

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.60015

超声辅助红松籽油酶法脱胶工艺优化 及抗氧化活性研究

屈岩峰^{1,2,3,4} 向 岚¹ 陈田鹏¹ 张 哲¹ 贾云哲¹ 张寒冰⁵

(1. 哈尔滨学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 东北农业大学, 黑龙江 哈尔滨 150006;
3. 九三粮油工业集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 屈岩峰高技能人才(劳模)创新工作室,
黑龙江 哈尔滨 150086; 5. 黑龙江民族职业学院, 黑龙江 哈尔滨 150066)

摘要: [目的]降低红松籽油中磷含量, 开发一种高效的红松籽油脱胶方法。[方法]采用超声辅助法, 通过正交试验对红松籽油脱胶工艺进行优化, 并分析脱胶后红松籽油的脂肪酸组分、含量及抗氧化能力。[结果]红松籽油的最佳脱胶工艺条件为超声功率 420 W, 脱胶温度 50 °C, 脱胶时间 3.5 h, 酶添加量 40 mg/kg, pH 4.8, 该条件下红松籽油中磷含量为 (5.18±0.24) mg/kg, 皮诺敛酸占总脂肪酸比例为 15.46%。当样品质量浓度为 40 mg/mL 时, DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基清除率分别为 (91.42±0.38)%、(92.47±0.84)%。[结论]通过优化后的超声辅助红松籽油酶法脱胶工艺可获得高质量的红松籽脱胶油, 该油具有较好的抗氧化活性。

关键词: 超声辅助; 红松籽油; 酶法脱胶; 皮诺敛酸; 抗氧化活性

Optimization of the process of Korean pine seed oil enzymatic degumming by ultrasound-assisted method and its antioxidant activity

QU Yanfeng^{1,2,3,4} XIANG Lan¹ CHEN Tianpeng¹ ZHANG Zhe¹ JIA Yunzhe¹ ZHANG Hanbing⁵

(1. Harbin University, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 2. Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150006, China; 3. Jiusan Oils and Grains Industries Group Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 150090, China; 4. High-skilled Talents (Model Worker) Innovation Studio of Qu Yanfeng, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 5. Heilongjiang Minzu College, Harbin, Heilongjiang 150066, China)

Abstract: [Objective] To reduce the phosphorus content in Korean pine seed oil and develop an efficient degumming method. [Methods] An ultrasound-assisted method was used, and the degumming process of Korean pine seed oil was optimized through orthogonal experiments. The fatty acid composition, content, and antioxidant capacity of the degummed oil were analyzed. [Results] The optimal degumming conditions for Korean pine seed oil were ultrasonic power of 420 W, degumming temperature of 50 °C, degumming time of 3.5 h, enzyme dosage of 40 mg/kg, and pH 4.8. Under these conditions, the phosphorus content of the degummed oil was (5.18 ± 0.24) mg/kg, and the proportion of pinolenic acid in total fatty acids was 15.46%. When the sample concentration was 40 mg/mL, the DPPH and ABTS⁺ radical scavenging rates were (91.42 ± 0.38)% and (92.47 ± 0.84)%, respectively. [Conclusion] The optimized ultrasound-assisted enzymatic degumming process for Korean pine seed oil yields high-quality degummed oil with good antioxidant activity.

Keywords: ultrasound-assisted method; Korean pine seed oil; enzymatic degumming; pinolenic acid; antioxidant activity

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(编号: LH2023C068); 哈尔滨学院乡村振兴博士科研基金(编号: HXC2023002); 国家级大学生创新训练项目(编号: 202310234098)

通信作者: 张寒冰(1980—), 女, 黑龙江民族职业学院副教授, 硕士。E-mail: 13223937@qq.com

收稿日期: 2025-02-12 改回日期: 2025-04-27

引用格式: 屈岩峰, 向岚, 陈田鹏, 等. 超声辅助红松籽油酶法脱胶工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 170-175.

Citation: QU Yanfeng, XIANG Lan, CHEN Tianpeng, et al. Optimization of the process of Korean pine seed oil enzymatic degumming by ultrasound-assisted method and its antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 170-175.

