysis showed that the fatty acid composition of apple seed oil extracted by the two methods was similar, with unsaturated fatty acids being the major components. Linoleic acid (51.973% to 52.050%) and oleic acid (36.206% to 36.293%) were the primary fatty acids. In conclusion, supercritical CO₂ extraction demonstrated certain advantages in improving the quality of apple seed oil and is suitable for producing high-quality apple seed oil products.

Key words: Apple seed oil; Supercritical CO₂ extraction; Process optimization; Physicochemical property; Fatty acid composition

苹果(*Malus domestica*)是全球重要的经济作物之一, 我国的苹果产量居世界首位^[1]。随着苹果

收稿日期: 2025-04-03

基金项目: 甘肃省农业农村厅科技项目(GNKJ-2024-42); 国家苹果产业技术体系(CARS-27-2025)。

作者简介: 苟丽娜(1990—), 女, 甘肃白银人, 研究实习员, 研究方向为农产品贮藏与加工。Email: goulina189@163.com。

通信作者: 康三江(1977—), 男, 甘肃陇西人, 研究员, 研究方向为农产品贮藏与加工。Email: kang58503@163.com。

深加工产业的快速发展, 大量苹果籽作为加工副产物被废弃, 不仅造成资源浪费, 还可能对环境造成污染^[2]。研究发现, 苹果籽中含有丰富的亚油酸、油酸等不饱和脂肪酸, 对降低血脂和改善心血管健康具有积极作用^[3], 多酚、植物甾醇及维生素 E 等活性物质在延缓衰老、调节免疫力以及美容价值等方面具有重要作用^[4-6]。此外, 苹果籽油可通过调节氧化应激反应和炎症反应, 预防慢性疾病^[7]。目前, 苹果籽油在食品、化妆品及医药领域展现出广阔的应用前景^[5-6]。因此, 开发苹果籽的高附加值利用途径, 对促进苹果产业可持续发展具有重要战略意义。

超临界 CO₂ 萃取技术作为一种绿色高效的提取方法, 已成功应用于多种植物油脂的提取过程。与传统溶剂萃取相比, 超临界 CO₂ 萃取具有提取效率高、产品氧化风险低、对不饱和脂肪酸等功能性成分可以实现选择性分离等显著优势^[8]。萃取压力、温度、时间及 CO₂ 流量等工艺参数对苹果籽油的得率和品质有决定性影响, 因此工艺优化对提高产品质量至关重要^[9-10]。目前, 已有研究采用响应面法(RSM)对超临界 CO₂ 萃取苹果籽油的工艺条件进行了初步优化, 获得了较佳的萃取条件^[3]。已有的研究表明, 优化后的苹果籽油超临界 CO₂ 萃取条件工艺参数范围为苹果籽粉粒度 50~60 目、萃取压力 24~41 MPa、萃取温度 30~56 ℃、CO₂ 流量 20~25 L/h、萃取时间 90~140 min、籽油得率 21.73~24.36%^[11-13]。然而, 现有研究多集中于单一萃取工艺下的产油率分析, 缺乏对不同萃取方法的系统比较, 特别是超临界 CO₂ 萃取与传统溶剂萃取在苹果籽油理化特性方面的差异研究较少。因此, 本研究通过单因素试验和正交试验优化超临界 CO₂ 萃取苹果籽油的工艺条件, 同时对比分析超临界 CO₂ 萃取与石油醚萃取 2 种方法获得的苹果籽油在理化指标和脂肪酸组成方面的差异, 旨在为选择合适的萃取工艺和开发高品质苹果籽油提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

红富士苹果籽购于天水长城果汁集团有限公司。CO₂ 气体(纯度 99.9%)购于兰州裕隆气体股份有限公司, 石油醚(分析纯)购于广州市科玛化学

技术有限公司, 用于脂肪酸分析的标准品(如亚油酸、油酸、棕榈酸等)购于 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

