

亚临界丁烷萃取沙棘籽油工艺优化 及多维品质分析

牛逍瞳^{1,2} 马 燕^{1,2} 杨域宁^{1,2} 张 婷^{1,2} 张 健^{1,2} 许铭强^{1,2}

(1. 新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091;

2. 新疆农副产品精深加工工程技术中心, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要: [目的] 探究亚临界丁烷萃取沙棘籽油的提取效果及品质。[方法] 以提取率为评价指标, 采用响应面法优化亚临界丁烷萃取沙棘籽油(Y-沙棘籽油)工艺条件, 并对比分析超临界CO₂萃取沙棘籽油(C-沙棘籽油)、超声辅助提取沙棘籽油(E-沙棘籽油)和传统溶剂提取沙棘籽油(S-沙棘籽油)的提取率、理化指标(酸价、过氧化值、碘值、皂化值、不溶性杂质)、脂肪酸组成、脂肪伴随物(维生素E、磷脂、生育酚、角鲨烯和甾醇)、总酚、总黄酮、DPPH自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率和FRAP抗氧化能力等多维品质指标。[结果] 沙棘籽原料经超微粉碎结合轧坯预处理的提取率为78.97%, 显著高于普通粉碎和超微粉碎预处理的。亚临界丁烷萃取沙棘籽油的最佳工艺参数为料液比1:10 (g/mL), 萃取时间64 min, 萃取温度52℃, 此条件下沙棘籽油提取率为95.21%, 较C-沙棘籽油、E-沙棘籽油和S-沙棘籽油的分别提高了5.54%, 3.21%, 1.25%。Y-沙棘籽油的碘值最高、皂化值最低; 沙棘籽油中的主要脂肪酸为亚油酸、 α -亚麻酸和棕榈酸; Y-沙棘籽油的维生素E含量为182.5 mg/100 g, 角鲨烯、总甾醇、总黄酮、总酚含量较高, DPPH自由基清除能力、ABTS⁺自由基清除能力和FRAP铁离子还原能力较强。[结论] 亚临界丁烷萃取所得沙棘籽油的理化性质较稳定, 且营养活性物质含量较多, 抗氧化能力强。

关键词: 沙棘籽油; 亚临界丁烷萃取; 响应面法; 品质

Optimization of subcritical butane extraction process for sea buckthorn seed oil and its multidimensional quality analysis

NIU Xiaotong^{1,2} MA Yan^{1,2} YANG Yuning^{1,2} ZHANG Ting^{1,2} ZHANG Jian^{1,2} XU Mingqiang^{1,2}

(1. Institute of Agro-products Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China;

2. Xinjiang Engineering Technology Center for Deep Processing of Main Agricultural Products, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: [Objective] To explore the extraction efficiency and quality of sea buckthorn seed oil obtained by subcritical butane extraction. [Methods] Taking extraction yield as the evaluation index, response surface methodology was adopted to optimize the process parameters for subcritical butane extraction of sea buckthorn seed oil (Y-sea buckthorn seed oil). The extraction yield, physicochemical properties (acid value, peroxide value, iodine value, saponification value, and insoluble impurities), fatty acid composition, lipid concomitants (vitamin E, phospholipids, tocopherols, squalene, and sterols), total phenols, total flavonoids, DPPH radical scavenging rate, ABTS⁺ radical scavenging rate, and FRAP antioxidant capacity were compared and analyzed across sea buckthorn seed oils extracted by supercritical CO₂ (C-sea buckthorn seed oil), ultrasonic-assisted extraction (E-sea buckthorn seed oil), and traditional solvent extraction (S-sea buckthorn seed oil).

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(编号: 2022B02005-3); 自治区公益性科研院所基本科研业务经费资助项目(编号: KY2022015)

通信作者: 马燕(1984—), 女, 新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所研究员, 博士。E-mail: 282568949@qq.com

收稿日期: 2024-11-29 **改回日期:** 2025-04-03

引用格式: 牛逍瞳, 马燕, 杨域宁, 等. 亚临界丁烷萃取沙棘籽油工艺优化及多维品质分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 186-195.

Citation: NIU Xiaotong, MA Yan, YANG Yuning, et al. Optimization of subcritical butane extraction process for sea buckthorn seed oil and its multidimensional quality analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 186-195.

[Results] The extraction yield of sea buckthorn seeds pretreated by ultrafine grinding combined with flaking was 78.97%, significantly higher than that obtained by conventional grinding or ultrafine grinding alone. The optimal extraction parameters for subcritical butane were as follows: a solid-to-liquid ratio of 1:10 (g/mL), extraction time of 64 min, and extraction temperature of 52 °C. Under these conditions, the extraction yield of sea buckthorn seed oil was 95.21%, which was 5.54%, 3.21%, and 1.25% higher than that of C-sea buckthorn seed oil, E-sea buckthorn seed oil, and S-sea buckthorn seed oil, respectively. Y-sea buckthorn seed oil had the highest iodine value and the lowest saponification value. The main fatty acids in sea buckthorn seed oil were linoleic acid, α -linolenic acid, and palmitic acid. The vitamin E content of Y-sea buckthorn seed oil was 182.5 mg/100 g, with relatively high content of squalene and total sterols. It also had the highest total flavonoid and total phenol content, as well as the strongest DPPH radical scavenging rate, ABTS⁺ radical scavenging rate, and FRAP antioxidant capacity. **[Conclusion]** Sea buckthorn seed oil obtained by subcritical butane extraction possesses relatively stable physicochemical properties, high levels of nutritional and bioactive substances, and strong antioxidant capacity.

Keywords: sea buckthorn seed oil; subcritical butane extraction; response surface methodology optimization; quality

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)又称醋柳、酸刺,为胡颓子科沙棘属落叶灌木^[1]。沙棘既是防风固沙、抗旱植物,也是药食同源植物,主要分布在中国新疆、内蒙古、山西等地^[2],其果实中含有丰富的维生素、黄酮、多酚等成分,备受消费者青睐^[3]。目前,沙棘加工产品主要有沙棘原浆、沙棘果粉、沙棘果汁、沙棘果油和沙棘籽油等。沙棘籽油作为沙棘加工副产物,富含不饱和脂肪酸、人体必需氨基酸、维生素等营养活性物质,并在抗氧化、抗衰老、抑制肿瘤、降血糖、免疫调节、改善肠道菌群、缓解心血管疾病、抗炎生肌等方面发挥了重要功效,被称为“液体黄金”^[4]。

