

# 薄壳山核桃油水酶法提取工艺优化及品质分析

王亚萍,姚小华,常君,任华东,张成才

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所,杭州 311400)

**摘要:**为优化薄壳山核桃油水酶法提取工艺,以薄壳山核桃仁为原料,采用水酶法提取油脂,筛选出水酶法提油的适宜酶制剂。在单因素试验基础上,采用正交试验研究料液比、加酶量、酶解温度、酶解时间和酶解 pH 对薄壳山核桃油提取率的影响,并对比了水酶法、压榨法和溶剂浸提法 3 种方法制取的薄壳山核桃油的品质。结果表明:蛋白酶为适宜的酶制剂;水酶法提取薄壳山核桃油的最佳工艺条件为料液比 1:4、加酶量 2.5%、酶解温度 55℃、酶解时间 2.0 h、酶解 pH 8,在此条件下薄壳山核桃油提取率为 68.44%;薄壳山核桃油中含有 7 种主要脂肪酸,分别是棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸、花生酸和顺-11-二十碳烯酸,不饱和脂肪酸含量高达 90% 以上,且以油酸和亚油酸为主,油酸含量高达 70% 以上,亚油酸含量在 15% 以上。3 种制油方法中,水酶法制取的薄壳山核桃油具有较高的油酸、生育酚、总酚、 $\beta$ -谷甾醇和角鲨烯含量,油脂品质最好。水酶法是一种较为理想的核桃油提取方法。

**关键词:**薄壳山核桃;水酶法;油脂提取;品质;活性成分

中图分类号:TS224;TS225.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)05-0001-06

## Optimization of aqueous enzymatic extraction process of pecan oil and its quality analysis

WANG Yaping, YAO Xiaohua, CHANG Jun, REN Huadong, ZHANG Chengcai  
(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry (CAF), Hangzhou 311400, China)

**Abstract:** In order to optimize the process of aqueous enzymatic extraction of pecan oil, with the pecan nut as the raw material, the oil was extracted by aqueous enzymatic method and suitable enzyme was selected. On the basis of single factor experiment, the effects of solid-liquid ratio, enzyme dosage, enzymatic hydrolysis temperature, enzymatic hydrolysis time and enzymatic hydrolysis pH on the extraction rate of pecan oil were studied by orthogonal experiment, and the qualities of pecan oils produced by aqueous enzymatic method, pressing method and solvent extraction method were compared. The results showed that protease was selected as the suitable enzyme. The optimal conditions of aqueous enzymatic extraction of pecan oil were obtained as follows: solid-liquid ratio 1:4, enzyme dosage 2.5%, enzymatic hydrolysis temperature 55℃, enzymatic hydrolysis time 2.0 h, and enzymatic hydrolysis pH 8. Under these conditions, the extraction rate of pecan oil was 68.44%. There were seven main fatty acids in pecan oil including palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid,  $\alpha$ -linolenic acid, arachidic acid and *cis*-11-eicosenoic acid. The content of unsaturated fatty acids was higher than 90%, mainly oleic acid and linoleic acid. Oleic acid and linoleic acid accounted for more than 70% and 15% respectively. Comparing the three oil producing methods, the quality of pecan oil extracted by aqueous enzymatic method was the best with higher contents of oleic acid, tocopherol, total

phenols,  $\beta$ -phytosterol and squalene. Aqueous enzymatic method is an ideal method to extract pecan oil.