红松籽,又称海松子,是野生红松的种子,主要分布于中国长白山山脉及小兴安岭林区,含有丰富的油脂、蛋白质、碳水化合物等,其中油脂占比高达60%以上^[1-2]。红松籽油中含有多种单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸,其中,皮诺敛酸中含有多个羟基基团,这些基团使得皮诺敛酸具有较好的抗氧化和抗炎性能^[3-5]。近年来,关于红松籽油提取方法的研究较多^[6-8],但鲜有红松籽油脱胶的相关报道。油脂脱胶方法较多,如Sampaio等^[9]开发了酶法脱胶技术,将磷脂酶加入到预热后的毛油中,搅拌3~4 h后离心,可脱除磷脂;Chew等^[10-12]采用多种磷脂酶进行油脂酶法脱胶。此外,尚柏余等^[13]采用超声辅助菜籽油水化脱胶,与水化脱胶相比,该方法的脱胶率提升了23.81%。

研究拟在超声场作用下,采用磷脂酶A₁进行酶法脱胶,通过正交试验优化超声辅助红松籽油酶法脱胶工艺参数,并进行红松籽油抗氧化活性研究,为红松籽油的生产及产业化应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

红松籽:吉林省梅河口市新海隆食品有限公司;

磷脂酶A₁:诺维信(中国)生物技术有限公司;

其他化学试剂均为国产分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

智能温控超声波萃取仪:XH-2008DE型,北京祥鹤科技发展有限公司;

pH计:PHS-3C型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

马弗炉: SX-G07103型,上海量壹科学仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:T6型,上海元析仪器有限公司;

气质联用仪:GCMS-QP2020NX型,日本岛津有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 酶法脱胶工艺 室温下对红松籽进行冷榨处理,得到红松籽毛油。准确称取200 g红松籽毛油于智能温控超声波萃取仪中(非超声条件,500 mL具塞三角烧瓶中,水浴加热),调节反应温度,用缓冲液调整pH,加入3%的蒸馏水和一定量磷脂酶A₁,设定超声功率。300 r/min下进行酶法脱胶反应,一定时间后,90 °C水浴10 min灭酶,待测。

1.2.2 单因素试验

(1) 超声功率:固定脱胶温度50 °C,脱胶时间2 h,酶添加量40 mg/kg,pH值5.4,考察超声功率(240,300,360,420,480,540 W)对磷含量的影响。

(2) 脱胶温度:固定超声功率420 W,脱胶时间2 h,酶添加量40 mg/kg,pH值5.4,考察脱胶温度(35,40,45,

50,55,60 °C)对磷含量的影响。

(3) 脱胶时间:固定超声功率420 W,脱胶温度50 °C,酶添加量40 mg/kg,pH值5.4,考察脱胶时间(1,2,3,4,5 h)对磷含量的影响。

(4) 酶添加量:固定超声功率420 W,脱胶温度50 °C,脱胶时间3 h,pH值5.4,考察酶添加量(10,20,30,40,50,60 mg/kg)对磷含量的影响。

(5) pH值:固定超声功率420 W,脱胶温度50 °C,脱胶时间3 h,酶添加量40 mg/kg,考察pH值(3.6,4.2,4.8,5.4,6.0,6.6)对磷含量的影响。

1.2.3 正交试验 在单因素试验基础上,选择超声功率、脱胶温度、脱胶时间、酶添加量、pH值5个因素,设计L₁₆(4⁵)正交试验优化红松籽油超声辅助酶法脱胶工艺条件。

1.2.4 磷含量检测 参照GB/T 5537—2008。

1.2.5 红松籽油脂肪酸组分分析 参照GB 5009.168—2016。色谱条件为CP-Sil 88 for FAME色谱柱(100 m×0.25 mm×0.2 μm);柱升温程序:初温130 °C,保留5 min,以4 °C/min升至240 °C,保留30 min;载气类型为高纯He;载气流速0.7 mL/min;检测模式为全扫描;进样口温度250 °C;GC-MS接口温度280 °C;离子源温度280 °C;电离方式为EI;分流比为100:1。根据数据库对比和峰面积分析,计算各成分及其含量^[14]。