目前,有关沙棘籽油的研究主要集中在原料品质分析、提取方法等方面。现沙棘籽油常见提取方法包括传统溶剂提取^[5]、超临界CO₂萃取^[6]和超声辅助提取等^[7];但传统溶剂提取存在有害物质残留^[8]、萃取效率低等缺点^[9];超临界萃取存在成本高^[10]、对某些极性化合物溶解度低^[11]等问题;超声辅助提取因受超声衰减因素的限制,对设备要求高,无法实现大规模工业化生产。亚临界萃取技术作为一种新兴的绿色提取技术,近年来被广泛应用于油脂加工等领域,具有提取效率高、无溶剂残留、营养成分保留率高且适合工业化生产的优势^[12-14],可有效弥补以上提取技术的不足。但采用亚临界萃取沙棘籽油的相关研究较少,且存在提取率低的问题。研究拟采用响应面法优化亚临界丁烷萃取沙棘籽油提取工艺参数,并考察亚临界丁烷萃取技术对沙棘籽油提取率、理化指标(酸价、过氧化值、碘值、皂化值等)、脂肪酸组成、脂肪伴随物(维生素E、磷脂、角鲨烯、植物甾醇)、活性物质(总黄酮、总酚)及抗氧化能力(DPPH自由基清除能力、ABTS⁺自由基清除能力和FRAP铁离子还原能力)多维品质指标的影响,以期对沙棘籽的高质化利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

沙棘籽:水分含量为(7.00±0.01) g/100 g,蛋白质含

量为(37.85±0.50) g/100 g,粗脂肪含量为(9.13±1.11) g/100 g,灰分含量为(2.53±0.03) g/100 g,市售;

芦丁标准品、Foline-phenol、没食子酸、抗坏血酸、水杨酸、1,1-二苯基-2-苦基肼(DPPH)、2,2-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS):分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

总抗氧化能力(FRAP法)试剂盒:苏州梦犀生物医药科技有限公司;

氢氧化钠、硫酸亚铁、无水乙醇:分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;

亚硝酸钠、碳酸钠、过硫酸钾:分析纯,广州市西陇化学试剂有限公司;

硝酸铝:分析纯,深圳市福林试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

破碎机:MY-610 SKG型,佛山艾诗凯奇电器有限公司;

超微粉碎机:DC500A型,浙疆武义鼎臧日用金属制品厂;

多功能轧坯机:OLFB型,枣阳市巨鑫机械有限公司;

亚临界丁烷萃取装置:CBE-10L型,河南省亚临界生物技术有限公司;

超临界CO₂萃取装置:TC-SFE-50-5-120S型,沈阳索福尔超临界萃取设备有限公司;

超声清洗装置:KQ3200E型,昆山超声仪器有限公司;

紫外—可见分光光度计:T9型,北京普析通用仪器有限责任公司;

气相色谱仪:Agilent gc7890型,美国安捷伦科技有限公司;

高效液相色谱仪:Agilent 1260型,美国安捷伦科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 沙棘籽油粉碎预处理 采用普通粉碎、超微粉碎

和粉碎结合轧坯 3 种方式对沙棘籽进行粉碎,确定提取率最高的粉碎方式。

1.3.2 沙棘籽油提取率 按式(1)计算提取率。

$$E_e = \frac{M_1}{M_{\text{seed}} \times X} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

E_e ——沙棘籽油提取率,%;

M_1 ——沙棘籽油的质量,g;

M_{seed} ——沙棘籽原料的质量,g;

X ——沙棘籽含油率,%。

1.3.3 沙棘籽油提取工艺

(1) 亚临界萃取(Y-沙棘籽油):准确称取 300 g 沙棘籽粉,根据响应面优化试验得到的最佳工艺参数进行亚临界萃取沙棘籽油,用棕色瓶于 4℃贮藏备用。

(2) 超临界 CO₂ 萃取(C-沙棘籽油):参照宋美玲^[6]的方法并略作调整。准确称取 300 g 沙棘籽粉,于萃取流量 32 kg/h、萃取压力 25 MPa、萃取温度 45℃、萃取时间 2 h 下萃取沙棘籽油,用棕色瓶于 4℃贮藏备用。

(3) 超声辅助提取(E-沙棘籽油):参照赵鹤鹏等^[15]的方法并略作调整。准确称取 300 g 粉碎过 40 目的沙棘籽粉,于料液比($m_{\text{粉末}}:V_{\text{二氯甲烷}}$)1:12 (g/mL)、超声时间 4 h、超声温度 50℃、超声功率 622 W 下提取沙棘籽油,用棕色瓶于 4℃贮藏备用。

(4) 传统溶剂提取(S-沙棘籽油):参照闫克玉等^[16]的方法并略作调整。称取 300 g 粉碎过 60~80 目的沙棘籽粉,于料液比($m_{\text{粉末}}:V_{\text{石油醚}}$)1:12 (g/mL)、提取温度 85℃、提取时间 6 h 下提取沙棘籽油,用棕色瓶于 4℃贮藏备用。

1.3.4 单因素试验

(1) 破碎方式:参照连四超等^[17]的方法略作修改。在料液比 1:12 (g/mL),萃取时间 60 min,萃取温度 50℃下,考察超微粉碎、粉碎结合轧坯、普通粉碎 3 种破碎方式对沙棘籽油提取率的影响。

(2) 料液比:采用粉碎结合轧坯的破碎方式,在萃取时间 60 min,萃取温度 50℃下,考察料液比[1:4,1:8,1:12,1:16,1:20,1:24(g/mL)]对沙棘籽油提取率的影响。

(3) 萃取时间:采用粉碎结合轧坯的破碎方式,在料液比 1:12 (g/mL),萃取温度 50℃下,考察萃取时间(40,50,60,70,80,90 min)对沙棘籽油提取率的影响。

(4) 萃取温度:采用粉碎结合轧坯的破碎方式,在料液比 1:12 (g/mL),萃取时间 60 min 下,考察萃取温度(20,30,40,50,60,70℃)对沙棘籽油提取率的影响。

1.3.5 响应面试验 基于单因素试验结果,采用粉碎结合轧坯的破碎方式,以料液比、萃取时间和萃取温度为影响因素,沙棘籽油提取率为响应值,进行三因素三水平响

应面试验优化亚临界丁烷萃取沙棘籽油工艺。

1.3.6 沙棘籽油基本理化指标测定

(1) 酸价:按 GB 5009.229—2016 执行。

(2) 过氧化值:按 GB 5009.227—2023 执行。

(3) 碘值:按 GB/T 5532—2022 执行。

(4) 皂化值:按 GB/T 5534—2008 执行。

(5) 水分及挥发物:按 GB 5009.236—2016 执行。

(6) 不溶性杂质:按 GB/T 15688—2008 执行。

1.3.7 沙棘籽油脂肪酸组成测定 根据 GB 5009.168—2016 略作修改。色谱柱为 HP-5ms Ultra Inert(30 μm×250 μm×0.25 μm);柱温箱初始温度 150℃,5 min;以 2℃/min 升至 220℃,保持 2 min;以 10℃/min 升至 250℃,保持 15 min;进样口温度 260℃,分流进样,传输线温度 240℃;扫描范围 30~600 aum;离子源温度 230℃,四极杆温度 150℃,溶剂延迟 3 min。依照标品出峰时间判定脂肪酸类别,并采用峰面积归一法计算脂肪酸含量。

