

竹柏果油提取工艺优化及理化特性分析

Extraction of *Podocarpus nagi* nut oil and analysis of their physicochemical properties

吕露露¹ 杨崇文¹ 李承勇^{1,2} 孙省利^{1,2}

LU Lu-lu¹ YANG Chong-wen¹ LI Cheng-yong^{1,2} SUN Sheng-li^{1,2}

闫协民² 苏添添² 冯彦婷²

YAN Xie-min² SU Tian-tian² FENG Yan-ting²

(1. 广东海洋大学化学与环境学院, 广东 湛江 524088;

2. 湛江市海岸带生态工程技术研究开发中心, 广东 湛江 524088)

(1. School of Chemistry and Environment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;

2. Coastal Ecology Engineering Technology Research Center, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

摘要:以竹柏果仁为原料,采用单因素与响应面试验相结合的方法对超声波辅助索氏提取法提取竹柏果仁油的工艺进行优化,并考察其理化性质与脂肪酸组成。结果表明,竹柏果油最适提取工艺条件为:以正己烷为提取溶剂,提取温度75℃,料液比1:40(g/mL),提取时间150min。该条件下,竹柏果仁油提取率为29.32%。经GC-MS定性、定量分析可知,竹柏果油中共检出9种脂肪酸,其中不饱和脂肪酸含量达95.81%,多不饱和脂肪酸总量(76.27%)显著高于单不饱和脂肪酸(19.54%);其中亚油酸含量最高,并富含油酸、二十碳二烯酸和二十碳三烯酸。

关键词:超声波;竹柏果;脂肪酸组成;理化特性

Abstract: In order to further develop the resources of *Podocarpus Nagi*, the technology of ultrasonic assisted soxhlet extraction for the extraction of *Podocarpus nagi* was optimized by single factor and response surface tests. The physicochemical properties and fatty acid composition were analyzed. The results showed that the optimum extraction conditions were as follows: the extraction temperature 75℃, the solid-liquid ratio 1:40(g/mL), the extraction time 150min and extraction solvent n-hexane. Under this condition, the yield of bamboo nut oil was 29.32%. The analysis via GC-MS method showed that nine kinds of fatty acids were detected in the bamboo nut oil, including 95.81% unsaturated fatty acids and 76.27% polyunsaturated fatty acids, which were significantly higher than monounsaturated fatty acids (19.54%), of which linoleic acid content was the highest and was rich in oleic acid, eicosadienoic acid and eicosatrienoic acid.

urated fatty acids (19.54%), of which linoleic acid content was the highest and was rich in oleic acid, eicosadienoic acid and eicosatrienoic acid.

Keywords: ultrasonic; *Podocarpus nagi*; fatty acid composition; physical and chemical properties

人体血清中总胆固醇或低密度脂蛋白胆固醇含量过高易诱发冠心病和脑梗死^[1]。研究^[2-3]发现,不饱和脂肪酸可参与胆固醇酯化过程,提高不饱和脂肪酸的摄入量可降低血清中胆固醇的含量。为此,寻找自然界中优质不饱和脂肪酸的来源,尤其是具有显著生物活性的长链不饱和脂肪酸(C₂₀以上)已成为科研人员关注的热点^[4]。然而由于渔业资源日益减少,有效成分及纯度符合要求的长链不饱和脂肪酸原料十分有限(主要集中于沙丁鱼、三文鱼、金枪鱼等深海鱼类),再加上提纯工艺繁琐复杂等问题使得开发成本较高。虽然植物油脂提纯工艺相对简单且成本可观,但其脂肪酸组成中长链不饱和脂肪酸的比例一般较低。

竹柏(*Podocarpus nagi*)为罗汉松科(*Podocarpaceae*)罗汉松属植物,是古老的裸子植物,起源于中生代白垩纪,被人们称为“活化石”^[5]。竹柏作为常绿乔木,在中国主要分布于华南地区、台湾和云南南部,越南、柬埔寨也有分布^[6]。竹柏根茎及枝叶中含有多种活性成分,包括黄酮、环肽及二萜类化合物等,具有抗炎、抗氧化、抗肿瘤等药理作用,为各地植物志所记载^[7]。竹柏经种子繁殖后10年左右可开花结果,其果仁含油量较高。有数据显示,竹柏盛果期单株产果高,种子含油量可达30%^[8],但其脂肪酸的含量及成分还尚不明确。目前关于竹柏的研究主要集中在叶子和枝干等方面,谢

基金项目:国家自然科学基金(编号:21405024)

作者简介:吕露露,女,广东海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:李承勇(1985—),男,广东海洋大学副教授,博士。