1.2.6 抗氧化活性测定

(1) DPPH自由基清除率:参照Sodiq等^[15]的方法。

(2) ABTS⁺自由基清除率:参照Guo等^[16]的方法。

1.3 数据处理

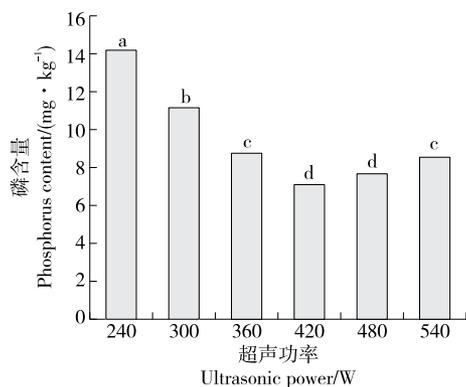
采用Excel 2019、正交设计助手和SPSS 22.0软件进行数据整理、分析,Origin 2024软件绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 超声功率对磷含量的影响 由图1可知,磷含量随着超声功率的升高呈先下降后上升趋势,当超声功率为420 W时,磷含量最低,与王若璠等^[17]的结论一致。超声功率从240 W升高到420 W过程中,增加了酶与磷脂接触的概率,磷含量下降;但超声功率继续增大,过高的超声功率对酶活性起到抑制作用,从而影响脱胶效果。

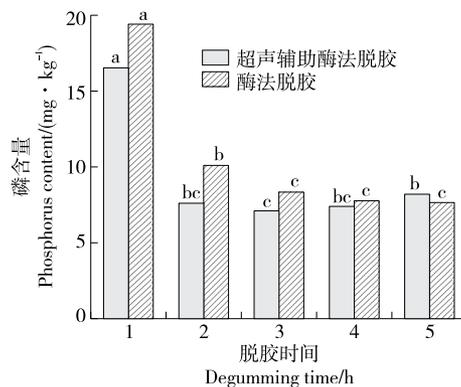
2.1.2 脱胶温度对磷含量的影响 由图2可知,酶法脱胶和超声辅助酶法脱胶的磷含量变化趋势一致,均随着脱胶温度的升高呈先下降后上升趋势。当脱胶温度较低时,磷脂酶活性较低,随着脱胶温度的升高,更接近酶的最适温度,体系黏度和表面张力降低,磷脂更易吸水脱出,更有利于脱胶;反应温度过高,酶部分失活,磷含量有所上升^[18]。在超声辅助条件下,磷含量低于无超声的酶法脱胶,且在50 °C时达到最低值。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 超声功率对磷含量的影响

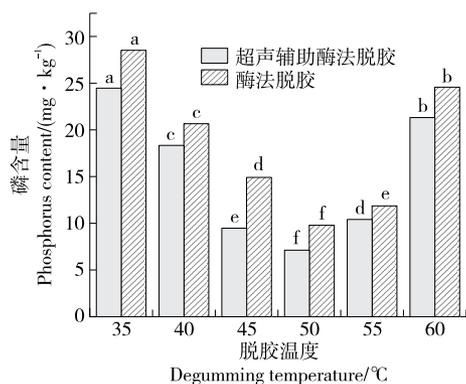
Figure 1 Effect of ultrasonic power on phosphorus content



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 脱胶时间对磷含量的影响

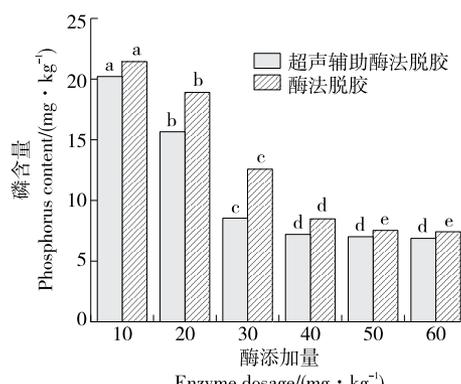
Figure 3 Effect of degumming time on phosphorus content