1.3.8 沙棘籽油脂肪伴随物成分测定

(1) 维生素 E:参照 GB 5009.82—2016 和温运启等^[18]的方法略作修改。称取 0.5 g 样品,加入一定量的正己烷,超声 5 min,定容至 10 mL,摇匀,过 0.22 μm 有机滤头至进样小瓶中进行 HPLC 检测。流动相为正己烷—异丙醇($V_{\text{正己烷}}:V_{\text{异丙醇}}$ 为 99:1);流速 0.8 mL/min;进样量 10 μL;柱温 40℃;荧光检测器,激发波长 298 nm,发射波长 325 nm。

(2) 磷脂:参照 GB/T 5537—2008 中的钼蓝比色法。

(3) 角鲨烯:根据 LS/T 6120—2017 和张善英等^[19]的方法略作修改。在装有火焰离子化检测器和 HP-5 柱(30 m×0.32 mm,0.25 μm)的气相色谱仪上分析样品。氮气作为载气,流速 1 mL/min。不分流,进样量 1.0 μL,进样口温度 250℃,FID 300℃,100℃保持 5 min;以 25℃/min 升至 180℃,保持 1 min;以 10℃/min 升至 280℃。

(4) 植物甾醇:根据 NY/T 3111—2017 和张娜^[20]的方法略作修改。色谱条件:MRM 方法,色谱柱为 SH-Rxi-5Sil MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm);进样量 1 μL;升温程序:40℃保持 3 min,4℃/min 升至 120℃,6℃/min 升至 240℃保持 12 min,进样口温度 320℃,离子源温度 250℃,延迟 10 min; m/z 为 50~650;进样量 1.0 μL;分流比 80:1;载气为氦气,载气流速 0.7 mL/min,采用内标法定量。

1.3.9 沙棘籽油活性物质及抗氧化能力测定

(1) 总黄酮、总酚含量:参照谭传波等^[21]的方法。

(2) DPPH 自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率和 FRAP 铁离子还原能力:参照韩蓉等^[22]的方法。

1.4 数据处理

采用 Design-Expert 8.6.0 软件进行响应面数据分析,其余数据采用 SPSS 22.0 软件进行处理,Origin 8.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 亚临界丁烷萃取沙棘籽油工艺优化

2.1.1 单因素试验 由图 1(a)可知,3种破碎方式所得沙棘籽油提取率差异显著($P<0.05$),其中粉碎结合轧坯预处理的最高,分别较超微粉碎、普通粉碎预处理的提高了 19.50% 和 23.44%。这是由于沙棘籽经粉碎和轧坯处理后不仅破坏了油料细胞壁,也使沙棘籽饼粕形成薄片状缩短了油相向外迁移路径,从而提高了油脂提取率^[23]。故选择粉碎结合轧坯作为沙棘籽油的较佳破碎方式。

由图 1(b)可知,随着料液比的增加,沙棘籽油提取率呈先上升后下降趋势,这是由于溶剂含量的增加提高了沙棘籽中的油脂转移效率。当料液比为 1:12 (g/mL) 时,提取率达最高,这是由于料液比提升至某一阈值时,溶剂与油脂分子间的相互作用力减弱,使提取效率趋近于平衡^[24]。因此,选择料液比为 1:8~1:16 (g/mL)。

由图 1(c)可知,随着萃取时间的延长,沙棘籽油提取率呈先下降后上升再下降趋势;这是由于萃取初期,沙棘

籽油的细胞结构尚未被充分破坏,内部油脂被包裹在细胞内,萃取溶剂难以快速、充分地油脂接触,当萃取时间为 50 min 时,提取率最低;当萃取时间为 70 min 时,提取率达最高,随着萃取时间的延长,溶剂对物料的浸泡和渗透作用持续进行,沙棘籽的细胞结构被完全破坏,使原先包裹在细胞内部难以被萃取的油脂充分释放出来,增加了与萃取溶剂的接触表面积,从而提高其提取率^[25]。当萃取时间为 70~90 min 时,提取率又呈下降趋势,这是由于随着萃取时间的延长,样品中的油脂已被充分提取完全,提取率不再增加。因此,萃取时间选择 70~90 min。

由图 1(d)可知,沙棘籽油提取率随萃取温度的增加而升高,当提取温度为 50 °C 时,提取率达最大,这是由于高温加速了溶剂分子与样品分子间的分子扩散运动,使油脂更易被萃取。当萃取温度 > 50 °C 时,提取率呈下降趋势,是由于萃取温度的升高加快了溶剂的挥发速率,导致萃取釜中丁烷分子气化加剧,使溶剂在萃取过程中受到损耗,从而影响了亚临界萃取沙棘籽油的能力,进而降低其提取率。因此,选择萃取温度为 40~60 °C。

2.1.2 响应面试验 基于单因素试验结果,以提取率为响应值,料液比、萃取时间和萃取温度为因素进行三因素三水平响应面优化试验。试验因素水平见表 1,试验设计及结果见表 2。

