

水酶法提取毛叶山桐子油的工艺优化及其品质分析

陈小静¹, 闻乐嫣¹, 向旭雯¹, 阚建全^{1,2,3}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 农业农村部农产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室, 重庆 400715; 3. 中匈食品科学合作研究中心, 重庆 400715)

摘要:旨在为水酶法提取毛叶山桐子油的工业化应用提供参考, 以毛叶山桐子鲜果为原料, 通过单因素实验和响应面实验对水酶法提取毛叶山桐子油的工艺条件进行优化, 并对水酶法提取的毛叶山桐子油与索氏抽提法、热榨法及低温压榨法提取的毛叶山桐子油品质进行比较。结果表明: 水酶法提取毛叶山桐子油的最佳工艺条件为加热预处理(汽蒸 10 min)、料液比 1:3.5、提取时间 5.6 h、加酶量 2.70% (酶为质量比 1:1 的纤维素酶和中性蛋白酶), 在此条件下毛叶山桐子油提取率达 77.45%; 与其他 3 种方法提取的毛叶山桐子油相比, 水酶法提取的毛叶山桐子油酸值(KOH) (2.62 mg/g) 和过氧化值(5.55 mmol/kg) 最低, 亚油酸含量最高(64.03%)。综上, 优化的水酶法工艺提取的毛叶山桐子油品质较好。

关键词:水酶法; 毛叶山桐子; 鲜果油; 提取率; 油脂品质

中图分类号: TS222+.1; TS224 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2024)12-0001-06

Optimization and quality analysis of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil extracted by aqueous enzymatic extraction

CHEN Xiaojing¹, WEN Leyan¹, XIANG Xuwen¹, KAN Jianquan^{1,2,3}

(1. School of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Laboratory of Agricultural Products Storage and Preservation Quality and Safety Risk Assessment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chongqing 400715, China;

3. Chinese-Hungarian Cooperative Research Center for Food Science, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to provide reference for the industrial application of aqueous enzymatic method (AEE) for *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil extraction, the AEE conditions of extracting oil from fresh fruit of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels were optimized by single-factor tests and response surface methodology, and the quality of the oil extracted by AEE was compared with that extracted by Soxhlet extraction, hot pressing and cold pressing. The results showed that the optimal extraction conditions of AEE were as follows: heating pretreatment (steaming for 10 min), solid-liquid ratio 1:3.5, extraction time 5.6 h, enzyme dosage 2.70% (mass ratio of cellulase to neutral protease 1:1). The oil extraction rate achieved 77.45% under the optimal conditions. Compared with the oil extracted by the other three methods, the acid value (2.62 mgKOH/g) and peroxide value (5.55 mmol/kg) of the oil extracted by AEE were the lowest, and the linoleic acid content was the highest (64.03%). In conclusion, the quality of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil extracted by the optimized AEE process is better.

Key words: aqueous enzymatic method; *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels; fresh fruit oil; extraction rate; oil quality

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2024-07-29

基金项目: 国务院三峡办 2018 年度三峡后续工作科研项目 (YYNY-2017-01)

作者简介: 陈小静(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物油与蛋白工程 (E-mail) 1658793056@qq.com。

通信作者: 阚建全, 教授 (E-mail) kanjianquan@163.com。

毛叶山桐子 (*Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels)