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 脱胶温度对磷含量的影响

Figure 2 Effect of degumming temperature on phosphorus content



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 酶添加量对磷含量的影响

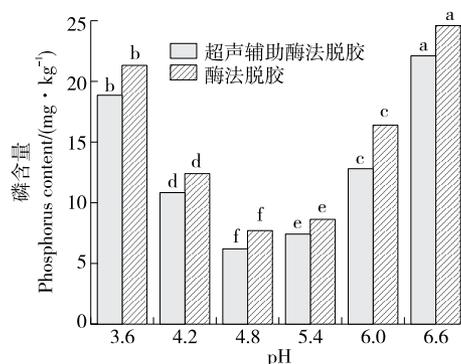
Figure 4 Effect of enzyme dosage on phosphorus content

2.1.3 脱胶时间对磷含量的影响 由图 3 可知,与酶法脱胶相比,超声辅助条件下酶法脱胶的磷含量更低,且下降速度更快,当脱胶时间为 3 h 时,磷含量达到最低值。当脱胶时间 > 3 h 时,随着脱胶时间的延长,酶法脱胶的磷含量虽略有降低,但不显著,超声辅助酶法脱胶的磷含量逐渐升高,这是由于脱胶时间过长,超声产生的空化效应加快了磷脂吸水溶胀速度,在超声作用下会使得更多磷脂分子与水发生乳化,磷含量反而上升^[19]。

2.1.4 酶添加量对磷含量的影响 由图 4 可知,随着酶添加量的增加,更多的磷脂酶 A₁ 与磷脂充分接触,磷含量逐渐下降,当酶添加量为 40 mg/kg 时,超声辅助酶法脱胶的磷含量为 7.22 mg/kg,低于酶法脱胶的,继续添加酶,磷含量降低不显著,与洪坤强等^[20]的结论一致,这可能是由于超声可提高酶活性并增加酶与磷脂接触的几率。

2.1.5 pH 值对磷含量的影响 由图 5 可知,随着 pH 值的升高,体系中磷含量逐步降低,当 pH 值为 4.8 时,磷含量随之升高,与 Qu 等^[21]的研究趋势一致。酶法脱胶与超声

辅助酶法脱胶的效果均在 pH 为 4.8 时最好,且超声辅助酶法脱胶的磷含量更低。超声对脱胶溶液的最适 pH 值无影响,但由于超声提高了酶与底物接触的概率,使得脱胶油中磷含量更低。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 pH 对磷含量的影响

Figure 5 Effect of pH on phosphorus content

2.2 正交试验

2.2.1 正交试验设计及结果 根据单因素试验结果,选择超声功率、脱胶温度、脱胶时间、酶添加量和 pH 值作为考察因素,以磷含量为指标进行五因素四水平正交试验。正交试验因素水平见表 1,试验设计与结果见表 2。

由表 2 可知,各因素对超声辅助红松籽油酶法脱胶影响的顺序为 pH 值>脱胶温度>超声功率>酶添加量>脱胶时间,最优组合为 A₂B₃C₃D₂E₂,即超声功率 420 W,脱胶温度 50 ℃,脱胶时间 3.5 h,酶添加量 40 mg/kg, pH 4.8。

表 1 正交试验因素水平表

水平	A 超声功率/W	B 脱胶温度/℃	C 脱胶时间/h	D 酶添加量/(mg·kg ⁻¹)	E pH 值
1	360	40	2.5	35	4.2
2	420	45	3.0	40	4.8
3	480	50	3.5	45	5.4
4	540	55	4.0	50	6.0