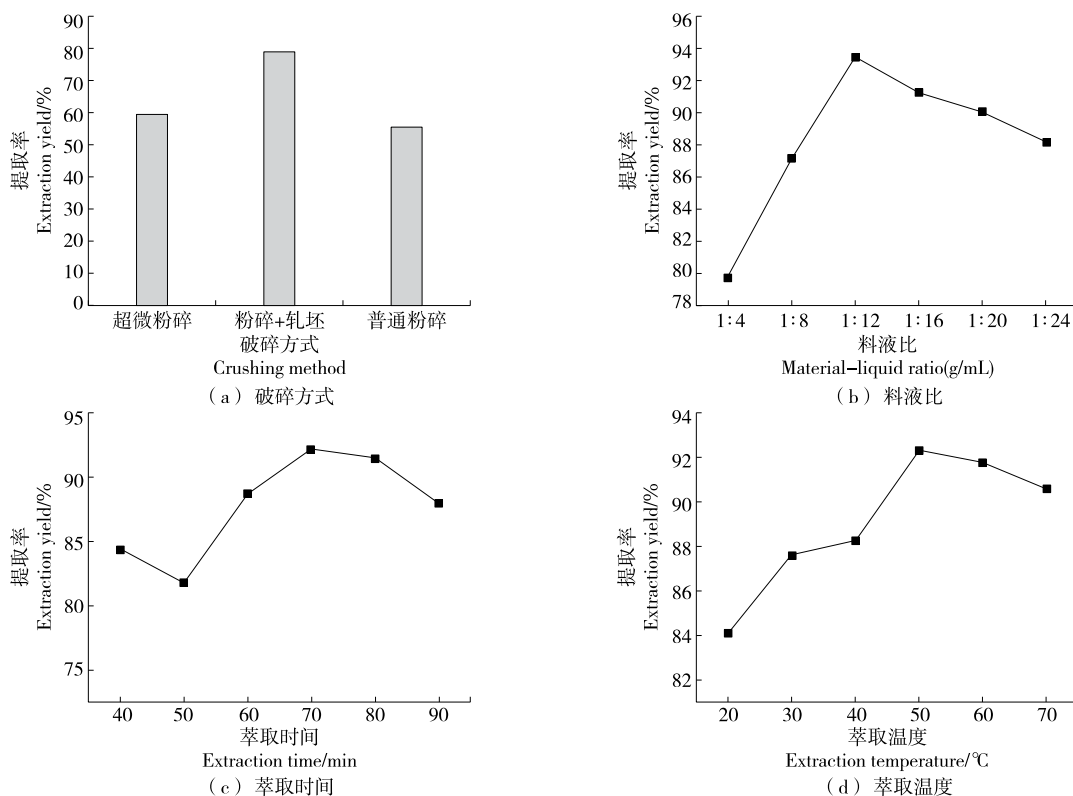


图 1 各因素对沙棘籽油提取率的影响

Figure 1 Effect of various factors on the extraction yield of sea buckthorn seed oil

表 1 响应面因素和水平

Table 1 Factors and levels of response surface methodology

水平	A 料液比(g/mL)	B 萃取时间/min	C 萃取温度/℃
—1	1:8	60	40
0	1:12	70	50
1	1:16	80	60

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Experimental design and results of response surface analysis

试验号	A	B	C	提取率/%
1	0	1	1	86.31
2	1	0	—1	83.46
3	0	—1	—1	88.94
4	0	0	0	92.00
5	1	1	0	93.10
6	0	0	0	93.98
7	0	0	0	92.88
8	0	0	0	94.63
9	—1	—1	0	87.84
10	—1	0	—1	80.61
11	0	1	—1	90.69
12	0	—1	1	89.38
13	—1	0	1	86.31
14	—1	1	0	87.40
15	1	0	1	79.30
16	1	1	0	81.93
17	0	0	0	95.07

通过 Design-Expert 对试验结果进行回归拟合分析, 得二次多项数学回归方程:

$$Y=94.70-0.55A-1.26B+0.13C-2.14AB-2.55AC-1.21BC-7.27A^2+0.13B^2-5.01C^2。$$
 (2)

表 3 方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	364.13	9	40.46	8.94	0.004 3	**
A	2.39	1	2.39	0.53	0.491 2	
B	12.07	1	12.07	2.67	0.146 4	
C	0.12	1	0.12	0.03	0.875 6	
AB	19.25	1	19.25	4.25	0.078 1	
AC	27.49	1	27.49	6.08	0.043 2	*
BC	5.81	1	5.81	1.28	0.294 5	
A ²	165.97	1	165.97	36.68	0.000 5	**
B ²	0.07	1	0.07	0.02	0.901 7	
C ²	105.89	1	105.89	23.40	0.001 9	**
残差	31.67	7	4.52			
失拟项	25.29	3	8.43	5.28	0.070 8	
纯误差	6.38	4	1.60			
总误差	395.80	16				

[†] *为差异显著($P<0.05$), **为差异极显著($P<0.01$); $R^2=0.92$ 。

由表 3 可知,失拟项 $P=0.070\ 8>0.05$,不显著,即模型成立; $R^2=0.92$,说明该模型拟合程度良好,试验误差小。因此,该模型可用来分析和预测亚临界萃取沙棘籽油提取率。二次项 A^2 、 C^2 对沙棘籽油提取率影响极显著 ($P<0.01$),交互项 AC 对沙棘籽油提取率影响显著 ($P<0.05$)。由 F 值可知,各因素对沙棘籽油提取率的影响大小依次为萃取时间>料液比>萃取温度。

由图 2 可知,当萃取时间一定时,沙棘籽油提取率随料液比和萃取温度的增加而增加,当料液比为 1:10 (g/mL),萃取温度为 51.28 ℃时,提取率最高,可能是由于料液比和萃取温度的交互效应所致。当料液比一定时,沙棘籽油提取率随萃取时间和萃取温度的增加而增大,当萃取时间为 63.56 min,萃取温度为 51.28 ℃时,提取

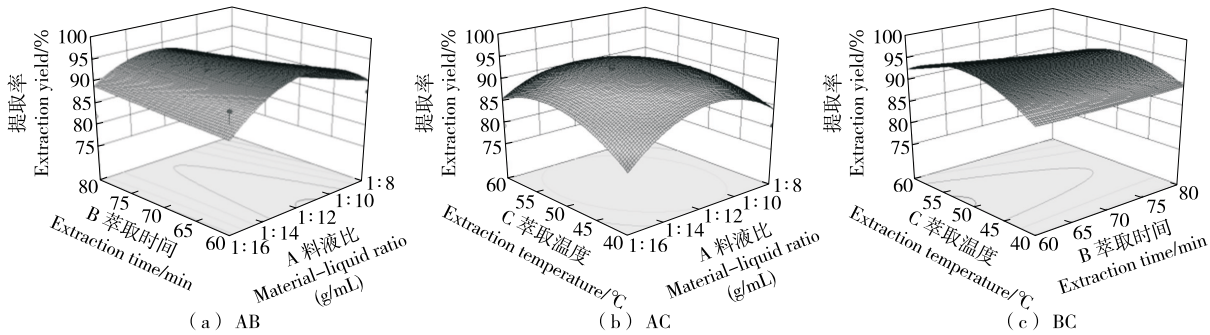


图 2 各因素交互作用对亚临界丁烷萃取沙棘籽油提取率影响的响应面图

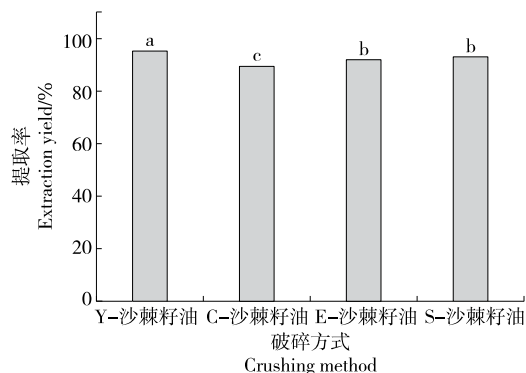
Figure 2 Response surface diagram of the effect of interaction of various factors on the extraction yield of sea buckthorn seed oil by subcritical butane extraction