是杨柳科山桐子属多年生落叶乔木, 在我国秦岭、淮河以南地区广泛种植。以毛叶山桐子果实为原料加工制成的油脂富含不饱和脂肪酸, 尤其是亚油酸, 其

相对含量可达 60%^[1]。毛叶山桐子油常用的提取工艺主要有溶剂浸提法、压榨法、水代法、水酶法等^[2]。溶剂浸提法油脂提取率高,但提取时间较长,且存在一定溶剂残留^[3-4]。压榨法包括热榨法(Hot pressing extraction, HPE)和低温压榨法(Cold pressing extraction, CPE),热榨法会造成油脂中热敏性生物活性成分的损失^[5],低温压榨法所得油脂品质较高,但提取率较低^[4]。随着消费者寻求可持续的产品和生产工艺,绿色环保的提取技术越来越受到人们青睐,如以水为提取介质,操作条件温和的水代法,但其油脂提取率不够理想。在水代法基础上发展出的水酶法(Aqueous enzymatic extraction, AEE),采用该方法提取油脂能缩短提取时间、提高出油率,且油脂的品质和安全性均较高^[4],符合可持续发展的理念,已被广泛应用于葵花籽油^[6]和山核桃油^[7]等植物油的制取中。

水酶法应用于山桐子油的提取已有相关报道,但是传统水酶法需要对山桐子果进行干燥,不仅增大了能耗,而且容易破坏山桐子中酚类、甾醇、角鲨烯、生育酚等生物活性成分^[8]。因此,本研究在前期研究^[8-9]的基础上,直接以高水分含量的毛叶山桐子鲜果为原料,采用水酶法提取其中的油脂,通过单因素实验和响应面实验优化水酶法提取工艺条件,测定最优条件下提取的毛叶山桐子油理化指标和脂肪酸组成,并与压榨法、索氏抽提法提取的毛叶山桐子油品质进行比较分析,以期水酶法提取毛叶山桐子油的工业化应用奠定基础。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

毛叶山桐子果实(湖北品种),由重庆山林源林业综合开发有限公司提供,于9月份人工采摘,然后立即运回实验室,去除果梗并剔除伤病虫害果后,选择大小和颜色相似的果实,于4℃贮存备用。

纤维素酶(酶活 10 000 U/g)和中性蛋白酶(酶活 50 000 U/g),丹麦诺维信公司;正己烷(色谱级)、百里香酚酞和碘化钾,阿拉丁试剂(上海)有限公司;石油醚(沸程 30~60℃)、环己烷、冰醋酸和三氯甲烷,成都科龙化工试剂厂;氢氧化钾、氢氧化钠、酚酞和硫代硫酸钠标准溶液(26 g/L),重庆川东化工有限公司;韦氏试剂(生物试剂),上海源叶生物科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

7890A GC 气相色谱仪,美国 Agilent 公司;SB25-12DTD 超声波清洗仪,宁波新芝生物科技股份有限

公司;T10 可调高速匀浆机,德国 IKA 公司;HCJ-6D 数显磁力搅拌恒温水浴器,常州朗越仪器制造有限公司;D02 多功能榨油机,乐清市韩皇电器科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 毛叶山桐子油的提取

1.2.1.1 索氏抽提法

参照 GB 5009.6—2016 对毛叶山桐子果实进行烘干预处理并采用索氏抽提法提取油脂。

1.2.1.2 压榨法

将毛叶山桐子果实于 50℃ 烘干,粉碎过 0.425 mm(40 目)筛后倒入榨油机,分别在 50℃ 和 200℃ 下压榨,过滤后收集油脂,得到低温压榨油和热榨油。

1.2.1.3 水酶法

将新鲜的毛叶山桐子果实(参照 GB 5009.3—2010 测得水分含量约 70%)洗净晾干后,取 50 g 毛叶山桐子果实,分别采用加热、冷冻、超声进行预处理(以未处理组作为对照),向预处理后的样品中加入一定量的混合酶(质量比为 1:1 的纤维素酶和中性蛋白酶),在 60℃ 恒温水浴、60 r/min 下搅拌提取一定时间,再经 100℃ 水浴处理 10 min 灭酶活,于 6 500 r/min 下离心 10 min,然后置于 -20℃ 冰箱冷冻 12 h,于 50℃ 水浴解冻,再在 6 500 r/min 下离心 10 min,收集上层油脂,即为毛叶山桐子油。毛叶山桐子鲜果预处理具体操作如下。

加热预处理:将毛叶山桐子果实在沸水(100℃)条件下蒸制 10 min,冷却至室温后,放入粉碎机,按一定料液比加去离子水粉碎 3 min,过 0.150 mm(100 目)筛后弃去滤渣。