E-mail: cyli_ocean@163.com

收稿日期:2018-01-05

黛等^[9]在竹柏叶中提取出了黄酮物质,而刘娟等^[10]对长叶竹柏的叶子和枝干的化学成分进行了分离与鉴定。但对于竹柏果实成分和应用的研究还未有报道。本试验拟以成熟的竹柏果为原料,对超声波辅助索氏抽提竹柏果油的工艺进行优化,并研究该油脂的基本理化性质及脂肪酸组成,为提取不饱和脂肪酸尤其是长链不饱和脂肪酸提供更多的来源,并为后期竹柏果实中竹柏果油的提取纯化工艺和竹柏资源的开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

竹柏果:廉江市某种植基地,经晒干于-20℃冰箱储存,使用前去皮、壳,取其果仁;

所用试剂均为分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

集热式磁力加热搅拌器:DF-101S型,金坛市医疗仪器厂;

超声波清洗机:JP-040S型,深圳市洁盟清洁设备有限公司;

万分之一电子天平:BSA224S-CW型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

超纯水一体机:D24-UV型,默克密理博实验室设备(上海)有限公司;

台式高速大容量冷冻离心机:5810R型,艾本德中国有限公司;

循环水式真空泵:SHZ-O(Ⅲ)型,巩义市予华仪器有限公司;

旋转蒸发器:RE-3000B型,巩义市予华仪器设备工贸有限公司;

冷凝水泵:CCA-20型,巩义市宏华仪器设备工贸有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品制备 将竹柏果仁经超纯水充分清洗后先于60℃烘箱中干燥待其自然冷却后研磨备用。

1.2.2 基本成分和理化指标测定

(1) 粗蛋白:参照文献^[11]。

(2) 粗脂肪:参照文献^[12]。

(3) 灰分:参照文献^[13]。

(4) 酸值、过氧化值、水分及挥发物、碘值和皂化值:按GB/T 5528—2008系列方法执行。

1.2.3 提取率的测定 称取4.0g经研磨的竹柏果仁,用滤纸包裹好置于250mL锥形瓶中,按料液比1:40(g/mL)加入正己烷,用超声波清洗机(功率:240W,温度:25℃)超声6min后,将样品滤纸包放入抽提筒中,将提取溶剂倒进250mL平底烧瓶中,于75℃水浴加热,回流150min。提取结束后将提取液过滤,滤液经减压蒸馏、干燥、恒重,按式(1)计算竹柏果仁油提取率。

$$R = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

R ——竹柏果油提取率,%;

m_1 ——竹柏果仁油质量,g;

m_2 ——竹柏果仁粉质量,g。

1.2.4 竹柏果油提取工艺优化

(1) 提取溶剂的选择:固定超声时间6min,提取温度75℃,提取时间150min,料液比1:40(g/mL),分别考察正己烷、石油醚、乙酸乙酯对竹柏果油得率的影响。

(2) 超声时间的选择:固定提取溶剂为正己烷,提取温度75℃,提取时间150min,料液比1:40(g/mL),分别考察不同超声时间(2,4,6,8,10,12,14,16,18,20min)对竹柏果油得率的影响。

(3) 提取温度的选择:固定提取溶剂为正己烷,超声时间6min,提取时间150min,料液比1:40(g/mL),分别考察不同提取温度(60,65,70,75,80,85,90℃)对竹柏果油得率的影响。

(4) 提取时间的选择:固定提取溶剂为正己烷,超声时间6min,提取温度75℃,料液比1:40(g/mL),分别考察不同提取时间(60,90,120,150,180,210,240min)对竹柏果油得率的影响。

(5) 料液比的选择:固定提取溶剂为正己烷,提取温度75℃,提取时间150min,超声时间6min,分别考察不同料液比[1:20,1:30,1:40,1:50,1:60,1:70,1:80,1:90,1:100,1:110(g/mL)]对竹柏果油得率的影响。

1.2.5 响应面优化竹柏果油提取工艺 以单因素结果为基准,选取提取温度、回流时间、料液比3个因素设计正交试验,每个因素设置3个水平,对提取条件进行优化。

1.2.6 脂肪酸组成分析

(1) 甲酯化:取竹柏果油20mg于50mL平底烧瓶中,加入2mL正己烷充分涡旋溶解后,再加入2%氢氧化钠-甲醇溶液5mL混匀,置于60℃水浴锅加热,直至液面上的油滴消失,加入浓度为16%的三氟化硼溶液2mL,加热15min,冷却至室温,转入50mL比色管中,用饱和氯化钠溶液清洗平底烧瓶,并转入比色管中,振荡1~2min,静置10min,取比色管中上清液过0.2μm微孔滤膜到进样瓶,作为GC-MS分析试样^[14]。