HA220-50-06 型超临界 CO₂ 萃取设备购自南通市华安超临界萃取有限公司, TRACE ISQ 型三重四级杆气质联用仪购自美国赛默飞世尔科技公司, JC-FW-400A 粉碎机购自青岛聚创嘉恒分析仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 苹果籽预处理 苹果籽原料通过清洗、晾干和筛选处理去除杂质后, 再用净化水冲洗, 自然风干。然后经机械破壳处理后, 采用精粉碎工艺加工成 60 目粒径粉体样品, 所得样品置于 4 ℃避光贮存。

1.3.2 单因素试验 试验以萃取压力(20、25、30、35、40 MPa)、萃取温度(35、40、45、50、55 ℃)、CO₂ 流量(15、20、25、30、35 L/h)、萃取时间(1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h)为影响因素, 在恒定参数分别为萃取温度 50 ℃、CO₂ 流量 25 L/h、萃取时间 2.0 h、萃取压力 30 MPa, 考察各因素对苹果籽油得率的影响^[4,9]。

1.3.3 超临界 CO₂ 萃取苹果籽油工艺条件的优化 根据苹果籽油超临界 CO₂ 萃取试验的单因素研究结果, 以萃取压力(A)、萃取温度(B)、萃取时间(C)为变量, 建立 3 因素 3 水平 L₉(3³)正交体系。对超临界 CO₂ 萃取工艺的各参数进行考察, 以苹果籽油得率为指标, 对其进行直观分析和方差分析。因素水平设计见表 1。为检验正交试验结果的可信度, 于最佳超临界 CO₂ 萃取苹果籽油工艺条件下提取苹果籽油, 重复 3 次, 计算苹果籽油得率。

苹果籽油得率 = $\frac{m}{M} \times 100\%$

式中, *m* 为苹果籽油质量; *M* 为苹果籽质量。

表 1 试验因素与水平表

水平	因素		
	A /(萃取压力/MPa)	B /(萃取温度/℃)	C /(萃取时间/h)
1	20	45	2.0
2	25	50	2.5
3	30	55	3.0

1.3.4 超临界 CO₂ 萃取与常规萃取苹果籽油成分

的比较分析 超临界 CO₂ 萃取法: 定量称取 200 g 处理后的苹果籽粉, 转移至超临界流体萃取仪萃取釜中, 萃取条件为萃取压力 30 MPa、萃取温度 55 ℃、萃取时间 2.0 h、CO₂ 流量 25 L/h。常规萃取采用索氏抽提法^[14], 使用石油醚作为溶剂, 提取条件为 80 ℃、6.0 h、料液比 1:8(g/mL), 萃取后通过旋转蒸发仪去除溶剂, 得到苹果籽油。对 2 种方法提取得到的苹果籽油酸价、皂化值、过氧化值、碘值等理化指标及脂肪酸组成进行测定和比较。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 苹果籽油基础理化指标测定 苹果籽油酸价参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》进行测定^[15], 过氧化值参照 GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》进行测定^[16], 皂化值参照 GB/T 5534—2024《动植物油脂 皂化值的测定》进行测定^[17], 碘值参照 GB/T 5532—2022《动植物油脂 碘值的测定》进行测定^[18]。

1.4.2 苹果籽油脂肪酸成分含量测定 苹果籽油脂肪酸组成参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》进行测定^[19]。样品经甲酯化处理后, 采用气相色谱法(GC)分析脂肪酸成分, 并使用面积归一化法计算各脂肪酸的相对含量^[19]。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件进行数据整理与作图, 使用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析, 采用 Duncan 多范围检验法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 萃取压力对苹果籽油得率的影响 由图 1 可以看出, 在保持其他参数恒定(萃取温度 50 ℃、CO₂ 流量 25 L/h、萃取时间 2.0 h)的条件下, 当萃取压力由 20 MPa 增加至 35 MPa, 苹果籽油得率先上升再下降, 在 25 MPa 时达到最大值, 为 23.41%。当萃取压力增加至 40 MPa 时, 得率出现轻微上升, 达到 22.80%。分析表明, 萃取压力 35 MPa 与 40 MPa 之间的苹果籽油得率差异不显著($P>0.05$)。因此, 选择 20、25、30 MPa 3 个水平进行正交试验。