率达最大。之后随着萃取时间和萃取温度的变化,由于物料已达质量传递平衡,提取率增加不明显。当萃取时间一定时,沙棘籽油提取率随料液比和萃取温度的增加而增加,当料液比为 1:10 (g/mL),萃取温度为 51.28 °C 时,提取率达最高,随后提取率降低。综上,料液比和萃取温度对沙棘籽油提取率影响显著,与误差分析结果一致。

2.1.3 验证实验 采用 Design-Expert 软件对回归模型进行分析,得到亚临界丁烷萃取沙棘籽油最佳工艺参数为料液比 1:10 (g/mL),萃取时间 63.56 min,萃取温度 51.82 °C,该条件下沙棘籽油提取率为 95.52%。考虑到实际操作情况,将最优工艺参数调整为料液比 1:10 (g/mL),萃取时间 64 min,萃取温度 52 °C,此时沙棘籽油提取率为 95.21%,与预测值拟合性良好,说明结果具有可靠性。

2.2 提取方式对沙棘籽油提取率的影响

由图 3 可知,Y-沙棘籽油的提取率最高,分别较 C-沙棘籽油、E-沙棘籽油和 S-沙棘籽油的提高了 5.54%,3.21%,1.25%。Y-沙棘籽油的提取时间也分别较 C-沙棘籽油、E-沙棘籽油和 S-沙棘籽油的缩短了 46.67%,73.33%,82.22%。此外,Y-沙棘籽油提取率较魏文慧等^[26]的超临界萃取法的提高了 1.44%,较冯丽丹等^[27]的亚临界流体 R134a 萃取法的提高了 15.51%;较 Isopencu 等^[28]的超声辅助提取法的提高了 7.81%。说明不同提取方法和相同提取方法溶剂介质不同均对沙棘籽油提取率有一定



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 不同提取方式沙棘籽油的提取率对比

Figure 3 Comparison of extraction yields of different extraction methods

影响,Y-沙棘籽油的提取效果显著优于其他提取方式。

2.3 亚临界丁烷萃取沙棘籽油的品质

2.3.1 理化特性 由表 4 可知,沙棘籽油的酸价、过氧化值、碘值、皂化值、不溶性杂质含量分别为 0.50~3.45 mg/g、0.19~0.37 g/100 g、147.85~148.85 g/100 g、185.58~186.46 mg/kg、0.047%,其中 Y-沙棘籽油的碘值最高,皂化值较低;酸价为 E-沙棘籽油>Y-沙棘籽油>S-沙棘籽油>C-沙棘籽油,过氧化值为 C-沙棘籽油>Y-沙棘籽油>S-沙棘籽油>E-沙棘籽油。不同提取方式的沙棘籽油理化指标均符合 T/ISAS 003—2021 的要求,也表明 Y-沙棘籽油具有较好的理化特性。

表 4 提取方式对沙棘籽油理化特性的影响[†]

Table 4 Effect of different extraction methods on physicochemical properties of sea buckthorn seed oil

沙棘籽油	酸价/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	过氧化值/ ($10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	碘值/ ($10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	皂化值/ ($10^{-2} \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	不溶性杂质/%
Y-沙棘籽油	2.20 ± 0.00^b	0.21 ± 0.00^b	148.85 ± 0.58	185.58 ± 1.98^b	0.047 ± 0.002
C-沙棘籽油	0.50 ± 0.01^d	0.23 ± 0.00^a	147.85 ± 1.82	186.46 ± 1.09^a	0.047 ± 0.001
E-沙棘籽油	3.45 ± 0.01^a	0.19 ± 0.00^{bc}	148.24 ± 1.10	186.08 ± 0.73^a	0.047 ± 0.002
S-沙棘籽油	1.45 ± 0.00^c	0.19 ± 0.00^c	148.09 ± 1.43	186.27 ± 1.49^a	0.047 ± 0.003

[†] 字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.2 营养指标

(1) 脂肪酸组成:由表 5 可知,沙棘籽油中含有 14 种脂肪酸,其主要脂肪酸为不饱和脂肪酸,主要由亚油酸、 α -亚麻酸、棕榈酸等组成。亚油酸和亚麻酸是人体必需脂肪酸,对机体细胞、代谢、生长发育以及预防心脑血管疾病等至关重要^[29]。C-沙棘籽油中的亚油酸含量显著高于其他方式 ($P < 0.05$),不同提取方式沙棘籽油的 α -亚麻酸含量差异不显著。Y-沙棘籽油中的棕榈酸、花生二烯酸含量显著高于其他提取方式的 ($P < 0.05$)。这与原料、提

取方式和检测方法等因素有关^[30]。

(2) 脂肪伴随物组成:维生素 E (V_E) 又称为生育酚,是人体所必需的脂溶性维生素,同时也是优质的抗氧化剂和营养剂,主要有 α 、 β 、 γ 、 δ 4 种构型,其中, α - V_E 的活性尤为突出,其抗氧化能力也处于最强水平^[31]。由表 6 可知,沙棘籽油中 V_E 含量为 182.5~216.5 mg/100 g,主要以 α - V_E 、 β - V_E 和 γ - V_E 3 种形式存在,且 α - V_E 含量最高,占 V_E 总量的 6.93%~8.77%。C-沙棘籽油的 V_E 与 α - V_E 含量最高,较曹昕琪^[32]的提高了 38.85 mg/100 g。这是由于超临

表 5 沙棘籽油中脂肪酸组成及含量[†]