(2) GC-MS分析:载气是高纯氮气;色谱柱初始温度为50℃,恒温0.5min后,以55℃/min升至155℃,再以8℃/min升至175℃,然后以1.2℃/min升至187℃,最后以9℃/min升至280℃^[15];色谱柱为HP-530m×0.25mm×0.25μm弹性石英毛细管柱^[16]。进样口温度250℃,进样量1μL;分流比100:1;扫描模式SCAN,SIM;He流速45cm/s。

(3) 定量分析:将100mg混合标准样品用正己烷溶解,并定容至2mL得浓度为50mg/mL,再用正己烷分别稀释至40.0,25.0,10.0,5.0,2.0,0.6mg/mL系列的标准溶液,然后用GC-MS/SIM对其进行分析,以峰面积和质量浓度作定量工作曲线。使用相同的GC-MS操作条件和过程来分析竹柏果仁油试样,并基于定量离子的响应值和建立的标准曲线

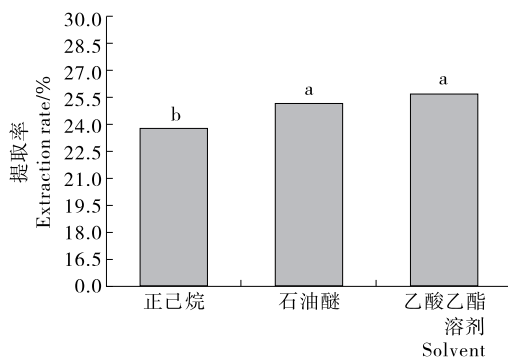
进行绝对定量^[17]。

1.2.7 数据处理 采用 Origin 8.5、SPSS 19.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 提取溶剂对竹柏果油得率的影响 由图 1 可知,乙酸乙酯提取率最高,与石油醚相比差异不明显($P>0.05$),与正己烷相比差异显著($P<0.05$)。乙酸乙酯提取油量最大的原因,可能与乙酸乙酯的极性较大有关,也可能是竹柏果仁油以不饱和脂肪酸为主,其中的不饱和双键能与乙酸乙酯反应形成新的价键,并且加入乙酸乙酯后,油脂的初始运动黏度降低^[18],有助于油脂在乙酸乙酯中的溶解。这两方面的原因使乙酸乙酯对竹柏果仁油的提取率最高。提取溶剂对得率有很大的影响,合适的提取溶剂不仅能使油料细胞在超声情况下发生破碎,还能使油料中的有效成分充分溶出。由于乙酸乙酯价格较高,并且可能造成油样成分损失,石油醚的毒性较高,危险性大。因此综合考虑提取效果、经济成本和安全问题,选用正己烷为提取溶剂进行后续试验。



不同字母表示差异显著($P<0.05$)

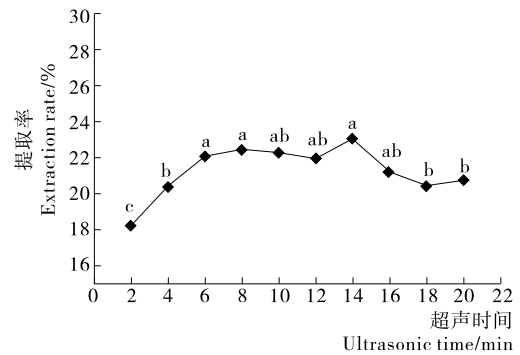
图 1 溶剂对竹柏果出油率的影响

Figure 1 Effect of different solvents on the oil yield rate of *Podocarpus nagi*

2.1.2 超声时间对竹柏果油得率的影响 由图 2 可知,超声时间 6 min 前,竹柏果油提取率随着时间的延长而增加,在 6~12 min 时竹柏果油的提取率变化较为平缓,差异不显著,在 14 min 时出现上升趋势后又趋于平缓,甚至低于 6 min 的提取率,可能是超声加速了正己烷的挥发所致。同时,长时间超声,能量消耗较大。因此,选择超声时间为 6 min 进行后续研究。

2.1.3 提取温度对竹柏果油得率的影响 由图 3 可知,温度低于 70 °C,竹柏果油提取率随着提取温度的上升而增加,温度的上升会促进溶剂对物料的渗透;在 70~85 °C 时提取率的变化趋于稳定;而高于 85 °C,提取率逐渐下降,可能是温度过高,溶剂的蒸发速度加快,对样品的浸提时间减少,使得提取率下降。因此,最终选定 65~75 °C 进行响应面优化试验。