冷冻预处理:将毛叶山桐子果实置于 -20℃ 冰箱中冷冻 12 h,于 50℃ 水浴解冻后,再按加热预处理中的方法经粉碎、过筛后弃去滤渣。

超声预处理:按一定料液比向毛叶山桐子果实中加入去离子水,放入粉碎机粉碎 3 min,在功率 300 W、频率 40 kHz 下超声处理 30 min 后,过 0.150 mm(100 目)筛后弃去滤渣。

1.2.2 毛叶山桐子油理化指标及脂肪酸组成分析

酸值,参照 GB 5009.229—2016 测定;碘值,参照 GB/T 5532—2008 测定;皂化值,参照 GB/T 5534—2008 测定;过氧化值,参照 GB 5009.227—2016 测定;脂肪酸组成,参照闻乐嫣等^[9]的方法测定。

1.2.3 数据处理与分析

每组实验均进行 3 次,采用 Excel 2019 对数据进行处理,结果以“平均值 ± 标准偏差”表示。采用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析,以 Tukey 检验进行

差异性比较, $p < 0.05$ 说明差异显著。利用 Design Expert 10.0 进行响应面分析,并用 Origin 2021 绘图。

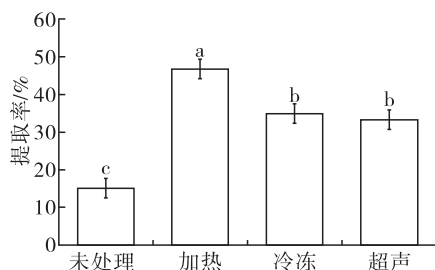
2 结果与讨论

2.1 毛叶山桐子油水酶法提取工艺优化

2.1.1 单因素实验

2.1.1.1 预处理方式的影响

毛叶山桐子鲜果预处理方式(加热、冷冻、超声等)影响其油脂的提取率。其中:加热预处理可以使原料中的蛋白质变性,促进油脂的溶出^[10];冷冻预处理能浓缩果实中的细胞液,促使细胞溶胀并破裂,进而有助于油脂的提取^[11];超声作用带来的空化效应会产生局部的冲击波和高温,能够通过破坏植物细胞的结构提高油脂提取率^[12]。在料液比 1:2、加酶量 2.5%、提取时间 2 h 的条件下,考察毛叶山桐子鲜果预处理方式对毛叶山桐子油提取率的影响,结果见图 1。



注:不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

图 1 预处理方式对毛叶山桐子油提取率的影响

Fig. 1 Effect of pretreatment methods on the extraction rate of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil

由图 1 可知,与未处理相比,毛叶山桐子鲜果经过加热、冷冻、超声预处理后,其油脂提取率分别提高了 210.82%、131.90%、120.73%,加热预处理后毛叶山桐子油提取率最高,可达 46.80%。因此,后续实验采用加热预处理方式对毛叶山桐子鲜果进行预处理。

2.1.1.2 料液比的影响

体系料液比能通过影响提取过程中油脂与溶剂的接触效率来影响油脂提取率^[13]。在较高的料液比下,溶液体系过于黏稠,样品不能与提取剂充分接触,油脂不能完全游离出来;而在较低的料液比下,样品能与提取剂充分接触,从而提高油脂提取率^[14]。在加酶量 2.0%、提取时间 4 h 的条件下,考察料液比对毛叶山桐子油提取率的影响,结果见图 2。