Table 5 Composition and content of fatty acids in sea buckthorn seed oil

%

脂肪酸	Y-沙棘籽油	C-沙棘籽油	E-沙棘籽油	S-沙棘籽油
肉豆蔻酸	0.20±0.00 ^b	0.22±0.00 ^a	0.20±0.00 ^b	0.18±0.00 ^c
十五烷酸	0.14±0.00	0.14±0.01	0.15±0.00	0.14±0.00
棕榈酸	8.10±0.00 ^a	7.80±0.00 ^d	7.91±0.03 ^c	8.04±0.01 ^b
十七烷酸	0.05±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00
硬脂酸	2.82±0.02 ^b	2.98±0.01 ^a	3.00±0.10 ^a	2.82±0.01 ^b
花生酸	0.43±0.00 ^d	0.44±0.00 ^{ab}	0.45±0.01 ^a	0.43±0.00 ^d
山嵛酸	0.18±0.00 ^c	0.24±0.00 ^a	0.20±0.00 ^b	0.17±0.01 ^d
二十四烷酸	0.16±0.00 ^a	0.16±0.00 ^a	0.15±0.01 ^{ab}	0.13±0.00 ^b
棕榈油酸	0.50±0.00 ^b	0.51±0.01 ^a	0.46±0.00 ^c	0.47±0.00 ^c
油酸	13.30±0.00 ^b	13.50±0.00 ^a	13.00±0.00 ^c	13.35±0.01 ^b
二十碳一烯酸	0.23±0.01 ^{ab}	0.24±0.00 ^a	0.23±0.00 ^{ab}	0.22±0.00 ^b
亚油酸	47.30±0.00 ^c	49.60±0.00 ^a	49.45±0.01 ^b	47.40±0.00 ^c
α-亚麻酸	26.50±0.00 ^a	24.10±0.00 ^c	24.70±0.00 ^b	26.50±0.00 ^a
二十碳二烯酸	0.08±0.00 ^a	0.07±0.00 ^b	0.07±0.00 ^{ab}	0.07±0.00 ^{ab}
饱和脂肪酸	12.07±0.02	12.03±0.00	12.12±0.02	11.96±0.01
不饱和脂肪酸	87.91±0.00 ^b	88.02±0.00 ^a	87.91±0.00 ^b	88.01±0.00 ^a
单不饱和脂肪酸	14.03±0.01 ^a	14.25±0.01 ^a	13.69±0.00 ^b	14.04±0.01 ^a
多不饱和脂肪酸	73.88±0.00	73.77±0.00	74.22±0.00	73.97±0.00

† 同行字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

界萃取加速了V_E活性成分的提取效应,从而促进了V_E的溶出^[33]。此外,还与不同提取方式下沙棘籽油的氧化速率不同有关^[34]。磷脂在4种提取方式中均未检出,这与原料磷脂含量和提取方式对磷脂的溶解性大小有关,也与其未达到检测下限有关^[35]。

角鲨烯具有抗氧化、调节血脂、调节机体免疫力等作

用。沙棘籽油中角鲨烯含量为48.55~58.45 mg/kg,且Y-沙棘籽油>E-沙棘籽油>C-沙棘籽油>S-沙棘籽油。Y-沙棘籽油中角鲨烯含量显著高于其他3种提取方式($P<0.05$),与Catchpole等^[36]的研究结果相近,表明亚临界萃取更利于角鲨烯的溶出。

植物甾醇具有抗氧化、延缓衰老、降低慢性疾病等优

表 6 沙棘籽油中脂肪伴随物组成及含量[†]

Table 6 Composition and content of lipid concomitants in sea buckthorn seed oil

化合物	单位	Y-沙棘籽油	C-沙棘籽油	E-沙棘籽油	S-沙棘籽油
V _E	mg/100 g	182.50±4.95 ^b	216.50±2.12 ^a	185.50±7.78 ^b	206.00±2.83 ^a
α-V _E	mg/100 g	166.50±3.54 ^b	201.50±2.12 ^a	170.00±7.07 ^b	189.50±2.12 ^a
β-V _E	mg/100 g	22.40±1.56	22.30±0.99	23.60±0.99	22.85±1.20
γ-V _E	mg/100 g	47.60±0.99 ^b	37.85±0.78 ^c	34.10±1.13 ^d	53.40±0.85 ^a
磷脂	mg/g	—	—	—	—
角鲨烯	mg/kg	58.45±2.90 ^a	50.65±3.18 ^{bc}	57.45±2.33 ^{ab}	48.55±1.20 ^c
总甾醇	mg/kg	9 779.00±351.71 ^a	7 047.75±29.34 ^b	9 902.90±307.73 ^a	7 691.75±278.25 ^b
环阿屯醇	mg/kg	559.80±59.96 ^a	464.45±0.21 ^a	563.95±28.64 ^a	204.00±48.22 ^b
熊果醇	mg/kg	138.05±6.43 ^b	150.35±1.77 ^b	183.55±6.58 ^a	—
芸薹甾醇	mg/kg	378.50±1.98 ^a	275.50±0.99 ^b	418.00±35.78 ^a	391.25±22.42 ^a
高根二醇	mg/kg	180.35±13.08 ^a	144.00±7.35 ^b	182.40±4.81 ^a	—
β-谷甾醇	mg/kg	8 522.30±296.42 ^a	6 013.45±35.71 ^c	8 555.00±311.98 ^a	7 096.50±304.06 ^b

† “—”为未检出;同行字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

势。沙棘籽油是植物甾醇的主要来源之一。沙棘籽油中总甾醇含量为 7 047.75~9 779.00 mg/kg, 其中 Y-沙棘籽油的较高。Y-沙棘籽油、C-沙棘籽油、E-沙棘籽油中共检出 5 种植物甾醇单体, 而 S-沙棘籽油中仅检出 3 种, 这与提取溶剂的极性、提取条件(如温度、压力、时间等)或植物甾醇特性差异等因素有关。 β -谷甾醇含量在沙棘籽油植物甾醇中占比最高, 为 46.13%~43.57%。其中 Y-沙棘籽油中的 β -谷甾醇含量最高, 较微波预处理溶剂提取沙棘籽油^[37]的提高了 1.44~1.98 倍, 进一步说明亚临界萃取更有

利于 β -谷甾醇等活性成分的保留^[38]。

2.3.3 活性物质与抗氧化能力 由表 7 可知, Y-沙棘籽油中总黄酮与总酚含量显著高于 C-沙棘籽油、E-沙棘籽油和 S-沙棘籽油的。亚临界萃取条件相对温和, 可最大程度减少黄酮和总酚等热敏性成分的损失, 使其能更好地保留在沙棘籽油中。Y-沙棘籽油的 DPPH 自由基清除率、ABTS⁺ 自由基清除率和 FRAP 最高 ($P<0.05$), 这与总酚、总黄酮含量结果一致, 并与维生素 C 的抗氧化性最接近, 说明亚临界丁烷萃取沙棘籽油具有更好的抗氧化活性。

表 7 沙棘籽油抗氧化能力及活性物质含量[†]

Table 7 Antioxidant capacity and active substance content of sea buckthorn seed oil