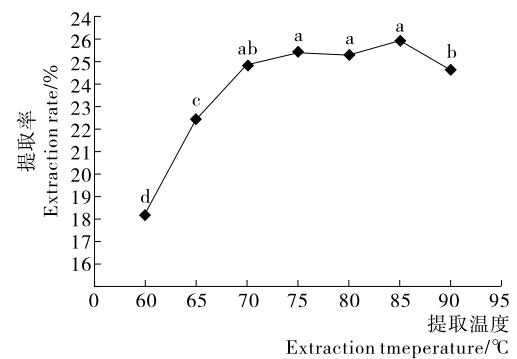
2.1.4 提取时间对竹柏果油得率的影响 由图 4 可知,提取时间在 150 min 以前随着提取时间的延长,竹柏果油的提取



不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 2 超声时间对竹柏果出油率的影响

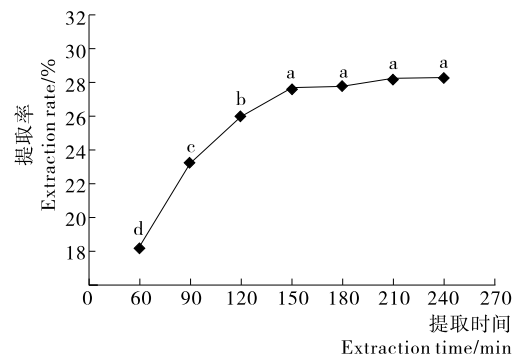
Figure 2 Effect of change of ultrasonic time on the oil yield rate *Podocarpus nagi*



不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 3 提取温度对竹柏果出油率的影响

Figure 3 Effect of change of extraction temperature on the oil yield rate of *Podocarpus nagi*



不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 4 提取时间对竹柏果出油率的影响

Figure 4 Effect of change of extraction time on the oil yield rate of *Podocarpus nagi*

率增长较快,超过 150 min 后,提取率变化不显著。为此应选择 150 min 为响应面优化试验的中心点。

2.1.5 料液比对竹柏果油得率的影响 由图 5 可知,随着提取剂的增加,反应体系的渗透压越大,竹柏果油在溶剂中的扩散速度也会提高,提取率随之上升。当料液比超过 1:40 (g/mL)后,竹柏果油提取率的增加不明显,趋于平缓。进一步增加提取剂会增加提取成本。因此,选择料液比 1:40 (g/mL)为响应面优化试验的中心点。

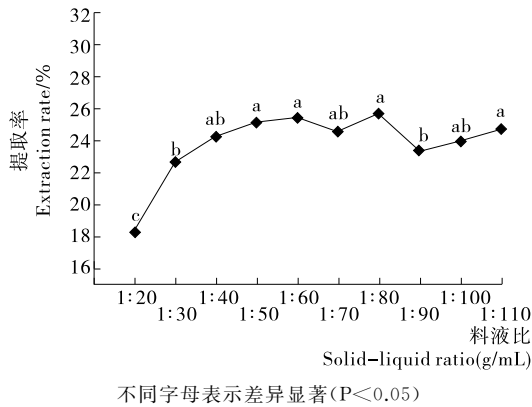


Figure 5 Effect of change of liquid ratio on the oil yield rate of Podocarpus nagi

2.2 响应面实验

2.2.1 响应面实验方案设计及结果分析 以竹柏果仁油提取率(R)为响应值,选择提取温度、提取时间、料液比3个因素设计正交试验,每个因素设置3个水平,进一步优化提取条件,试验因素与水平见表1,试验设计及结果见表2。

使用 Design expert 8.0.6 软件对模型列回归方程,得到竹柏果仁油得率对提取温度、回流时间、料液比的二次多项回归模型方程:

表1 响应面实验因素与水平

Table 1 Response surface test factors and levels

水平	X ₁ 提取温度/°C	X ₂ 提取时间/min	X ₃ 料液比(g/mL)
-1	65	120	1:30
0	70	150	1:40
1	75	180	1:50

表2 响应面实验设计及结果

Table 2 Response surface test design and results

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	R/%	预测值/%
1	-1	-1	0	24.12	24.34
2	1	-1	0	25.30	26.21
3	-1	1	0	27.90	26.99
4	1	1	0	28.64	28.42
5	-1	0	-1	23.31	23.79
6	1	0	-1	24.83	24.62
7	-1	0	1	25.06	25.27
8	1	0	1	28.21	27.73
9	0	-1	-1	26.91	26.21
10	0	1	-1	28.89	29.32
11	0	-1	1	29.62	29.19
12	0	1	1	30.24	30.94
13	0	0	0	32.23	32.00
14	0	0	0	31.21	32.00
15	0	0	0	32.64	32.00
16	0	0	0	33.04	32.00
17	0	0	0	30.87	32.00

$$R = 32.00 + 0.82X_1 + 1.22X_2 + 1.15X_3 - 0.11X_1X_2 + 0.41X_1X_3 - 0.34X_2X_3 - 4.54X_1^2 - 0.97X_2^2 - 2.11X_3^2 \quad (2)$$