由图 2 可知,随着料液比的减小,毛叶山桐子油提取率逐渐上升,当料液比为 1:3 时毛叶山桐子油提取率接近 65%,继续减小料液比,毛叶山桐子油

提取率变化不显著($p > 0.05$)。

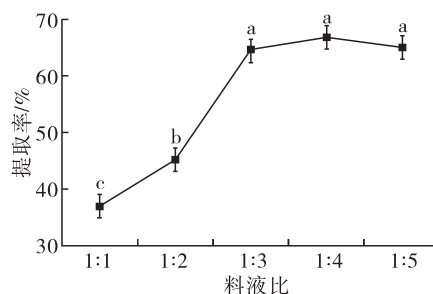


图 2 料液比对毛叶山桐子油提取率的影响

Fig. 2 Effect of solid-liquid ratio on the extraction rate of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil

2.1.1.3 提取时间的影响

在料液比 1:3、加酶量 2.0% 的条件下,考察提取时间对毛叶山桐子油提取率的影响,结果见图 3。

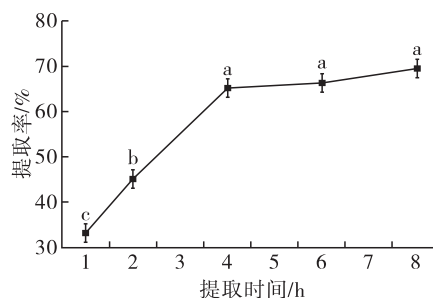


图 3 提取时间对毛叶山桐子油提取率的影响

Fig. 3 Effect of extraction time on the extraction rate of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil

由图 3 可知,随着提取时间的延长,毛叶山桐子油提取率先显著升高后增长趋势减缓。这是因为提取时间的延长使得细胞壁组分的增溶作用增加,最终达到最大限度^[15];但时间过长酶解产物会对酶解反应起到一定的抑制作用,此外,容易导致体系形成稳定的乳浊液,降低油脂的提取率^[16]。提取时间 4~8 h 时,毛叶山桐子油提取率没有显著变化($p > 0.05$)。

2.1.1.4 加酶量的影响

在料液比 1:3、提取时间 4 h 的条件下,考察加酶量对毛叶山桐子油提取率的影响,结果见图 4。

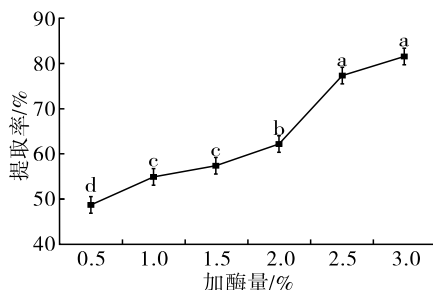


图 4 加酶量对毛叶山桐子油提取率的影响

Fig. 4 Effect of the amount of enzymes on the extraction rate of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil

由图4可知,随着加酶量的增加,毛叶山桐子油提取率不断升高,由加酶量0.5%时的48.72%上升至加酶量3.0%时的81.50%,加酶量2.5%与加酶量3.0%时毛叶山桐子油提取率无显著变化($p > 0.05$)。这是由于当加酶量不足时,酶解不完全,大部分油脂无法溶出,油脂提取率较低;随着加酶量增加,油脂提取率随之增加;当加酶量达到一定值后,可能由于底物的饱和,油脂提取率趋于稳定^[17]。

2.1.2 响应面实验

在单因素实验的基础上,固定毛叶山桐子鲜果的预处理方式为加热,以毛叶山桐子油提取率(Y)为响应值,料液比(A)、提取时间(B)、加酶量(C)为因素,采用Box-Behnken设计响应面实验以优化毛叶山桐子油提取的工艺条件。响应面实验因素与水平见表1,响应面实验设计与结果见表2。

表1 响应面实验因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface methodology

水平	A 料液比	B 提取时间/h	C 加酶量/%
-1	1:2	2	2.0
0	1:3	4	2.5
1	1:4	6	3.0

表2 响应面实验设计与结果

Table 2 Design and results of response surface methodology

实验号	A	B	C	Y/%
1	-1	-1	0	45.79
2	1	-1	0	49.88
3	-1	1	0	59.31
4	1	1	0	77.99
5	-1	0	-1	42.33
6	1	0	-1	64.58
7	-1	0	1	58.77
8	1	0	1	68.40
9	0	-1	-1	43.39
10	0	1	-1	59.97
11	0	-1	1	53.98
12	0	1	1	79.98
13	0	0	0	76.33
14	0	0	0	74.10
15	0	0	0	74.99
16	0	0	0	75.40
17	0	0	0	76.91