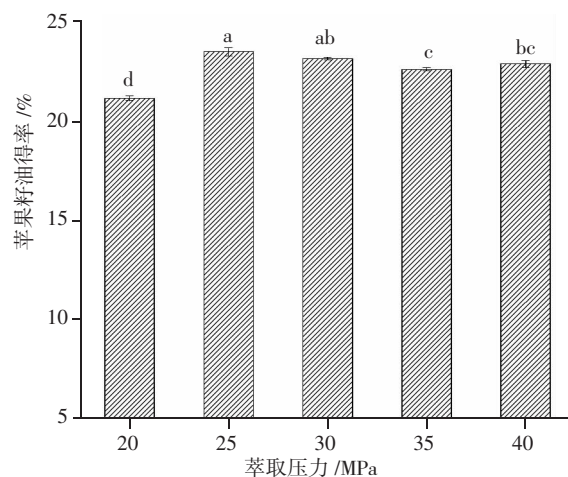


图 1 萃取压力对苹果籽油得率的影响

2.1.2 萃取温度对苹果籽油得率的影响 由图 2 可以看出, 在保持其他参数恒定(萃取压力 30 MPa、CO₂ 流量 25 L/h、萃取时间 2.0 h)的条件下, 萃取温度对苹果籽油脂得率具有显著调控作用。当萃取温度从 35 ℃升至 50 ℃, 苹果籽油得率由 21.82%增至 22.67%, 达到最高值; 当温度升至 55 ℃时, 得率略微下降至 22.57%。分析表明, 50 ℃条件下的苹果籽油得率显著高于 35、40、45 ℃($P<0.05$), 与 55 ℃之间的差异不显著($P>0.05$)。因此, 选择 45、50、55 ℃ 3 个水平进行正交试验。

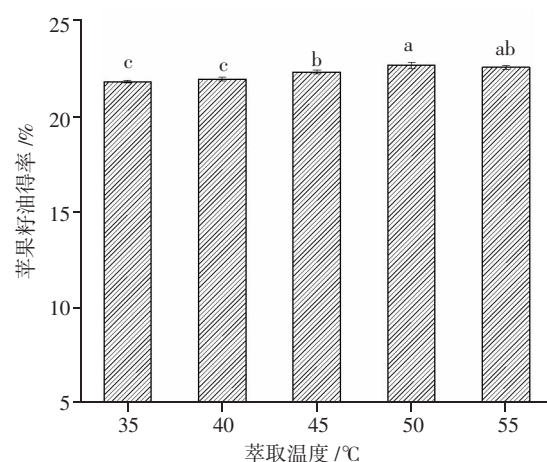


图 2 萃取温度对苹果籽油得率的影响

2.1.3 CO₂ 流量对苹果籽油得率的影响 由图 3 可以看出, 在保持其他参数恒定(萃取压力 30 MPa、萃取温度 50 ℃、萃取时间 2.0 h)的条件下, 随着 CO₂ 流量的增加, 苹果籽油得率呈现小幅上升趋势, 得率为 22.90%~22.99%。分析表明, 不同 CO₂ 流量条件下苹果籽油得率差异均不显著($P>$