2.2.2 回归模型方差分析 由表3知,回归模型中 F = 16.08、P = 0.000 7,说明模型极显著。失拟项不显著,说明试验误差合理,无失拟因素存在,所以模型是有益的,因此可用该回归方程代替试验真实点来分析试验结果。模型变异系数 CV 仅为 3.54%,说明模型的重现性很好,且模型决定系数 R² = 0.953 9,校正系数 Adj.R² = 0.894 5,表明响应值的变化有 89.45%来源于 X₁、X₂ 和 X₃,显示模型拟合度良好。其中一次项 X₃ 及其二次项 X₁²、X₃² 均达到极显著水平;一次项 X₁ 及其二次项 X₂² 均达到显著水平;剩余系列显著性较差 (P > 0.05)。各因素对模型的影响强弱为: X₃ (料液比) > X₁ (提取温度) > X₂ (提取时间)。

不同因子交互作用的 3D 响应面图见图 6~8,结合回归模型 X₁X₂、X₁X₃ 和 X₂X₃ 的 P 值大小分析知, X₁ (提取温度) 和 X₃ (料液比) 对到竹柏果仁油提取率的交互作用相对明显。

表3 回归模型方差分析†

Table 3 Regression model analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	146.51	9	16.28	16.08	0.000 7	**
X ₁	5.43	1	5.43	5.36	0.053 8	
X ₂	11.81	1	11.81	11.66	0.011 2	*
X ₃	10.56	1	10.56	10.43	0.014 5	*
X ₁ X ₂	0.048	1	0.048	0.048	0.833 2	
X ₁ X ₃	0.66	1	0.66	0.66	0.444 6	
X ₂ X ₃	0.46	1	0.46	0.46	0.520 9	
X ₁ ²	86.61	1	86.61	85.54	<0.000 1	**
X ₂ ²	3.98	1	3.98	3.94	0.087 7	
X ₃ ²	18.75	1	18.75	18.52	0.003 6	**
残差	7.09	7	1.01			
失拟项	3.64	3	1.21	1.41	0.363 0	
纯误差	3.45	4	0.86			
总和	153.59	16				