**Key words:** pecan; aqueous enzymatic method; oil extraction; quality; active substance

收稿日期:2021-06-01;修回日期:2022-02-02

作者简介:王亚萍(1978),女,助理研究员,硕士,研究方向为经济林采后处理及质量控制(E-mail)wypeasy@163.com。

通信作者:姚小华,研究员(E-mail)yaoxh168@163.com。

薄壳山核桃 (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch.), 又名美国山核桃、长山核桃, 是胡桃科山核桃属植物, 原产于美国和墨西哥, 是世界上重要的干果树种之一, 也是珍贵的干果和木本油料树种<sup>[1]</sup>。薄壳山核桃壳薄易剥, 出仁率高, 果仁中富含油脂、蛋白质、碳水化合物, 还含有对人体有益的维生素和矿物质元素等<sup>[2]</sup>, 具有较高的营养和保健价值。与我国的核桃 (*Juglans regia* L.) 和山核桃 (*Carya cathayensis* Sary.) 相比, 薄壳山核桃具有明显的易于机械剥壳取仁、果味纯正、贮藏性好等优点, 其油脂是高档优质的木本食用油<sup>[3]</sup>。目前, 国内对薄壳山核桃的研究主要集中在产地及其分布、生态要求、生物学特性、品种类型、繁殖培育、病虫害防治、栽培技术、生长发育、遗传多样性、品种鉴定和化学成分等方面<sup>[4-5]</sup>。随着薄壳山核桃产量的增大和人们营养保健意识的增强, 有必要对薄壳山核桃油的加工及开发利用进行研究。

水酶法提油具有条件温和、无需经高温高压及有机溶剂处理, 能够较完整地保留油脂固有的天然活性成分等特点, 目前国内已在核桃油<sup>[6-9]</sup>和山核桃油<sup>[10-12]</sup>提取方面有相关研究, 但在薄壳山核桃油提取方面还鲜见报道。

本研究以薄壳山核桃仁为原料, 采用水酶法提取薄壳山核桃油, 在单因素试验的基础上进行正交试验优化, 探求水酶法提取薄壳山核桃油的最佳工艺条件, 旨在更好地利用薄壳山核桃资源, 开发具有高附加值的薄壳山核桃油产品, 推动国内水酶法提取薄壳山核桃油在生产中的应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

薄壳山核桃坚果, 建德市敏捷家庭农场有限公司。将薄壳山核桃坚果去壳, 坚果仁 (含油率为 70.03%) 用粉碎机粉碎为 0.425 mm (40 目) 左右的颗粒。

蛋白酶、纤维素酶、果胶酶、植物复合水解酶, 诺维信 (中国) 生物技术有限公司。4 种酶制剂的特性见表 1。

表 1 4 种酶制剂的特性

酶种类	适宜温度/℃	适宜 pH
蛋白酶	50 ~ 55	7.0 ~ 8.5
植物复合水解酶	45 ~ 55	3.5 ~ 5.5
果胶酶	45 ~ 55	3.5 ~ 5.5
纤维素酶	45 ~ 55	3.5 ~ 5.5

180E - Y 耐欧小型粉碎机; R - 3 旋转蒸发仪、B - 811 索氏提取仪, 瑞士布奇公司; BS - 1F 全温度

振荡培养摇床; GC - 2010 plus 气相色谱仪、UV - 2550 紫外分光光度计, 日本岛津公司; Agilent 1290 高效液相色谱仪, 美国安捷伦公司; Avanti J - E 高速冷冻离心机, 德国贝克曼公司; ZYJ - 9018 家用榨油机。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 水酶法提油

称取 5 g 粉碎的薄壳山核桃仁, 装入 50 mL 离心管中, 按一定料液比加入蒸馏水, 调节 pH, 于 90℃ 水浴中灭酶 10 min, 然后快速冷却。加入一定量的酶制剂, 混匀后于一定温度摇床 (转速 120 r/min) 酶解一定时间, 结束后于 90℃ 水浴中灭酶 10 min, 冷却, 于 10 000 r/min 离心 20 min, 用移液枪小心吸取上层清油, 离心管内的残油再用 10 mL 正己烷分 3 次溶解后倾出, 倾出液合并, 旋转蒸发除去溶剂后与上层清油合并, 称重后于 4℃ 冷藏备用。按下式计算油脂提取率 (Y)。

$$Y = m_1 / (m_0 \times C) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $m_1$  为清油质量, g;  $m_0$  为薄壳山核桃仁质量, g;  $C$  为薄壳山核桃仁含油率。