表 2 正交试验设计及结果

试验号	A	B	C	D	E	磷含量/(mg·kg ⁻¹)
1	1	1	1	1	1	22.76
2	1	2	2	2	2	9.91
3	1	3	3	3	3	7.23
4	1	4	4	4	4	23.06
5	2	1	2	3	4	17.85
6	2	2	1	4	3	9.13
7	2	3	4	1	2	5.76
8	2	4	3	2	1	7.52
9	3	1	3	4	2	12.40
10	3	2	4	3	1	14.08
11	3	3	1	2	4	13.12
12	3	4	2	1	3	15.36
13	4	1	4	2	3	15.90
14	4	2	3	1	4	25.15
15	4	3	2	4	1	9.42
16	4	4	1	3	2	7.68
k ₁	15.740	17.227	13.172	17.258	13.445	
k ₂	10.065	14.567	13.135	11.612	8.938	
k ₃	13.740	8.883	13.075	11.710	11.905	
k ₄	14.537	13.405	14.700	13.502	19.795	
R	5.675	8.344	1.625	5.646	10.857	

2.2.2 验证实验 根据正交试验得到的最佳脱胶工艺,进行 3 次验证实验,测得脱胶油中磷含量为(5.18±0.241) mg/kg,低于正交试验和单因素试验数值,说明正交试验优化工艺参数稳定且可行性强。

2.3 红松籽油的脂肪酸组分分析

由图 6 和表 3 可知,脱胶红松籽油中共检出 13 种脂肪酸成分,其中,不饱和脂肪酸含量高达 92.11%,亚油酸含量最高,油酸和皮诺敛酸次之,与董越等^[22]的研究相符。较高比例的不饱和脂肪酸和皮诺敛酸含量,为红松籽油在食品领域的应用提供了多种可能。

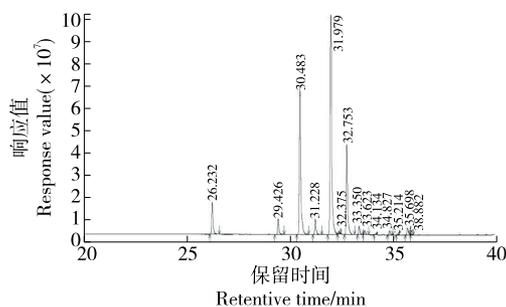


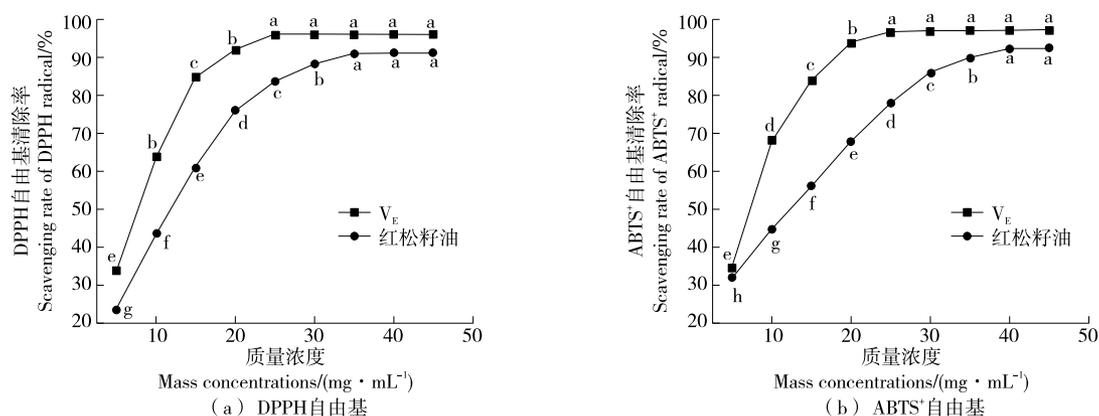
图 6 超声辅助酶法脱胶红松籽油脂肪酸组成总离子流图
Figure 6 Total ion chromatogram of fatty acid composition of enzymatically degummed Korean pine seed oil assisted by ultrasound

表 3 超声辅助酶法脱胶红松籽油的脂肪酸组成及含量

脂肪酸名称	保留时间/min	相对含量/%
棕榈酸	26.232	5.02
硬脂酸	29.426	2.46
油酸	30.483	26.71
5,9-十八碳二烯酸	31.228	2.46
亚油酸	31.979	43.35
花生酸	32.375	0.30
皮诺敛酸	32.753	15.46
11-二十碳一烯酸	33.350	1.29
亚麻酸	33.623	0.75
11,14-二十碳二烯酸	34.827	0.70
8,11-二十碳二烯酸	35.214	0.10
5,11,14-二十碳三烯酸	35.698	1.19
7,11,14-二十碳三烯酸	35.882	0.10