† ** 表示差异极显著, P < 0.01; * 表示差异显著, P < 0.05。

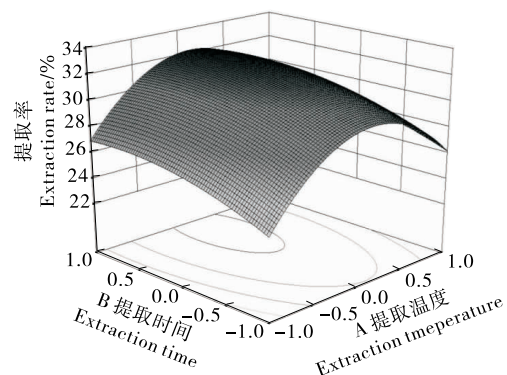


图6 提取温度与提取时间的交互作用

Figure 6 Interactive effects extraction temperature and extraction time

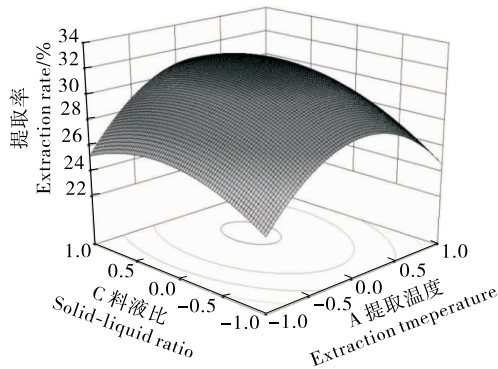


图 7 提取温度与料液比的交互作用

Figure 7 Interactive effects extraction temperature and solid-liquid ratio

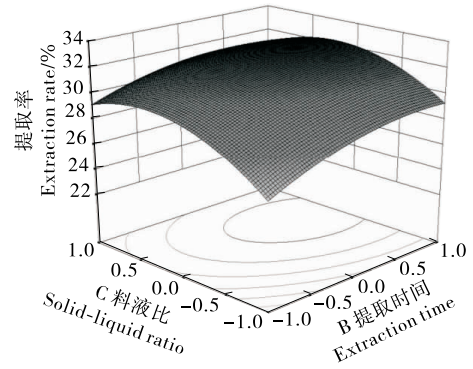


图 8 提取时间与料液比的交互作用

Figure 8 Interactive effects extraction time and solid-liquid ratio

2.3 验证性实验

采用 Design-expert 8.0.6 软件对响应面模型进行拟合, 得最适提取条件为料液比 1 : 42.89 (g/mL)、提取温度 73.16 °C、提取时间 166.15 min, 预测竹柏果仁油提取率 31.22%。结合单因素优化结果并考虑到实际试验操作条件, 提取工艺修正为: 料液比 1 : 40 (g/mL)、提取温度 75 °C、提取时间 150 min。此条件下进行实验验证, 设置 4 次平行实验。得到竹柏果油的平均提取率为 29.32%, 由于竹柏果

2.4 理化指标分析

由表 4 可知, 经检测, 竹柏果仁油所测的各项理化指标符合 GB 2716—2005《食用植物油卫生标准》, 可应用于食品、医药保健品。按照 QB/T 4079—2010《按摩基础油、按摩油》的要求, 过氧化氢值 ≤ 10 mmol/kg, 竹柏果仁油的过氧化氢值为 27.76 mmol/kg, 通过后期提取工艺的进一步改进与油脂精炼可用于化妆品行业。

表 4 竹柏果仁油的理化性质[†]

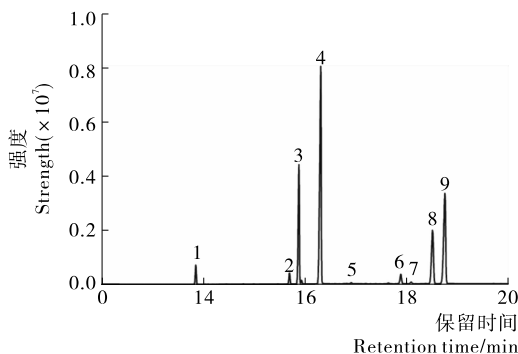
Table 4 The physicochemical properties of *Podocarpus nagi* nut oil

来源	色泽	气味	酸值/ (mg · g ⁻¹)	碘值/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	皂化值/ (mg · g ⁻¹)	过氧化氢值/ (mg · kg ⁻¹)	水分及挥 发物/%
竹柏果仁油	黄色	淡香味	0.32 ± 0.03 *	126.34 ± 6.03 *	150.56 ± 3.43 *	55.52 ± 2.69 *	4.98 ± 0.06 * *
GB 2716—2005	—	—	≤ 3	—	—	≤ 2 500	—

† * 表示重复 3 次, ** 表示重复 2 次。

2.5 GC-MS 分析

采用选择性离子检测的 GC-MS 方法对 9 种脂肪酸甲酯的总离子流图进行扫描, 得到竹柏果仁油样品的总离子流图见图 9, 9 种脂肪酸甲酯的含量见表 5。



1. 十六碳酸 2. 十八碳酸 3. 十八碳一烯酸 4. 十八碳二烯酸 5. 十八碳三烯酸 6. 二十碳酸 7. 二十碳一烯酸 8. 二十碳二烯酸 9. 二十碳三烯酸

图 9 竹柏果油 GC-MS 总离子流

Figure 9 Total ion flow of GC-MS in *Podocarpus nagi* nut oil

表 5 竹柏果仁油 GC-MS 成分分析结果

Table 5 Analysis results of GC-MS composition of oil in *Podocarpus nagi* nut oil

序号	保留时间/min	化合物	含量/%
1	13.859	十六碳酸	2.50
2	15.698	十八碳酸	1.53
3	15.881	十八碳一烯酸	17.87
4	16.303	十八碳二烯酸(亚油酸)	42.31
5	16.918	十八碳三烯酸	0.20
6	17.645	二十碳酸	0.15
7	17.889	二十碳一烯酸	1.67
8	18.503	二十碳二烯酸	12.04
9	18.743	二十碳三烯酸	21.72

由表 5 可知, 竹柏果仁油主要化学成分为脂肪酸类, 鉴别出 9 种脂肪酸, 以亚油酸、二十碳三烯酸、十八碳一烯酸为主, 不饱和脂肪酸含量达到 95.81%, 其中 C₂₀ 以上的长链不饱和脂肪酸占脂肪酸组成的 33.76%。不饱和脂肪酸对人类健康大有裨益, 可软化血管、降低低密度脂蛋白和胆固醇、增强视力等作用^[18], 其中亚油酸具有降低血中胆固醇、调节脂