#### 1.2.2 溶剂浸提法提油

称取 20 g 粉碎的薄壳山核桃仁, 加入石油醚 (沸程 30 ~ 60℃) 于 50℃ 浸提 8 h, 在 50℃ 下旋转蒸发除去石油醚, 得到薄壳山核桃油, 于 4℃ 冷藏备用。

#### 1.2.3 压榨法制油

称取 20 g 薄壳山核桃仁放入榨油机, 选择冷榨模式, 压榨、过滤后用无水硫酸钠脱水, 得到薄壳山核桃油, 于 4℃ 冷藏备用。

#### 1.2.4 测定方法

酸值测定采用 GB 5009. 229—2016 方法, 过氧化值测定采用 GB 5009. 227—2016 方法, 脂肪酸测定采用 GB 5009. 168—2016 (第三法), 生育酚测定采用 GB 5009. 82—2016 (第二法), 总酚测定采用 LS/T 6119—2017, 角鲨烯测定采用 LS/T 6120—2017,  $\beta$ -谷甾醇测定采用 NY/T 3111—2017。

#### 1.2.5 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行基础数据处理、分析与作图。采用 SPSS 19.0 作正交试验并进行显著性及相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 酶制剂的筛选

设置加酶量分别为 1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%, 料液比为 1:4, 纤维素酶、果胶酶、植物复合水解酶的酶解 pH 均为 4.5, 蛋白酶酶解 pH

为7.5,酶解温度为50℃(水浴),酶解时间为2.0 h。以山核桃油提取率为指标,考察酶制剂的影响,结果见图1。

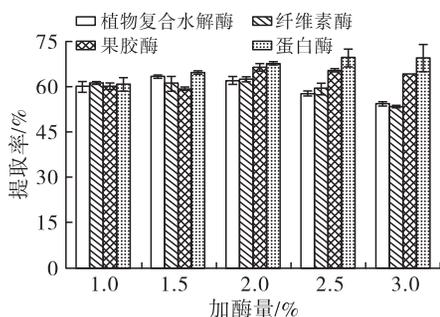


图1 不同酶制剂对薄壳山核桃油提取率的影响

植物细胞的细胞壁主要由果胶和纤维素、半纤维素、木质素等多糖类物质组成,其中嵌入一些功能性蛋白质,油脂通常与其他大分子物质(蛋白质、碳水化合物等)结合构成脂多糖、脂蛋白等复合体。因此,采用酶解工艺可以快速有效地瓦解细胞壁结构,促使细胞内物质释放出来<sup>[13]</sup>。由图1可见,与纤维素酶、果胶酶和植物复合水解酶3种酶制剂相比,蛋白酶的酶解效果最好,薄壳山核桃油提取率最高,这可能是由于在提取过程中蛋白酶酶解了细胞中包被在油脂周围的蛋白质和蛋白质膜,使细胞壁结构瓦解,从而促进了油脂从脂质体中释放出来<sup>[14]</sup>。因此,选择蛋白酶进行后续的酶解工艺优化。

## 2.2 蛋白酶酶解工艺的优化

### 2.2.1 单因素试验

#### 2.2.1.1 料液比

理论上,加水量越大油脂提取率越高<sup>[15]</sup>,适宜的料液比可以使溶液具有较好的流动性,有利于酶解反应的进行,从而有效提高油脂的提取率。设置料液比分别为1:3、1:4、1:5、1:6,在酶解pH 7.5、加酶量2.0%、酶解温度50℃、酶解时间2.0 h条件下,考察料液比对薄壳山核桃油提取率的影响,结果见图2。