沙棘籽油	总黄酮/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)	总酚/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)	DPPH 自由基清除率/%	ABTS ⁺ 自由基清除率/%	FRAP
Y-沙棘籽油	28.56±0.23 ^a	41.63±0.14 ^a	94.18±0.46	79.93±0.34 ^a	0.16±0.02 ^a
C-沙棘籽油	26.10±0.06 ^b	39.67±0.35 ^b	94.13±0.63	78.72±1.37 ^b	0.14±0.00 ^a
E-沙棘籽油	24.95±0.21 ^c	39.53±0.46 ^b	94.04±0.93	78.86±2.02 ^b	0.06±0.00 ^c
S-沙棘籽油	20.45±0.50 ^d	38.72±0.22 ^c	93.97±0.70	78.89±0.70 ^b	0.08±0.01 ^b

[†] 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

3 结论

亚临界丁烷萃取沙棘籽油的最佳工艺条件为料液比 1:10 (g/mL), 萃取时间 64 min, 萃取温度 52 ℃, 此条件下沙棘籽油提取率为 95.21%。该沙棘籽油中不仅含有较高含量的角鲨烯、甾醇、总黄酮、总酚等脂肪伴随物及抗氧化活性物质, 还具有较强的抗氧化能力 (DPPH 自由基清除能力、ABTS⁺ 自由基清除能力和 FRAP 铁离子还原能力)。亚临界丁烷萃取沙棘籽油的提取率显著高于亚临界流体 R134a 萃取的, 进一步说明相同提取方法的不同溶剂对沙棘籽油提取率有一定影响, 同时也证实了亚临界丁烷萃取沙棘籽油较亚临界 R134a 更适合。亚临界丁烷萃取条件温和、能更好地提高沙棘籽油的提取率并最大限度地保留多种营养活性成分, 提升油品品质, 是一种适合工业化生产的高效提取技术。后期可进一步探究亚临界丁烷萃取沙棘籽油贮藏期间维生素 E、角鲨烯、甾醇等主要营养功效组分和油品稳定性等的动态变化规律及其品质调控机理。

参考文献

- [1] ZHENG L, SHI L K, ZHAO C W, et al. Fatty acid, phytochemical, oxidative stability and in vitro antioxidant property of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) oils extracted by supercritical and subcritical technologies[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 507-513.
- [2] 陈奕璇, 郭佳琦, 关文强, 等. 沙棘综合开发利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(19): 201-207.

CHEN Y X, GUO J Q, GUAM W Q, et al. Research progress on comprehensive development and utilization of sea buckthorn[J]. Food Research and Development, 2023, 44(19): 201-207.

- [3] 王璇, 张志伟, 陈志玺, 等. 沙棘果食品开发利用研究进展与发展对策[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(1): 75-82.
- WANG X, ZHANG Z W, CHEN Z X, et al. Research progress and countermeasure on development and utilization of seabuckthorn berries in food[J]. Storage and Process, 2024, 24(1): 75-82.
- [4] KOSKOVAC M, CUPARA S, KIPIC M, et al. Sea buckthorn oil: a valuable source for cosmeceuticals[J]. Cosmetics, 2017, 4(4): 40.
- [5] ZANQUI A B, DA SILVA C M, DE MORAIS D R, et al. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) oil composition varies with changes in temperature and pressure in subcritical extraction with n-propane[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 87: 64-70.
- [6] 宋美玲. 超临界二氧化碳萃取沙棘籽油的工艺研究[J]. 食品工程, 2023(1): 22-24.
- SONG M L. Study on extraction technology of seabuckthorn seed oil by supercritical carbon dioxide[J]. Food Engineering, 2023(1): 22-24.
- [7] LIU Z G, MEI L J, WANG Q L, et al. Optimization of subcritical fluid extraction of seed oil from *Nitraria tangutorum* using response surface methodology[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(1): 168-174.
- [8] SEGLIŃA D, KRASNOVA I, GRYGIER A, et al. Unique bioactive molecule composition of sea buckthorn (*Hippophae*