对表2实验数据进行多元回归分析,得到回归模型: $Y = 75.55 + 6.83A + 10.53B + 6.36C + 3.65AB - 3.15AC + 2.36BC - 9.06A^2 - 8.25B^2 - 7.97C^2$ 。

对回归模型进行方差分析,结果如表3所示。

表3 响应面回归模型方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis of response surface regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	2702.76	9	300.31	73.12	<0.0001**
A	373.33	1	373.33	90.90	<0.0001**
B	886.42	1	886.42	215.84	<0.0001**
C	323.34	1	323.34	78.73	<0.0001**
AB	53.22	1	53.22	12.96	0.0087**
AC	39.82	1	39.82	9.70	0.0170*
BC	22.18	1	22.18	5.40	0.0531
A ²	345.37	1	345.37	84.10	<0.0001**
B ²	286.35	1	286.35	69.73	<0.0001**
C ²	267.41	1	267.41	65.11	<0.0001**
残差	28.75	7	4.11		
失拟项	23.85	3	7.95	6.49	0.0512
纯误差	4.90	4	1.22		
总和	2731.51	16			

注: *表示 $p < 0.05$,具有显著差异; **表示 $p < 0.01$,具有极显著差异

Note: * . $p < 0.05$, ** . $p < 0.01$

由表3可见,模型极显著($p < 0.0001$),失拟项($p = 0.0512 > 0.05$)不显著,表明模型合理,具有统计学意义。模型的决定系数(R^2)为0.9895,调整决定系数(R^2_{Adj})为0.9759,均接近1,表明模型拟合情况较好^[18-19]。模型的一次项A、B、C,交互项AB,以及二次项A²、B²、C²对毛叶山桐子油提取率的影响极显著,交互项AC对毛叶山桐子油提取率的影响显著。3个因素对毛叶山桐子油提取率的影响大小为提取时间>料液比>加酶量。通过模型求解确定毛叶山桐子油提取率最大化的条件为料液比1:3.46、提取时间5.59 h、加酶量2.70%。考虑实际操作性,将最佳条件修正为料液比1:3.5、提取时间5.6 h、加酶量2.70%。经验证,最佳条件下毛叶山桐子油提取率为(77.45 ± 2.42)%,与理论预测值(82.75%)基本吻合。因此,优化后的毛叶山桐子油提取工艺参数具有可靠性。

2.2 不同方法提取的毛叶山桐子油的理化指标

不同方法提取的毛叶山桐子油理化指标见表4。

由表4可知,水酶法所得毛叶山桐子油的酸值最低,与Hou等^[20]的测定结果接近。碘值反映油脂不饱和度,毛叶山桐子油的碘值(I)在127~134 g/100 g。在毛叶山桐子油的提取方法中,水酶法、索

氏抽提法和低温压榨法提取的毛叶山桐子油的碘值没有显著差异($p > 0.05$),而热榨法提取的毛叶山桐子油的碘值最低,说明提取方法对毛叶山桐子油不饱和度的影响不大,这与王彦花^[21]在油茶籽油提取方法研究中得到的结论相似。油脂皂化值与油脂中脂肪酸的相对分子质量成反比,皂化值还表示油脂的纯度,同种类油脂,皂化值越大则油脂杂质越少^[4]。提取方法对毛叶山桐子油皂化值的影响显著,其中水酶法提取的毛叶山桐子油皂化值(KOH)(229.91 mg/g)最高,其次为索氏抽提法(214.25 mg/g)。过氧化值体现油脂的氧化程度。提取方法