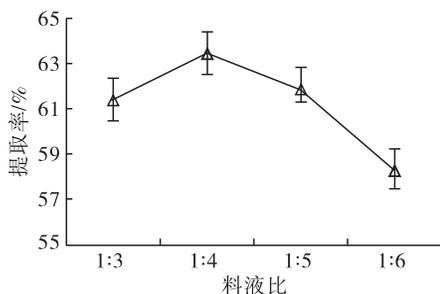


图2 料液比对薄壳山核桃油提取率的影响

由图2可见,当料液比从1:3增加到1:4时,提取率从61.37%提高到63.49%,此后随着料液比的

继续增大,提取率呈显著下降趋势( $P < 0.05$ )。这是由于酶解体系中溶剂(水)的量过低时,酶解液黏稠,不利于酶与底物的充分接触,使得酶解反应不彻底,不利于油脂分子充分迁移出来;溶剂(水)的量过高时,酶解液的浓度降低,酶与底物分子的碰撞概率降低,酶解反应的效率也随之降低<sup>[16]</sup>。因此,选择料液比为1:4。

#### 2.2.1.2 加酶量

加酶量会影响酶与底物的接触概率,进而影响酶促反应效率,其是影响油脂提取率的重要因素之一。设置加酶量分别为1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%,在料液比1:4、酶解温度50℃、酶解时间2.0 h、酶解pH 7.5条件下,考察加酶量对薄壳山核桃油提取率的影响,结果见图3。

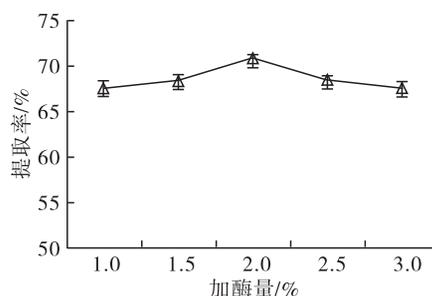


图3 加酶量对薄壳山核桃油提取率的影响

由图3可见,在加酶量1.0%时提取率为67.59%,此后随加酶量的增加,酶解体系中的酶浓度增大,酶与底物的接触概率增大,促进酶解反应的进行,进而增加油脂的提取率<sup>[17]</sup>。当加酶量增大到2.0%时,薄壳山核桃油提取率达到最大值(70.83%),当加酶量继续增加时,提取率开始下降。这是由于底物的量有限,继续增大加酶量,过量的酶会附着在薄壳山核桃仁表面,影响了油脂的释放;同时,加酶量过多也易使酶解体系发生深度水解,水解产物增强蛋白质的乳化性,使油脂分子再度被蛋白质包裹,产生乳化现象,增加了油脂的分离难度;另外,加酶量过多会使酶分子间产生竞争作用,降低了酶的作用效率,致使薄壳山核桃油提取率降低<sup>[18]</sup>。因此,选择加酶量为2.0%。

#### 2.2.1.3 酶解时间

一般来说,酶解时间越长,物料细胞的降解程度越大,油脂提取率越高,但酶解时间过长也可能使体系中乳状液趋于稳定,造成破乳困难。设置酶解时间分别为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h,在料液比1:4、酶解pH 7.5、加酶量2.0%、酶解温度50℃条件下,考察酶解时间对薄壳山核桃油提取率的影响,结果见图4。

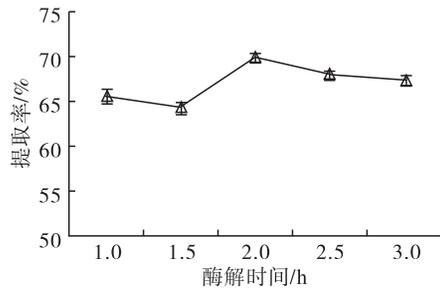


图4 酶解时间对薄壳山核桃油提取率的影响

由图4可见,酶解时间为1.0 h时,提取率为65.61%,1.5 h时提取率稍有下降(64.31%)但不显著( $P > 0.05$ ),当酶解时间延长至2.0 h时,提取率达到峰值(69.87%),此后随着酶解时间的继续延长提取率稍微下降。这可能是由于底物的量和酶的总量有限,反应完全后停止酶解,持续延长时间不会增加提取效率还可能会加重油脂乳化现象<sup>[19]</sup>,从而导致提取率在酶解2.0 h后有所下降。且酶解时间过长,易使油脂发生氧化导致油脂品质下降<sup>[20]</sup>。因此,选择酶解时间为2.0 h。