2.4 抗氧化活性分析

由图 7(a)可知,经超声酶法脱胶的红松籽油的质量浓度与其对 DPPH 自由基的清除能力呈正相关。当红松



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 7 红松籽油和 V_E 的抗氧化活性

Figure 7 Antioxidant activity of Korean pine seed oil and V_E

籽油质量浓度 < 25 mg/mL 时, DPPH 自由基清除率由 23.83% 快速升至 83.73%, 继续增大红松籽油质量浓度至 45 mg/mL, DPPH 自由基清除率上升速率逐渐趋于平缓, 最终达到 91.42%, 与 45 mg/mL 维生素 E 的接近。

由图 7(b) 可知, 随着脱胶后红松籽油和维生素 E 质量浓度的升高, ABTS⁺ 自由基清除能力均先升高后趋于平缓。当红松籽油质量浓度为 30 mg/mL 时, ABTS⁺ 自由基清除率由 32.04% 迅速升高至 86.08%, 之后缓慢升高, 当红松籽油质量浓度为 45 mg/mL 时, ABTS⁺ 自由基清除率达到最大值 92.47%, 与维生素 E 的接近。红松籽油对 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基的清除能力均随着样品质量浓度的升高而升高, 与王凤娟等^[23] 的研究结果一致。综上, 红松籽油具有较好的抗氧化能力。

3 结论

超声辅助红松籽油酶法脱胶最佳工艺条件为超声功率 420 W, 脱胶温度 50 °C, 脱胶时间 3.5 h, 酶添加量 40 mg/kg, pH 4.8, 此条件下的磷含量为 (5.18 ± 0.241) mg/kg。脱胶后的红松籽油脂肪酸中含有 90% 以上的不饱和脂肪酸, 其中皮诺敛酸含量达到 15.46%; 红松籽油表现出较强的抗氧化能力。后续可研究不同超声条件对脱胶油中脂肪酸组成、特别是皮诺敛酸含量的影响。

参考文献

- [1] 陈平, 王劲, 李华. 红松籽油的提取方法及生物活性研究进展 [J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 233-240.
CHEN P, WANG J, LI H. Research progress on extraction methods and biological activities of Korean pine seed oil [J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 233-240.
- [2] 李鸿博. 基于近红外光谱的红松子品质检测模型研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021: 1-3.

- LI H B. Study on quality detection model of pinus koraiensis seeds based on near infrared spectroscopy [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021: 1-3.
- [3] 李景彤, 刘迪迪, 王振宇. 红松子油及皮诺敛酸的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 297-301.
LI J T, LIU D D, WANG Z Y. Progress of *Pinus koraiensis* seed oil and pinolenic acid [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(8): 297-301.
- [4] XIE K Y, MILES E A, CALDER P C. A review of the potential health benefits of pine nut oil and its characteristic fatty acid pinolenic acid [J]. Journal of Functional Foods, 2016, 23: 464-473.
- [5] WANG Z Y, CHEN X Q. Functional evaluation for effective compositions in seed oil of Korean pine [J]. Journal of Forestry Research, 2004, 15(3): 215-217.
- [6] ZHANG Y, WANG Z Y, CHEN X Q. Ultrasound-associated extraction of seed oil of Korean pine [J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(2): 140-142.
- [7] CHEN X Q, ZHANG Y, WANG Z Y, et al. *In vivo* antioxidant activity of *Pinus koraiensis* nut oil obtained by optimised supercritical carbon dioxide extraction [J]. Natural Product Research, 2011, 25(19): 1 807-1 816.
- [8] 潘晓丽, 王凤娟, 张娜, 等. 不同提取方法对红松籽油提取效果及功能性质的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(1): 127-135.
PAN X L, WANG F J, ZHANG N, et al. Effects of different extraction methods on extraction effect and functional properties of Korean pine seed oil [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(1): 127-135.
- [9] SAMPAIO K A, ZYAYKINA N, WOZNIAC B, et al. Enzymatic degumming: degumming efficiency versus yield increase [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2015, 117(1): 81-86.
- [10] CHEW S C, ALI M A. Recent advances in ultrasound