肪代谢、抑制或清除动脉血栓等作用。竹柏果仁油富含长链不饱和脂肪酸,在保健品领域有极大的开发前景。

3 结论

本试验以成熟的竹柏果为原料,优化了超声波辅助索氏抽提法提取竹柏果仁油的工艺条件,并研究了该油脂的基本理化性质及脂肪酸组成。研究发现,竹柏果仁油中不饱和脂肪酸含量达 95.81%,且多不饱和脂肪酸总量为 76.27%,显著高于单不饱和脂肪酸。竹柏果仁油亚油酸含量相比同类陆生食用油脂优势明显, C_{20} 以上的长链不饱和脂肪酸占脂肪酸组成的 33.76%。本试验尚未对竹柏果仁油中不饱和脂肪酸的应用进行开发,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 钱伟,钱志远.高胆固醇血症的危害与现行对策[J].实用预防医学,2009,16(2):632-634.
- [2] 王欢,郭婕,周云雷.竹柏叶总黄酮不同提取方法比较[J].天然产物研究与开发,2016(3):409-415.
- [3] 张嘉芷.不饱和脂肪酸在预防和治疗心脑血管疾病上的应用前景[J].食品工业科技,1999(S1):149-151.
- [4] 胡亚平,吴刚,张丽,等.长链多不饱和脂肪酸的替代来源—转基因油料作物[J].生物技术通报,2009(6):1-6.
- [5] 陈定如.长叶竹柏生物学特性和繁殖栽培的初步研究[J].广西植物,1987,7(2):159-166.
- [6] 周俊新.福建省竹柏资源状况及开发利用前景分析[J].江西林业科技,2008(5):38-40.
- [7] 黄忠良.长叶竹柏生长和繁殖与环境的关系[J].植物资源与环境,1998(4):44-47.
- [8] 何道航,庞义,任三香,等.长叶竹柏挥发油的化学成分研究[J].林产化学与工业,2005(2):119-121.
- [9] 谢黛,刘瑶,杜红光,等.竹柏叶的高效液相色谱特征图谱研究[J].广州中医药大学学报,2014,31(3):448-451.
- [10] 刘娟.长叶竹柏化学成分的研究[D].昆明:云南师范大学,2015:27-33.
- [11] 张立华,张元湖,刘静,等.石榴籽油超声波辅助萃取工艺研究[J].中国粮油学报,2009(4):82-86.
- [12] 徐文秀,翟永亮.超声波辅助提取花椒籽油的工艺研究[J].中国粮油学报,2013(4):62-66.
- [13] GOULA A M. Ultrasound-assisted extraction of pomegranate seed oil-Kinetic modeling[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(4): 492-498.
- [14] 杨艺婷,张红城,董捷.3种甲酯化方法对GC-MS测定花粉中脂肪酸的影响[J].中国食品学报,2015(3):248-254.
- [15] 杨艺婷.二十种蜂花粉中脂肪酸的组成分析[D].北京:中国农业科学院,2014:12-21.
- [16] 薄海波,王霞,翟宗德,等.碱催化法衍生化气相色谱/质谱法分析青海湖裸鲤鱼油中的脂肪酸[J].色谱,2006(2):181-184.
- [17] 林海.欧李仁油抗氧化活性的研究[J].食品工业科技,2012(15):105-107.
- [18] LARRAURI J A, CONCEPCIÓN SÁNCHEZMORENO A, SAURACALIXTO F. Effect of temperature on the free radical scavenging capacity of extracts from red and white grape pomace peels [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1998, 46(7): 2 694-2 697.
- [19] 王海英,曹宏颖.农林废弃物木醋液抑菌机理进展[J].安徽农业科学,2014(3):741-742,839.
- [20] 徐俊光.壳寡糖对植物病原真菌的抑菌活性及其机理的初步研究[D].大连:中国科学院,2007:116-122.
- [21] 曾荣.凤仙透骨草抑菌活性成分抑菌机理及对柑橘防腐保鲜效果的研究[D].南昌:南昌大学,2012:91-117.
- [22] 陈存坤.新疆主栽厚皮甜瓜采后贮藏保鲜试验研究[D].天津:天津科技大学,2009:24.
- [23] CHEN Zhao, ZHU Chuan-he, HAN Zi-qiang. Effects of aqueous chlorine dioxide treatment on nutritional components and shelf-life of mulberry fruit (*Morus alba* L.)[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2011, 111(6): 675-681.
- [24] 李合生.现代植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2002:143-158.
- [25] ALTUNKAYA A, GOMEN V. Effect of various anti-browning agents on phenolic compounds profile of fresh lettuce (*L. sativa*) [J]. Food Chemistry, 2009, 117(1): 122-126.
- [26] 曹建康,姜微波,赵玉根.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2011.
- [27] 吴慧娟,黄杨名,陈科廷,等.神农香菊全草精油的化学成分及抑菌机理研究[J].食品科学,2012,33(17):35-39.
- [28] 付长雪,刘芳芳,都璐珩,等.生物质热解液和壳聚糖复合保鲜剂对辣椒炭疽病菌抑菌作用研究[J].食品工业科技,2017,38(13):286-291.
- [29] 王海英,曹宏颖.农林废弃物木醋液抑菌机理进展[J].安徽农业科学,2014(3):741-742,839.
- [30] 李富军,张新华.果蔬采后生理与衰老控制[M].北京:中国环境科学出版社,2004:159.
- [31] 马琳.壳寡糖复合其他保鲜剂对杏果贮藏品质的影响[D].北京:中国农业大学,2015.
- [32] HADFIELD K A, BENNETT A B. Polygalacturonases: many genes in search of a function[J]. Plant Physiology, 1998, 117(2): 337-343.
- [33] WAKABAYASHI K, CHUN J P, HUBER D J. Extensive solubilization and depolymerization of cell wall polysaccharides during avocado (*Persea americana*) ripening involves concerted action of polygalacturonase and pectinmethylesterase[J]. Physiologia Plantarum, 2000, 108: 345-352.
- [34] 刘剑锋.梨果实钙的吸收、运转机制及影响因素研究[D].武汉:华中农业大学,2004:60-74.
- [35] 程建军,王震新,于静海,等.苹果梨和鸭梨酶促褐变机理的研究[J].食品科学,2000,21(2):71-73.
- [36] 施琳.山杏壳木醋液有效成分及生物活性研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2013:44-68.