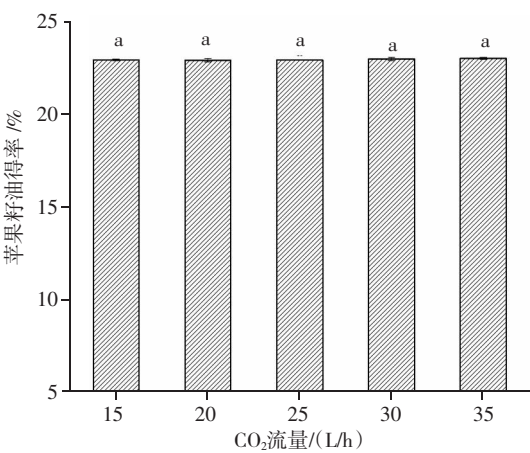


图 3 CO₂ 流量对苹果籽油得率的影响

0.05), 这表明在本试验设定的条件范围内, CO₂ 流量对苹果籽油得率的影响程度较小。综上所述, 在 CO₂ 流量 15 ~ 35 L/h 的条件下, CO₂ 流量对苹果籽油得率的影响相对有限, 表明在该范围内增加 CO₂ 流量并非提高萃取效率的决定性因素。从经济效益和资源节约的角度考虑, 选择 CO₂ 流量 15 ~ 25 L/h, 以实现经济高效且稳定的萃取效果。

2.1.4 萃取时间对苹果籽油得率的影响 由图 4 可以看出, 在保持其他参数恒定 (萃取压力 30 MPa、萃取温度 50 ℃、CO₂ 流量 25 L/h) 的条件下, 随着萃取时间的延长, 苹果籽油得率显著提高,

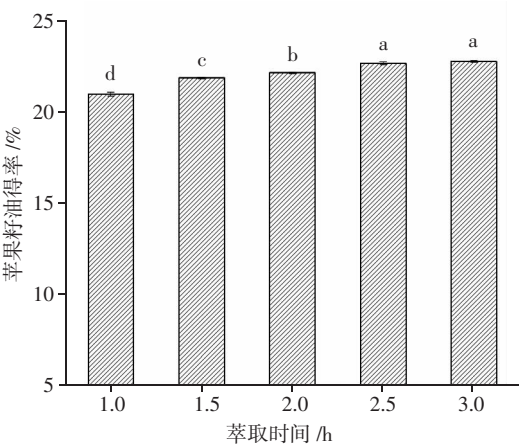


图 4 萃取时间对苹果籽油得率的影响

由萃取时间 1.0 h 的 20.94%提高至 3.0 h 的22.73%。分析表明, 萃取时间 2.5 h 与 3.0 h 之间的苹果籽油得率差异不显著 ($P>0.05$), 均显著高于 1.0、1.5、2.0 h ($P<0.05$); 1.0 h 和 1.5 h 条件下的苹果籽油得率显著低于其他萃取时间 ($P<0.05$)。延长萃取时间对提高苹果籽油得率具有明显效果, 但当萃取时间超过 2.5 h 后, 得率趋于稳定, 继续延长萃取时间对得率提升的边际效应减弱。因此, 选择 2.0、2.5、3.0 h 3 个水平进行正交试验。

2.2 超临界CO₂ 萃取苹果籽油工艺条件的优化

由表 2 可以看出, 各工艺要素对苹果籽油得率的影响大小顺序为 B>A>C。超临界 CO₂ 萃取苹果籽油体系的最优参数组合为 A₃B₃C₁。基于 SPSS 统计学软件对L₉(3³)正交矩阵数据的方差分析结果可知, 压力参数($F=100.630$, $P=0.010$)与温度参数($F=92.438$, $P=0.011$)均呈现显著影响(表 3)。

表 2 苹果籽油得率正交试验结果

序号	因素			苹果籽油得率/%
	A (萃取压力)	B (萃取温度)	C (萃取时间)	
1	1	1	1	21.16
2	1	2	2	21.79
3	1	3	3	22.51
4	2	1	2	21.96
5	2	2	3	22.89
6	2	3	1	23.67
7	3	1	3	22.60
8	3	2	1	23.34
9	3	3	2	23.59
K ₁	65.46	65.72	68.17	
K ₂	68.52	68.02	67.34	
K ₃	69.53	69.77	68.00	
k ₁	21.82	21.91	22.72	
k ₂	22.84	22.67	22.45	
k ₃	23.18	23.26	22.67	
R	1.02	1.35	0.28	