#### 2.2.1.4 酶解温度

酶解温度过高或过低都不利于油脂的提取,升高温度能够提高反应体系的活化能进而提高反应速率,但过高的温度又会使酶失活,因此适当的酶解温度十分重要<sup>[21]</sup>。设置酶解温度分别为40、45、50、55、60℃,在料液比1:4、酶解pH 7.5、加酶量2.0%、酶解时间2.0 h条件下,考察酶解温度对薄壳山核桃油提取率的影响,结果见图5。

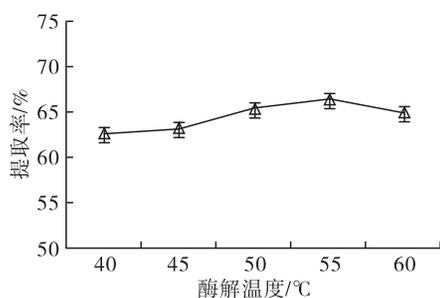


图5 酶解温度对薄壳山核桃油提取率的影响

由图5可见,随酶解温度升高,提取率先增大后降低,在55℃时提取率达到最大,为66.50%。这是由于随温度升高酶解反应的速率增大,相同反应时间内细胞壁裂解程度加大,有利于油脂从细胞中释放出来;同时,酶解体系温度升高可以增大分子扩散系数,降低溶剂及油脂的黏度,加快油脂分子的扩散速度<sup>[22]</sup>;过高的温度超过了蛋白酶的最适温度,酶活力降低,酶解反应速度降低,从而导致提取率下降。因此,选择酶解温度为55℃。

#### 2.2.1.5 酶解 pH

酶解pH既影响酶的活性,又影响油脂的提取和分离。设置酶解pH分别为5、6、7、8、9,在料液比1:4、加酶量2.0%、酶解温度50℃、酶解时间2.0 h条件下,考察酶解pH对薄壳山核桃油提取率的影响,结果见图6。

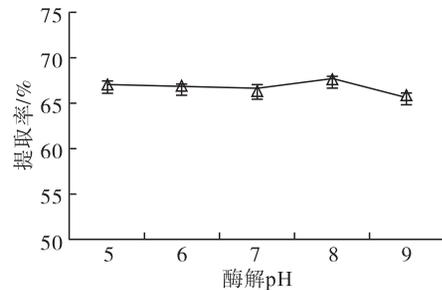


图6 酶解pH对薄壳山核桃油提取率的影响

由图6可见,酶解pH由5增大到7时,提取率逐渐下降,但变化不显著( $P > 0.05$ ),当酶解pH增至8时,提取率最高。这可能是因为过高或过低的pH均会影响酶的空间构象,从而影响酶的活力,当酶解体系的pH逐渐接近蛋白酶的最适pH时,蛋白酶活力升高,酶反应速度加快<sup>[23]</sup>;而当酶解pH大于8时,蛋白酶活力下降,同时pH过高时溶液的乳化程度提高,导致提取率下降<sup>[24]</sup>。因此,选择酶解pH为8。

#### 2.2.2 正交试验

在单因素试验基础上,以蛋白酶为酶制剂,选取料液比、加酶量、酶解温度、酶解时间和酶解pH为因素,以薄壳山核桃油提取率为指标,进行五因素四水平正交试验,优化水酶法提取薄壳山核桃油的工艺条件。正交试验因素水平、正交试验设计和结果分别见表2和表3。

表2 正交试验因素水平

水平	A 料液比	B 加酶量/%	C 酶解温度/°C	D 酶解时间/h	E 酶解pH
1	1:3	1.5	45	1.5	5
2	1:4	2.0	50	2.0	6
3	1:5	2.5	55	2.5	7
4	1:6	3.0	60	3.0	8