(上接第127页)

- [20] 徐俊光.壳寡糖对植物病原真菌的抑菌活性及其机理的初步研究[D].大连:中国科学院,2007:116-122.
- [21] 曾荣.凤仙透骨草抑菌活性成分抑菌机理及对柑橘防腐保鲜效果的研究[D].南昌:南昌大学,2012:91-117.
- [22] 陈存坤.新疆主栽厚皮甜瓜采后贮藏保鲜试验研究[D].天津:天津科技大学,2009:24.
- [23] CHEN Zhao, ZHU Chuan-he, HAN Zi-qiang. Effects of aqueous chlorine dioxide treatment on nutritional components and shelf-life of mulberry fruit (*Morus alba* L.) [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2011, 111(6): 675-681.
- [24] 李合生.现代植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2002:143-158.
- [25] ALTUNKAYA A, GOMEN V. Effect of various anti-browning agents on phenolic compounds profile of fresh lettuce (*L. sativa*) [J]. Food Chemistry, 2009, 117(1): 122-126.
- [26] 曹建康,姜微波,赵玉根.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2011.
- [27] 吴慧娟,黄杨名,陈科廷,等.神农香菊全草精油的化学成分及抑菌机理研究[J].食品科学,2012,33(17):35-39.
- [28] 付长雪,刘芳芳,都璐珩,等.生物质热解液和壳聚糖复合保鲜剂对辣椒炭疽病菌抑菌作用研究[J].食品工业科技,2017,38(13):286-291.
- [29] 王海英,曹宏颖.农林废弃物木醋液抑菌机理进展[J].安徽农业科学,2014(3):741-742,839.
- [30] 李富军,张新华.果蔬采后生理与衰老控制[M].北京:中国环境科学出版社,2004:159.
- [31] 马琳.壳寡糖复合其他保鲜剂对杏果贮藏品质的影响[D].北京:中国农业大学,2015.
- [32] HADFIELD K A, BENNETT A B. Polygalacturonases: many genes in search of a function[J]. Plant Physiology, 1998, 117(2): 337-343.
- [33] WAKABAYASHI K, CHUN J P, HUBER D J. Extensive solubilization and depolymerization of cell wall polysaccharides during avocado (*Persea americana*) ripening involves concerted action of polygalacturonase and pectinmethylesterase[J]. Physiologia Plantarum, 2000, 108: 345-352.
- [34] 刘剑锋.梨果实钙的吸收、运转机制及影响因素研究[D].武汉:华中农业大学,2004:60-74.
- [35] 程建军,王震新,于静海,等.苹果梨和鸭梨酶促褐变机理的研究[J].食品科学,2000,21(2):71-73.
- [36] 施琳.山杏壳木醋液有效成分及生物活性研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2013:44-68.