表 3 方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
萃取压力	2.994	2	1.497	100.630	0.010	*
萃取温度	2.751	2	1.375	92.438	0.011	*
萃取时间	0.128	2	0.064	4.307	0.188	
误差E	0.030	2	0.015			
综合T	4 607.716	9				

因此确定超临界 CO₂ 萃取苹果籽油最佳工艺条件为萃取压力 30 MPa、萃取温度 55 ℃、萃取时间 2.0 h。由表 4 可以看出, 在超临界 CO₂ 萃取苹果籽油最佳工艺条件下提取苹果籽油, 该工艺条件稳定可行, 优化后平均苹果籽油得率达 23.72%。

表 4 最佳工艺条件验证试验结果

重复	苹果籽油得率 /%
1	23.68
2	23.72
3	23.76
平均	23.72

2.3 超临界 CO₂ 萃取与常规萃取苹果籽油成分的比较分析

2.3.1 基本理化指标分析 由表 5 可以看出, 不同萃取方法所得苹果籽油的理化指标存在一定差异。超临界 CO₂ 萃取的苹果籽油酸价为 77.83 mg/g, 略高于石油醚萃取 (76.66 mg/g)。石油醚萃取的苹果籽油过氧化值为 1.69 g/kg, 显著高于超临界 CO₂ 萃取 (0.70 g/kg)。超临界 CO₂ 萃取的苹果籽油皂化值为 189 mg/g, 显著高于石油醚萃取 (181 mg/g)。超临界 CO₂ 萃取和石油醚萃取得到的苹果籽油碘值分别为 1 200、1 190 g/kg, 差异不显著。因此, 超临界 CO₂ 萃取法在提高苹果籽油品质方面具有一定优势, 尤其适用于获得更稳定、更优质的苹果籽油产品。

表 5 苹果籽油基本理化指标

组别	酸价 /(mg/g)	过氧化值 /(g/kg)	皂化值 /(mg/g)	碘值 /(g/kg)
超临界CO ₂ 萃取	77.83 a	0.70 b	189 a	1 200 a
石油醚萃取	76.66 a	1.69 a	181 b	1 190 a

2.3.2 脂肪酸含量分析 由表 6 可知, 超临界 CO₂ 萃取与石油醚萃取制备的苹果籽油脂肪酸组成相似, 主要由不饱和脂肪酸构成, 呈现相似的脂质特征。气相色谱检测表明, 2 种工艺产物的不饱和脂肪酸占比均超过 88%, 其中亚油酸 (C18 : 2) 与油酸 (C18 : 1) 为核心组分。超临界 CO₂ 萃取和石油醚萃取所得油脂中, 亚油酸 (C18 : 2) 的相对含量为 51.973% 和 52.050%, 油酸 (C18 : 1) 的相对含量为 36.293% 和 36.206%。此外, 棕榈酸 (C16 : 0) 作为主要的饱和脂肪酸, 在 2 种提取方法中的

表 6 苹果籽油脂肪酸组成

脂肪酸	相对含量/%	
	超临界CO ₂ 萃取	石油醚萃取
月桂酸(C12:0)	0.026	0.045
肉豆蔻酸(C14:0)	0.036	0.037
棕榈酸(C16:0)	7.107	7.105
棕榈油酸(C16:1)	0.075	0.071
十七碳酸(C17:0)	0.059	0.059
十七碳烯酸(C17:1)	0.038	0.037
十八碳酸(C18:0)	1.979	1.999
油酸(C18:1)	36.293	36.206
亚油酸(C18:2)	51.973	52.050
十八碳三烯酸(C18:3)	0.323	0.311
花生酸(C20:0)	1.233	1.25
花生烯酸(C20:1)	0.466	0.46
花生二烯酸(C20:2)	0.029	0.034
山嵛酸(C22:0)	0.363	0.336