表3 正交试验设计和结果

试验号	A	B	C	D	E	提取率/%
1	1	1	1	1	1	62.63
2	1	2	2	2	2	63.55
3	1	3	3	3	3	63.99
4	1	4	4	4	4	66.35
5	2	1	2	3	4	62.91
6	2	2	1	4	3	63.41
7	2	3	4	1	2	65.87

续表 3

试验号	A	B	C	D	E	提取率/%
8	2	4	3	2	1	67.78
9	3	1	3	4	2	63.93
10	3	2	4	3	1	64.52
11	3	3	1	2	4	66.83
12	3	4	2	1	3	63.00
13	4	1	4	2	3	63.44
14	4	2	3	1	4	65.63
15	4	3	2	4	1	64.98
16	4	4	1	3	2	63.67
$k_1$	64.13	63.23	64.14	64.28	64.98	
$k_2$	64.99	64.28	63.61	65.40	64.26	
$k_3$	64.57	65.42	65.33	63.77	63.46	
$k_4$	64.43	65.20	65.04	64.67	65.43	
R	0.86	2.19	1.73	1.63	1.97	

由表 3 可知,5 个因素对薄壳山核桃油提取率影响的主次顺序为加酶量 > 酶解 pH > 酶解温度 > 酶解时间 > 料液比,即加酶量对薄壳山核桃油提取率的影响最大,酶解 pH 和酶解温度次之,料液比的影响最小。薄壳山核桃油的最佳提取条件为  $A_2B_3C_3D_2E_4$ ,即料液比 1:4、加酶量 2.5%、酶解温度 55℃、酶解时间 2.0 h、酶解 pH 8。在最佳条件下进行验证试验,薄壳山核桃油提取率达到 68.44%。

### 2.3 制油方法对薄壳山核桃油品质的影响

#### 2.3.1 薄壳山核桃油的酸值、过氧化值及脂肪酸组成(见表 4)

由表 4 可知,薄壳山核桃油中主要含有 7 种脂肪酸,分别是棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸、花生酸和顺-11-二十碳烯酸,其中不饱和脂肪酸含量高达 90% 以上,且以油酸和亚油酸为主,油酸含量最高,达 70% 以上,亚油酸含量在 15% 以上。对比 3 种制油方法,水酶法制取的薄壳山核桃油中油酸含量最高,为 73.82%,显著高于溶剂浸提法和压榨法( $P < 0.05$ )。3 种制油方法中,水酶法制取的薄壳山核桃油过氧化值和酸值最低,与溶剂浸提法和压榨法相比,过氧化值分别降低了 62.5% 和 25.0%,酸值分别降低了 14.3% 和 42.5%。可见,水酶法更有利于保持薄壳山核桃油的品质。

表 6 薄壳山核桃油的过氧化值、酸值、主要脂肪酸与其活性物质的相关性

项目	过氧化值	酸值	油酸	亚油酸	生育酚	总酚	角鲨烯
油酸	0.00	-0.62*	1				
亚油酸	0.17	0.49	-0.99**	1			
生育酚	-0.90**	0.43	0.44	-0.58	1		
总酚	-0.78*	0.22	0.63*	-0.75*	0.98**	1	
角鲨烯	-0.03	-0.60*	1.00**	-0.99**	0.47	0.65*	1
$\beta$ -谷甾醇	-0.80**	0.25	0.60*	-0.72*	0.98**	1.00**	0.62*