- rhamnoides* L.) oils obtained from the peel, pulp, and seeds via physical "solvent-free" approaches[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2021, 98(10): 1 009-1 020.
- [9] 张晨, 孙晓娜. 山桐子鲜果中油脂的提取工艺优化及品质分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(3): 16-20.
- ZHANG C, SUN X N. Optimization of extraction process and quality analysis of oil from fresh fruit of *Idesia polycarpa*[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(3): 16-20.
- [10] 任飞, 韩发, 石丽娜, 等. 超临界 CO₂ 萃取技术在植物油提取中的应用[J]. 中国油脂, 2010, 35(5): 14-19.
- REN F, HAN F, SHI L N, et al. Application of supercritical CO₂ fluid extraction technology of vegetable oil[J]. China Oils and Fats, 2010, 35(5): 14-19.
- [11] 笄雄志, 郝小红, 张旗, 等. 油酸-甘油-无水乙醇共混体系与超临界 CO₂ 的相平衡[J]. 中国油脂, 2023, 48(5): 116-119.
- DA X Z, HAO X H, ZHANG Q, et al. Phase equilibrium of oleic acid-glycerol-anhydrous ethanol co-blended system with supercritical CO₂[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(5): 116-119.
- [12] 刘鑫, 朱丹, 牛广财, 等. 超声波-微波协同萃取沙棘籽油工艺优化[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 34-44.
- LIU X, ZHU D, NIU G C, et al. Process optimization of sea buckthorn seed oil by ultrasonic-microwave synergistic extraction[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 34-44.
- [13] 吴经芝, 吴红枚, 肖静晶, 等. 低温压榨-亚临界正丁烷提取光皮桃木油的理化性质及表征[J]. 中国油脂, 2023, 48(8): 14-18.
- WU J Z, WU H M, XIAO J J, et al. Physicochemical properties and characterization of *Cornus wilsoniana* fruit oil prepared by low temperature pre-pressing-subcritical n-butane extraction[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(8): 14-18.
- [14] 郭婷婷, 万楚筠, 黄凤洪. 亚临界 r134a-丁烷萃取菜籽饼中脂质微量成分工艺研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 108-111.
- GUO T T, WAN C Y, HUANG F H. Extraction of lipid minor compounds from rapeseed cake by subcritical r134a-butane[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(11): 108-111.
- [15] 赵鹤鹏, 刘佳南. 响应面法优化微波辅助提取沙棘籽油的工艺研究[J]. 吉林化工学院学报, 2019, 36(11): 17-21.
- ZHAO H P, LIU J N. Optimization of microwave assisted extraction of seabuckthorn seed oil by response surface method [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2019, 36 (11): 17-21.
- [16] 闫克玉, 杜紫娟. 正交试验法优化沙棘籽油的提取工艺[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(4): 31-34.
- YAN K Y, DU Z J. Optimization of extraction process of sea buckthorn oil by orthogonal design[J]. Food Research and Development, 2010, 31(4): 31-34.
- [17] 连四超, 刘玉兰, 陈璐, 等. 油莎豆油亚临界丁烷萃取条件优化及产品质量研究[J]. 中国油脂, 2022, 47(4): 9-14.
- LIAN S C, LIU Y L, CHEN L, et al. Optimization of subcritical butane extraction of *Cyperus esculentus* oil and product quality[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(4): 9-14.
- [18] 温运启, 刘玉兰, 王璐阳, 等. 不同食用植物油中维生素 E 组分及含量研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(3): 35-39.
- WEN Y Q, LIU Y L, WANG L Y, et al. Contents and components of vitamin E in different edible vegetable oils[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(3): 35-39.
- [19] 张善英, 郑丽丽, 艾斌凌, 等. 蒸汽爆破预处理对油茶籽水代法提油品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 124-130.
- ZHANG S Y, ZHENG L L, AI B L, et al. Effect of steam explosion pretreatment on quality of tea seed (*Camellia oleifera* *abel.*) oil obtained by aqueous extraction[J]. Food Science, 2019, 40(11): 124-130.
- [20] 张娜. 橄榄油制取及贮藏过程品质特性分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- ZHANG N. Study on quality characteristics analysis of olive oil during extraction and storage[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2023.
- [21] 谭传波, 田华, 赖琼玮, 等. 鲜榨山茶油中生物活性物质研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(11): 19-21.
- TAN C B, TIAN H, LAI Q W, et al. Research on bioactive substances from fresh pressed camellia oil[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(11): 19-21.
- [22] 韩蓉, 马燕, 敖羽, 等. 基于多元分析法综合评价新疆不同品种大果沙棘汁品质特性及加工适宜性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 322-332.
- HAN R, MA Y, AO Y, et al. Comprehensive evaluation of quality characteristics and processing suitability of different varieties of large-fruited sea buckthorn juice from Xinjiang using multivariate analysis method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 322-332.
- [23] 邓淑君. 油莎豆微波稳态化和亚临界萃取工艺研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2023.
- DENG S J. Study of microwave stabilization and subcritical fluid extraction processes for tiger nut[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2023.
- [24] ZHAO Z C, LIU X D, KANG D S, et al. Optimization of the subcritical butane extraction of tung oil and its mechanism analysis[J]. Processes, 2022, 10(6): 1 071.
- [25] PLANGKLANG T, KHUWIJITJARU P, KLINCHONGKON K, et al. Chemical composition and antioxidant activity of oil obtained from coconut meal by subcritical ethanol extraction [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(5): 4 128-4 137.
- [26] 魏文慧, 于长青, 张晓雪, 等. 超临界萃取沙棘籽油及脂肪酸组成研究[J]. 现代食品, 2019, 25(8): 160-165.
- WEI W H, YU C Q, ZHANG X X, et al. Research on

- supercritical fluid extraction of seabuckthorn seed oil and fatty acid composition[J]. *Modern Food*, 2019, 25(8): 160-165.
- [27] 冯丽丹, 盛文军, 毕阳, 等. R134a亚临界流体萃取沙棘籽油的工艺优化及品质评价[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(2): 240-245.
- FENG L D, SHENG W J, BI Y, et al. Processing optimization and quality evaluation of R134a subcritical fluid extraction of sea-buckthorn seeds oil[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(2): 240-245.
- [28] ISOPENCU G, STROESCU M, BROSTEANU A, et al. Optimization of ultrasound and microwave assisted oil extraction from sea buckthorn seeds by response surface methodology[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(1): e12947.
- [29] 刘国伟, 郭建章, 陈星, 等. 响应面法和人工神经网络对亚临界CO₂萃取红花籽油的建模与优化[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(10): 225-233.
- LIU G Y, GUO J Z, CHEN X, et al. Modeling and optimization of subcritical CO₂ extraction of safflower seed oil using response surface methodology and artificial neural networks[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(10): 225-233.
- [30] 邵佩, 张雨迎, 钟琳, 等. 薄荷油的提取、药理作用及微胶囊化研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(2): 235-240.
- SHAO P, ZHANG Y Y, ZHONG L, et al. Research progress on extraction, pharmacological effects and microencapsulation of peppermint oil[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(2): 235-240.
- [31] 李慕春, 阿不力孜·艾力, 邵佳丽, 等. 不同提取方法对沙棘籽油脂肪酸成分及元素迁移的影响[J]. *食品与发酵科技*, 2024, 60(1): 105-112.
- LI M C, ABULIZI A L, SHAO J L, et al. Effects of different extraction methods on fatty acid composition and element migration of sea buckthorn seed oil[J]. *Food and Fermentation Science Technology*, 2024, 60(1): 105-112.
- [32] 曹昕琪. 沙棘果油和沙棘籽油制备蛋黄酱及其稳定性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- CAO X Q. Study on preparation of mayonnaise from seabuckthorn fruit oil and seabuckthorn seed oil and its stability[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [33] 宁芯, 陆秋琪, 班薇薇, 等. 沙田柚子籽油提取工艺优化及性质研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(7): 66-71.
- NING X, LU Q Q, BAN W W, et al. Extraction technology optimization of Shatian pomelo seed oil and its properties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(7): 66-71.
- [34] 李富安, 江林. 对植物提取物生产过程中的食品安全风险控制[J]. *质量与认证*, 2024(12): 69-72.
- LI F, JIANG L. Food safety risk control in the production process of plant extracts[J]. *China Quality Certification*, 2024(12): 69-72.
- [35] 郎蒙. 脱脂南极磷虾粉降血糖肽的酶解制备及活性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- LANG M. Enzymatic preparation and activity study of dipeptidyl peptidase iv inhibitory peptides derived from defatted Antarctic krill powder[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [36] CATCHPOLE O J, PROELLS K. Solubility of squalene, oleic acid, soya oil, and deep sea shark liver oil in subcritical R134a from 303 to 353 K[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2001, 40(3): 965-972.
- [37] 张逸, 黄凤洪, 马忠华, 等. 微波预处理对沙棘油得率和品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(5): 68-74.
- ZHANG Y, HUANG F H, MA Z H, et al. Effect of microwave pretreatment on yield and quality of sea buckthorn oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(5): 68-74.
- [38] 杨建远, 陈芳, 宋沥文, 等. 油茶籽油提取技术研究进展[J]. *食品与机械*, 2016, 32(2): 183-187.
- YANG J Y, CHEN F, SONG L W, et al. Research progress on extraction technology of camellia oil[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(2): 183-187.