相对含量均约为 7%。其他脂肪酸如月桂酸 (C12 : 0)、肉豆蔻酸 (C14 : 0) 和花生酸 (C20 : 0) 等的含量较低, 在 2 种提取方法中差异较小。分析表明, 超临界 CO₂ 与石油醚 2 种萃取体系下, 苹果籽油脂质谱特征呈现高度一致性。不饱和脂肪酸占比稳定在 88.2% ~ 88.5% 区间, 其中亚油酸 (51.973% ~ 52.050%) 与油酸 (36.206% ~ 36.293%) 构成核心功能组分。综上所述, 超临界 CO₂ 萃取法与石油醚萃取法得到的苹果籽油脂肪酸组成上的差异较小, 2 种方法所得苹果籽油具有相似的脂肪酸组成, 均表现出较高的营养价值和潜在的保健功能。

3 讨论与结论

超临界 CO₂ 萃取技术是一种经济实用的分离方法, 可以解决传统提取技术中存在的诸如有毒有机试剂的使用、高能源的使用以及萃取得率低等问题, 已广泛应用于食品加工中^[8]。影响超临界 CO₂ 萃取的因素主要有体系压力、CO₂ 流量、夹带剂、体系温度和溶质粒径等^[20-21]。葛邦国等^[12]用超临界 CO₂ 萃取苹果籽油, 得到最佳萃取条件为萃取压力 30 MPa、温度 35 ℃、萃取时间 90 min、CO₂ 流量 20 kg/h, 得率为 21.73%。杨继红等^[10]采用超临界 CO₂ 萃取苹果籽油, 结果表明最佳萃取条件为压力 35 MPa、萃取温度 30 ~ 35 ℃、

萃取时间 2 h、CO₂ 流量 25 kg/h, 此条件下的苹果籽油萃取率可达 22.85%。本研究优化后的最佳工艺条件为萃取压力 30 MPa、萃取温度 55 ℃、萃取时间 2.0 h、CO₂ 流量 25 L/h, 在该条件下, 苹果籽油得率达 23.72%, 高于葛邦国等^[12]、杨继红等^[10]的研究结果。

此外, 对于影响苹果籽油质量的关键理化指标(如酸价、过氧化值、皂化值及碘值)以及脂肪酸组成, 不仅直接反映苹果籽油的品质特性, 也是评价其营养价值和加工稳定性的重要依据^[6-7]。本研究理化指标分析结果显示, 超临界 CO₂ 萃取的苹果籽油酸价略高于石油醚萃取, 表明超临界 CO₂ 萃取得到的油脂中游离脂肪酸含量稍高, 这可能是由于超临界 CO₂ 萃取条件较为强烈, 部分脂肪酸可能在较高压力和温度条件下释放更充分, 导致酸价升高。超临界 CO₂ 萃取的苹果籽油具有较低的过氧化值(0.70 g/kg), 表明石油醚萃取的油脂在萃取或保存过程中更容易被氧化, 这可能与石油醚易残留、溶剂回收过程中加热时间较长有关, 而超临界 CO₂ 萃取在较低温度和无氧条件下进行, 有助于减少氧化反应的发生, 说明超临界 CO₂ 萃取得到的苹果籽油具有更好的抗氧化稳定性。此外, 超临界 CO₂ 萃取的皂化值较高, 为 189 mg/g, 说明其含有更多的长链脂肪酸。2 种方法提取苹果籽油的碘值接近, 说明所得油脂的不饱和度相似, 萃取方法对不饱和脂肪酸的影响较小。综合分析可知, 超临界 CO₂ 萃取法能够有效降低苹果籽油的过氧化值, 提升油脂的稳定性, 同时具有较高的皂化值, 表明其可能富含更多的长链脂肪酸。相比之下, 石油醚萃取法在萃取或保存过程中更容易引发氧化反应, 可能对油脂的品质产生不利影响。脂肪酸组成分析结果表明, 2 种萃取方法所得苹果籽油的脂肪酸组成差异较小, 均以不饱和脂肪酸为主, 主要包括亚油酸(51.973%~52.050%)和油酸(36.206%~36.293%), 其中饱和脂肪酸棕榈酸的含量约为 7%, 具有较高的营养价值和保健功能。