注: \* 表示差异显著( $P < 0.05$ ), \*\* 表示差异极显著( $P < 0.01$ )。

表 4 不同方法制取的薄壳山核桃油的酸值、过氧化值、脂肪酸组成及含量

项目	水酶法	溶剂浸提法	压榨法
过氧化值/(g/100 g)	0.03	0.08	0.04
酸值(KOH)/(mg/g)	0.42	0.49	0.73
脂肪酸含量/%			
棕榈酸	6.45	5.73	5.68
硬脂酸	2.38	2.42	2.67
油酸	73.82	71.70	70.91
亚油酸	15.10	18.75	19.19
$\alpha$ -亚麻酸	1.71	0.92	1.08
花生酸	0.12	0.12	0.13
顺-11-二十碳烯酸	0.32	0.30	0.29
不饱和脂肪酸	90.95	91.67	91.47
饱和脂肪酸	8.95	8.27	8.48

#### 2.3.2 薄壳山核桃油中的活性物质(见表 5)

表 5 不同方法制取的薄壳山核桃油中的活性物质及含量

项目	水酶法	溶剂浸提法	压榨法
生育酚含量/(mg/100 g)			
$\alpha$ -生育酚	0.44	1.30	1.13
$\beta$ -生育酚	ND	ND	ND
$\gamma$ -生育酚	21.00	10.00	18.20
$\delta$ -生育酚	ND	ND	ND
总酚含量/(mg/kg)	14.20	10.30	12.60
角鲨烯含量/(mg/kg)	184.90	175.10	172.00
$\beta$ -谷甾醇含量/(mg/kg)	1 428.0	360.5	1 024.5

注:ND 表示未检出。

由表 5 可见,薄壳山核桃油中含有  $\alpha$ -生育酚和  $\gamma$ -生育酚,且以  $\gamma$ -生育酚为主。3 种方法制取的薄壳山核桃油中  $\gamma$ -生育酚含量呈现极显著差异( $P < 0.01$ ),以水酶法的最高,达 21.00 mg/100 g;此外,水酶法制取的薄壳山核桃油中的总酚、角鲨烯和  $\beta$ -谷甾醇含量均极显著高于其他两种方法( $P < 0.01$ )。

对不同方法制取的薄壳山核桃油的过氧化值、酸值、主要脂肪酸与其活性物质进行了相关性分析,结果如表 6 所示。

由表6可以看出:薄壳山核桃油的过氧化值与生育酚和 $\beta$ -谷甾醇含量存在极显著的负相关,与总酚含量存在显著的负相关;酸值与油酸、角鲨烯含量存在显著的负相关,说明油脂中较高含量的生育酚、总酚、 $\beta$ -谷甾醇、角鲨烯和油酸更有利于油脂品质的保持。因此,水酶法制取的薄壳山核桃油中较高的生育酚、总酚、 $\beta$ -谷甾醇、角鲨烯和油酸含量,使得薄壳山核桃油具有较高的抗氧化性。

### 3 结论

(1)蛋白酶可作为水酶法提取薄壳山核桃油的适宜酶制剂。薄壳山核桃油的最佳提取工艺条件为:料液比1:4,加酶量2.5%,酶解温度55℃,酶解时间2.0h,酶解pH8。在最佳提取工艺条件下,薄壳山核桃油提取率为68.44%。

(2)薄壳山核桃油中含有棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸、花生酸和顺-11-二十碳烯酸7种主要脂肪酸,其中不饱和脂肪酸含量高达90%以上,且以油酸和亚油酸为主,油酸含量高达70%以上,亚油酸含量在15%以上,是一种优质木本食用油。