对毛叶山桐子油过氧化值的影响显著($p < 0.05$),水酶法提取的毛叶山桐子油的过氧化值最低,为5.55 mmol/kg。GB 2716—2018《食品安全国家标准植物油》中规定,食用植物油中的过氧化值应不大于0.25 g/100 g(约10 mmol/kg),本研究中仅水酶法提取的毛叶山桐子油符合标准。水酶法使用的是毛叶山桐子鲜果,而其他3种提取方法使用的是烘干后的干果,可能在烘干过程中,毛叶山桐子果实中的油脂氧化、分解增多,导致过氧化值偏高^[22]。通常认为,酸值和过氧化值低的油脂质量较高^[4],从这一层面考虑,水酶法提取的毛叶山桐子油品质更好。

表4 不同方法提取的毛叶山桐子油理化指标

Table 4 Physicochemical indexes of the *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil extracted by different methods

理化指标	水酶法	索氏抽提法	低温压榨法	热榨法
酸值(KOH)/(mg/g)	2.62 ± 0.07 ^c	12.15 ± 0.70 ^b	12.49 ± 0.27 ^{ab}	13.18 ± 0.21 ^a
过氧化值/(mmol/kg)	5.55 ± 1.22 ^c	17.35 ± 2.44 ^a	16.85 ± 1.29 ^a	12.33 ± 0.38 ^b
碘值(I)/(g/100 g)	133.57 ± 1.24 ^a	132.02 ± 1.00 ^{ab}	133.87 ± 0.55 ^a	127.00 ± 3.98 ^b
皂化值(KOH)/(mg/g)	229.91 ± 2.35 ^a	214.25 ± 2.65 ^b	192.69 ± 2.42 ^d	202.06 ± 4.77 ^c

注:同行不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters in the same line indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

2.3 不同方法提取的毛叶山桐子油脂肪酸组成

表5所示。

不同方法提取的毛叶山桐子油的脂肪酸组成如

表5 不同方法提取的毛叶山桐子油脂肪酸组成

Table 5 Fatty acids composition of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil extracted by different methods

脂肪酸	水酶法	索氏抽提法	低温压榨法	热榨法	%
棕榈酸(C16:0)	16.77 ± 0.08 ^a	13.34 ± 1.02 ^a	13.18 ± 2.32 ^a	12.24 ± 0.52 ^a	
棕榈油酸(C16:1)	2.87 ± 0.33 ^a	2.60 ± 0.07 ^a	2.59 ± 0.03 ^a	2.55 ± 0.03 ^a	
十七烷酸(C17:0)	1.32 ± 0.43 ^{ab}	1.63 ± 0.01 ^a	1.16 ± 0.85 ^b	1.52 ± 0.08 ^{ab}	
硬脂酸(C18:0)	2.32 ± 0.47 ^a	2.86 ± 0.45 ^a	2.76 ± 0.66 ^a	2.79 ± 0.31 ^a	
油酸(C18:1)	5.18 ± 0.20 ^a	5.27 ± 0.03 ^a	5.05 ± 0.68 ^a	5.05 ± 0.36 ^a	
反油酸(C18:1 <i>t</i>)	1.45 ± 0.29 ^a	1.63 ± 0.08 ^a	1.52 ± 0.08 ^a	1.64 ± 0.07 ^a	
亚油酸(C18:2)	64.03 ± 0.77 ^a	58.76 ± 0.49 ^{bc}	61.35 ± 0.07 ^{ab}	57.42 ± 1.72 ^c	
α-亚麻酸(C18:3 <i>n</i> 3)	0.34 ± 0.31 ^a	0.46 ± 0.12 ^a	0.43 ± 0.34 ^a	0.50 ± 0.06 ^a	
γ-亚麻酸(C18:3 <i>n</i> 6)	1.64 ± 0.54 ^a	1.87 ± 0.17 ^a	1.76 ± 0.59 ^a	1.83 ± 0.03 ^a	
花生酸(C20:0)	0.81 ± 0.55 ^a	1.20 ± 0.31 ^a	0.99 ± 0.74 ^a	1.16 ± 0.03 ^a	
花生烯酸(C20:1)	0.41 ± 0.01 ^b	0.84 ± 0.15 ^a	1.89 ± 0.49 ^a	1.40 ± 0.20 ^a	
花生二烯酸(C20:2)	0.60 ± 0.13 ^c	1.14 ± 0.17 ^{bc}	1.64 ± 0.03 ^a	1.29 ± 0.05 ^b	
芥酸(C22:1)	1.04 ± 0.03 ^c	2.46 ± 0.31 ^{ab}	1.90 ± 0.20 ^b	2.81 ± 0.11 ^a	
二高-γ-亚麻酸(C20:3 <i>n</i> 6)	0.27 ± 0.02 ^b	2.28 ± 0.34 ^a	1.20 ± 0.28 ^a	2.04 ± 0.04 ^a	
花生四烯酸(C20:4 <i>n</i> 6)	0.18 ± 0.09 ^b	1.34 ± 0.57 ^{ab}	0.24 ± 0.02 ^b	2.67 ± 0.56 ^a	
二十二碳二烯酸(C22:2)	0.75 ± 0.09 ^c	2.32 ± 0.69 ^{bc}	2.33 ± 0.04 ^b	3.09 ± 0.18 ^a	
饱和脂肪酸	21.23 ± 1.38 ^a	19.03 ± 0.26 ^a	18.09 ± 0.08 ^a	17.71 ± 0.10 ^a	
单不饱和脂肪酸	10.96 ± 0.22 ^b	12.79 ± 0.50 ^a	12.95 ± 1.00 ^a	13.45 ± 0.16 ^a	
多不饱和脂肪酸	67.81 ± 0.01 ^a	68.18 ± 0.25 ^a	68.95 ± 1.09 ^a	68.84 ± 1.16 ^a	