- technology applications of vegetable oil refining[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 468-479.
- [11] VAL D S, MARCHISIO F, DI NARDO L, et al. Sustainable refining of vegetable oil made easy with a designer phospholipase C enzyme[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(13): 5 275-5 282.
- [12] LIU X, HUANG C J, LAN D M, et al. Combining phospholipase A1 with monoacylglycerol lipase for crude vegetable oil degumming through improved oil-water separation[J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142366.
- [13] 尚柏余, 谭湘芸, 冯旭梅, 等. 超声波处理对菜籽毛油脱胶效果的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(10): 128-136.
- SHANG B Y, TAN X Y, FENG X M, et al. Effects of ultrasonic treatment on degumming of rapeseed crude oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(10): 128-136.
- [14] GUICI EL KOUACHEUR K, CHERIF H S, SAIDI F, et al. *Prunus amygdalus var. amara* (bitter almond) seed oil: fatty acid composition, physicochemical parameters, enzyme inhibitory activity, antioxidant and anti-inflammatory potential [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(1): 371-384.
- [15] SADIQ H, SADIQ H, SOHAIL A, et al. Assessment of antioxidant activity of pure graphene oxide (GO) and composite V₂O₅/GO using DPPH radical and H₂O₂ scavenging assays[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2023, 108(3): 840-849.
- [16] GUO X D, MA Y J, PARRY J, et al. Phenolics content and antioxidant activity of tartary buckwheat from different locations[J]. Molecules, 2011, 16(12): 9 850-9 867.
- [17] 王若璠, AKHYMETKAN S, 张妍, 等. 响应面优化浓香菜籽油超声辅助酶法脱胶工艺研究[J]. 中国油脂, 2023, 48(4): 16-20.
- WANG R F, AKHYMETKAN S, ZHANG Y, et al. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic degumming process of fragrant rapeseed oil by response surface methodology[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(4): 16-20.
- [18] LI Z, ZHOU H L, LIU X, et al. A novel thermo-responsive phospholipase A1 with high selectivity and efficiency in enzymatic oil degumming[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 139624.
- [19] 代春华, 蔡兆海, 圣明明, 等. 超声辅助菜籽毛油脱胶工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 93-96.
- DAI C H, CAI Z H, SHENG M M, et al. Research on ultrasound-assisted degumming process of crude rapeseed oil [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(5): 93-96.
- [20] 洪坤强, 罗质, 叶展, 等. 菜籽油脱胶和脱臭工艺优化[J]. 中国油脂, 2024, 49(6): 18-23, 29.
- HONG K Q, LUO Z, YE Z, et al. Optimization of rapeseed oil degumming and deodorization process[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(6): 18-23, 29.
- [21] QU Y F, SUN L X, LI X X, et al. Enzymatic degumming of soybean oil with magnetic immobilized phospholipase A₂[J]. LWT-Food Science & Technology, 2016, 73: 290-295.
- [22] 董越, 刘会平, 刘易坤, 等. 松子油提取工艺及3种松子油脂脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2017, 42(4): 8-11.
- DONG Y, LIU H P, LIU Y K, et al. Extraction process of pine nut oil and fatty acid composition analysis of three pine nut oils [J]. China Oils and Fats, 2017, 42(4): 8-11.
- [23] 王凤娟, 夏晓雨, 张娜, 等. 减压-超声波联用提取红松籽油动力学模型及油脂组成、抗氧化活性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(11): 110-117.
- WANG F J, XIA X Y, ZHANG N, et al. Kinetic model, fatty acid composition and antioxidant activity of Korean pine seed oil extracted by decompression assisted ultrasonic[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(11): 110-117.