(3)与传统制油方法相比,水酶法制取的薄壳山核桃油中生育酚、总酚、 $\beta$ -谷甾醇和角鲨烯含量较高,水酶法是一种较为理想的油脂提取方法。

### 参考文献:

- [1] 姚小华. 中国薄壳山核桃[M]. 北京:科学出版社, 2014: 27.
- [2] DO PRADO A C P, DA SILVA H S, DA SILVEIRA S M, et al. Effect of the extraction process on the phenolic compounds profile and the antioxidant and antimicrobial activity of extracts of pecan nut [*Carya illinoensis* (Wangenh) C. Koch] shell[J]. *Ind Crops Prod*, 2014, 52: 552-561.
- [3] 王曼, 李贤忠, 宁德鲁, 等. 薄壳山核桃研究概况及发展趋势[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(6): 93-95.
- [4] 贾晓东, 王涛, 张计育, 等. 美国山核桃的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(4): 74-78.
- [5] 罗会婷, 贾晓东, 翟敏, 等. 薄壳山核桃营养成分的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(8): 39-46.
- [6] 易建华, 朱振宝, 赵芳. 酶的选择对水酶法提取核桃油的影响[J]. *中国油脂*, 2007, 32(2): 27-29.
- [7] 罗勤贵, 李劲, 欧阳韶晖, 等. 水酶法提取核桃油工艺的研究[J]. *中国食品学报*, 2008, 8(6): 58-62.
- [8] 张丽, 李雅雯, 侯旭杰. 响应面法优化水酶法提取核桃油工艺及其细胞形态研究[J]. *食品工业*, 2015, 36(2): 88-93.
- [9] 史双枝, 王新刚, 刘忆冬, 等. 复合酶在核桃仁油脂及蛋白质提取中主要影响因素的研究[J]. *食品科技*, 2009(1): 139-142.
- [10] 钱浩杰, 郜海燕, 穆宏磊, 等. 水酶法提取山核桃油脂工艺研究[J]. *核农学报*, 2017, 31(7): 1365-1373.
- [11] 季泽峰, 方学智, 宋丽丽, 等. 不同制油工艺对山核桃脂肪酸及内源抗氧化物影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(11): 101-104.
- [12] 项方献, 洪松虎, 崔书成, 等. 超声波辅助酶法制备山核桃油的工艺研究[J]. *中国酿造*, 2013, 32(12): 97-100.
- [13] CHENG M H, ROSENTRATER K A, SEKHON J K, et al. Economic feasibility of soybean oil production by enzyme-assisted aqueous extraction processing[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2019, 12: 539-550.
- [14] POLMANN G, BADIA V, FRENA M, et al. Enzyme-assisted aqueous extraction combined with experimental designs allow the obtaining of a high-quality and yield pecan nut oil[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2019, 113: 1-7.
- [15] GENG Q N, CHEN J, GUO R, et al. Salt-assisted aqueous extraction combined with Span 20 allow the obtaining of a high-quality and yield walnut oil[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 121: 1-7.
- [16] 周玥, 郭华, 向娇. 复合酶对水酶法提取油茶籽油的影响[J]. *食品科技*, 2016, 41(2): 211-215.
- [17] 王瑛瑶, 王璋. 水酶法从花生中提取蛋白质与油: 酶解工艺参数[J]. *无锡轻工大学学报*, 2003, 22(4): 60-64.
- [18] 彭瑶瑶, 王千千, 王爱梅, 等. 水酶法提取牡丹籽油的研究[J]. *中国油脂*, 2014, 39(6): 12-17.
- [19] 黄亚芳, 李罗明, 李俊杰, 等. 水酶法提取杨梅核仁油的工艺优化[J]. *食品科学*, 2016, 37(12): 65-70.
- [20] 祖亭月, 何美莹, 张连富. 水酶法提取橡胶籽油的工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(2): 37-42.
- [21] GAI Q Y, JIAO J, WEI F Y, et al. Enzyme-assisted aqueous extraction of oil from *Forsythia suspense* seed and its physicochemical property and antioxidant activity[J]. *Ind Crop Prod*, 2013, 51(5): 274-278.
- [22] 王强, 王存, 王睿, 等. 微波辅助水酶法提取番茄籽油工艺优化及理化特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(10): 43-48.
- [23] 向娇, 郭华, 肖丽飞. 水酶法提取油茶籽油工艺条件优化研究[J]. *湖南农业科学*, 2015(2): 82-85.
- [24] 刘旷. 大扁杏仁水酶法提油及水解蛋白性质研究[D]. 西安:陕西科技大学, 2014.