本研究对超临界 CO₂ 萃取和石油醚萃取 2 种方法提取苹果籽油的工艺及其理化特性进行了系统研究, 结果表明, 萃取压力、温度和时间对苹果籽油得率具有显著影响, CO₂ 流量对得率的影响

较小。在试验条件范围内, 最佳工艺条件为萃取压力 30 MPa、萃取温度 55 ℃、萃取时间 2.0 h、CO₂ 流量 25 L/h, 在此条件下, 苹果籽油得率达到 23.72%。综上所述, 超临界 CO₂ 萃取法在提升苹果籽油品质方面具有一定优势, 适用于生产高品质苹果籽油产品。

参考文献:

- [1] 杨泽华, 尹晓宁, 牛军强, 等. 苹果响应水涝胁迫的研究现状与进展[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(11): 981-987.
- [2] 赵雁武, 王宪伟, 黄滢璋, 等. 苹果籽油中植物甾醇抗氧化活性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(9): 221-226.
- [3] 陈芹芹, 李淑燕, 杨 阳, 等. 响应面法优化超声波辅助提取苹果籽油的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(5): 51-56.
- [4] 葛含静, 仇农学, 李志西. 苹果籽油超临界萃取及其特性研究[J]. 食品与发酵科技, 2009, 45(5): 24-28.
- [5] 赵雁武, 邓 红, 仇农学. 苹果籽油中脂肪酸及植物甾醇成分分析[J]. 中国油脂, 2012, 37(4): 81-83.
- [6] 仇农学, 高 霞. 苹果籽油的超声波辅助提取及理化性质分析[J]. 食品科学, 2007, 28(11): 50-55.
- [7] 葛含静. 苹果籽油提取、理化性质测定以及脂肪酸分析研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2006.
- [8] 温娅晴, 郭梦姚. 超临界二氧化碳萃取技术及其在油脂中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 286-295.
- [9] 杨继红. 苹果籽油 CO₂ 超临界萃取及微胶囊化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [10] 杨继红, 李元瑞, 蒋 晶. 苹果籽油的超临界 CO₂ 萃取及其脂肪酸含量分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 195-199.
- [11] 龚金炎, 潘惠慧, 傅艺杰, 等. 超临界 CO₂ 萃取苹果籽油的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2008(2): 174-177.
- [12] 葛邦国, 吴茂玉, 崔春红, 等. 苹果籽油的超临界 CO₂ 萃取及其抗氧化性和毒理性的研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(7): 77-79.
- [13] FERRENTINO G, GIAMPICCOLO S, MOROZOVA K, et al. Supercritical fluid extraction of oils from apple seeds: Process optimization, chemical characterization and comparison with a conventional solvent extraction[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,

- 2020, 64: 102428.
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中酸价的测定: GB 5009.229—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [16] 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. 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定: GB 5009.227—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 动植物油脂 皂化值的测定: GB/T 5534—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 动植物油脂 碘值的测定: GB/T 5532—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定: GB 5009.168—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 张景云, 赵奕斌, 吕晓莹, 等. 超临界 CO₂ 应用研究概述[J]. 上海塑料, 2024, 52(5): 22–30.
- [21] 张敏敏, 裴怀弟. 不同提取方法对甘肃紫斑牡丹籽油品质的影响[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(3): 245–248.

·公益广告·

全方位夯实粮食安全根基

全领域推进农业科技装备创新

全环节完善现代农业经营体系

全链条推进农业产业体系升级