由表5可知,毛叶山桐子油的脂肪酸组成以亚油酸为主,这与文献^[23]所报道的一致。不同方法

提取的毛叶山桐子油的脂肪酸组成相同,不饱和脂肪酸含量均较高,除亚油酸、十七烷酸、花生烯酸、花

生二烯酸、芥酸、二高- γ -亚麻酸、花生四烯酸、二十二碳二烯酸外,其他脂肪酸含量在不同提取方法间没有显著差异($p > 0.05$)。值得注意的是,水酶法提取毛叶山桐子油的亚油酸含量最高(64.03%),但总的饱和脂肪酸含量在各提取方法间不存在显著差异($p > 0.05$)。总的来说,提取方法对毛叶山桐子油脂肪酸组成及含量影响不大。

3 结论

本研究通过单因素实验和响应面实验优化了水酶法提取毛叶山桐子油的工艺条件,并对水酶法提取的油脂与索氏抽提法、热榨法、低温压榨法提取的油脂品质进行对比。结果表明,水酶法提取毛叶山桐子油的最佳工艺条件为采用加热预处理、料液比1:3.5、提取时间5.6 h、加酶量2.70%,在此条件下毛叶山桐子油提取率可达77.45%。水酶法提取的毛叶山桐子油酸值和过氧化值显著低于其他3种方法提取的($p < 0.05$),且其亚油酸含量最高(64.03%)。综上,水酶法是一种简单、高效的提油方法,可用于毛叶山桐子油的生产。

参考文献:

[1] LI Y, PENG T, HUANG L, et al. The evaluation of lipids raw material resources with the fatty acid profile and morphological characteristics of *Idesia polycarpa* Maxim var. *vestita* Diels fruit in harvesting[J]. Ind Crop Prod, 2019,129:114-122.

[2] 刘畅,智文艳,张敏敏,等.不同预处理对冷榨法制取山桐子油的响应面优化研究[J/OL].河南农业大学学报,2024:1-20[2024-07-29].<https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20240429.006>.

[3] 宋明发,杨芸,白冉冉,等.不同方法提取山桐子油的品质及体外抗氧化活性研究[J].中国调味品,2022,47(3):28-32,38.

[4] 李天赐,杨趁仙,刘昆仑,等.水酶法提油技术及其对植物油脂品质影响的研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(9):365-372.

[5] WEI J, CHEN L, QIU X, et al. Optimizing refining temperatures to reduce the loss of essential fatty acids and bioactive compounds in tea seed oil[J]. Food Bioprod Process, 2015,94:136-146.

[6] 程倩,初柏君,杨潇,等.水酶法提取葵花籽仁油工艺的优化及对油脂品质的影响[J].食品安全质量检测学报,2021,12(17):6969-6974.

[7] 李晴,陆胜民,王阳光,等.冷榨法和水酶法提取对山核桃油活性成分的影响[J].中国油脂,2022,47(2):23-27.

[8] WEN L, XIANG X, WANG Z, et al. Evaluation of cultivars

diversity and lipid composition properties of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels[J]. J Food Sci, 2022, 87(9): 3841-3855.

[9] 闻乐嫣,毛建梅,安小凤,等.毛叶山桐子果实化学成分及脂肪酸动态分析与评价[J].食品科学,2022,43(4):198-207.

[10] 刘春晓,王斌,高盼,等.美拉德生香源反应制备浓香芝麻油工艺优化[J].中国油脂,2022,47(2):28-33.

[11] 牛瑞浩.水酶法提取花生油过程中酶法破乳机理研究[D].郑州:河南工业大学,2021.

[12] LI Q, ZHOU Z, ZHANG D, et al. Lipid extraction from *Nannochloropsis oceanica* biomass after extrusion pretreatment with twin-screw extruder: Optimization of processing parameters and comparison of lipid quality[J]. Bioprocess Biosyst Eng, 2020, 43(4): 655-662.

[13] PICURIC-JOVANOVIC K, VRBASKI Z, MILOVANOVIC M. Aqueous-enzymatic extraction of plum kernel oil[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 1997,99(12):433-435.

[14] HANMOUNGJAI P, PYLE L, NIRANJAN K. Extraction of rice bran oil using aqueous media[J]. J Chem Technol Biot, 2000,75(5):348-352.

[15] GHORBANZADEH R, REZAEI K. Optimization of an aqueous extraction process for pomegranate seed oil[J]. J Am Oil Chem Soc, 2017, 94(12): 1491-1501.

[16] ROSENTHAL A, PYLE D, NIRANJAN K. Aqueous and enzymatic processes for edible oil extraction[J]. Enzyme Microb Technol, 1996,19(6):402-420.

[17] 袁雅雯. 椴子果油的超声辅助水酶法提取及其纳米乳液制备的研究[D].杭州:浙江科技学院,2023.

[18] 李晓,李春阳,曾晓雄,等.响应面试验优化红花籽油水酶法提取工艺[J].食品科学,2017,38(22):231-238.

[19] LIU Y, WEI S, LIAO M. Optimization of ultrasonic extraction of phenolic compounds from *Euryale ferox* seed shells using response surface methodology[J]. Ind Crop Prod, 2013, 49: 837-843.

[20] HOU K X, YANG X B, BAO M L, et al. Composition, characteristics and antioxidant activities of fruit oils from *Idesia polycarpa* using homogenate-circulating ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction[J]. Ind Crop Prod, 2018, 117(7): 205-215.

[21] 王彦花.不同立地及提取方式对茶油品质影响的研究[D].长沙:中南林业科技大学,2018.

[22] 尚祖飞,徐甜甜,邹康,等.山桐子鲜果干燥方式对山桐子油品质的影响[J].中国油脂,2024,49(1):11-15.

[23] LI R J, GAO X, LI L M, et al. De novo assembly and characterization of the fruit transcriptome of *Idesia polycarpa* reveals candidate genes for lipid biosynthesis[J/OL]. Front Plant Sci, 2016, 7: 801 [2023-05-08].<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00801>.