

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.06.010

关梦真, 陈复生, 王颖颖. 水酶法提取特色植物油的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 84-91.

GUAN M Z, CHEN F S, WANG Y Y. Research advances on aqueous enzymatic extraction of featured vegetable oil[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 84-91.

水酶法提取特色植物油的研究进展

关梦真¹, 陈复生^{1,2}✉, 王颖颖¹

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001;

2. 中原食品实验室, 河南 漯河 462300)

摘要: 特色植物油含有独特的脂肪酸和活性成分, 对人体健康十分有益, 开发和利用特色植物油不仅可以保障消费者需求, 还可以推动我国植物油的高端化发展。水酶法作为高效提取植物油和蛋白技术, 具有工艺简单、绿色环保和提取的植物油和蛋白品质较好等优点。通过介绍特色植物油料的营养成分, 综述水酶法提取特色植物油的原理与工艺特点、工艺条件、植物油和植物蛋白的品质等, 展望水酶法提取特色植物油的前景, 以期水酶法提取特色植物油的应用和发展提供参考。

关键词: 特色植物油; 水酶法; 品质; 提取

中图分类号: TS224 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)06-0084-08

网络首发时间: 2024-11-07 15:38:24

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20241107.0858.002>

Research Advances on Aqueous Enzymatic Extraction of Featured Vegetable Oil

GUAN Meng-zhen¹, CHEN Fu-sheng^{1,2}✉, WANG Ying-ying¹

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe, Henan 462300, China)

Abstract: Featured vegetable oils contain unique fatty acids and bioactive compounds that are highly beneficial to human health. Developing and utilizing characteristic vegetable oils can not only meet consumer demand but also promote the high-end development of vegetable oils in China. The aqueous enzymatic method, as an efficient technique for extracting vegetable oils and proteins, has advantages including simple process, environmental friendliness, and high quality of extracted vegetable oils and proteins. This article introduced the nutritional components of characteristic vegetable oil materials, and then comprehensively reviewed the principles, process characteristics, process conditions, and quality of vegetable oils and proteins obtained by the aqueous enzymatic method. Finally, it had provided an outlook on the development of aqueous enzymatic extraction of characteristic vegetable oils, aiming to provide a theoretical reference for the application and development of this method.

Key words: featured vegetable oil; aqueous enzymatic method; quality; extraction

收稿日期: 2024-01-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2100402)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No.2023YFD2100402)

第一作者: 关梦真, 女, 1999年出生, 在读博士生, 研究方向为蛋白质加工理论与技术, E-mail: guanmengzhen2022@163.com

通信作者: 陈复生, 男, 1963年出生, 博士, 教授, 研究方向为蛋白质加工理论与技术, E-mail: fushengc@haut.edu.cn

油料作物主要有大宗油料作物和特色油料作物,大宗油料作物主要指花生、大豆和油菜籽等,特色油料作物主要有胡麻、葵花籽和芝麻等。虽然传统的油料作物稳步且持续的增长,但仍不足以满足消费者的特定需求。主要原因是特色油料脂肪酸组成中不饱和脂肪酸含量约为 80%以上,并含有独特的活性成分如葵花籽中的绿原酸、芝麻中的芝麻酚等,使其在食品、药品和化妆品等行业都能被广泛应用^[1]。由于消费者对优质食用油的追求,葵花籽油的需求量每年逐步增长,2023 年葵花籽油的进口量达到了 156 万 t^[2]。2020—2023 年特色植物油产量及进口量 (10⁶ t) 见表 1。为保障我国特色植物油的自给、粮油安全、减少我国植物油的对外贸易依存度以及增加特色油料的附加值,所以需对特色油料的加工技术、工艺和设备以及副产品的开发给予重视,其中特色植物油的提取方式更是重中之重^[3]。

目前提取特色植物油的方式有压榨法、溶剂浸出法和水酶法。压榨法提取特色植物油的过程中,油料种子会因为受到强大的机械压力,使油脂释放出来,但在这个过程中会因为压力过大而使油料种子中的蛋白质变性。溶剂浸出法

是通过选择可以溶解油脂的有机试剂来提取油脂,但有机试剂会对油脂和蛋白的品质产生不良影响,从而导致产生的蛋白只能用于饲料或者肥料,所以造成了蛋白质资源的浪费^[4]。因此无论是压榨法还是溶剂浸出法都无法保证同时提取油脂和蛋白,并且其活性成分不易保留,但油脂、蛋白质和活性成分等在婴幼儿食品、功能性食品、化妆品和保健产品中都占有重要的地位。因此为了保证特色油料和蛋白的提取率与品质以及活性成分含量和应用,需要选择一种合适的提取方式^[5]。相比于压榨法和溶剂浸出法,水酶法具有工艺简单、绿色环保和较好保留蛋白质及活性成分等优点,但水酶法提取同时存在明显的缺点,不仅酶制剂使用量大,提取过程中乳状液的形成,导致其清油的提取率远低于压榨法和溶剂浸出法。

本文介绍了特色植物油料的营养成分,综述了水酶法提取特色植物油的原理与工艺特点、工艺条件、植物油和植物蛋白的品质等,并指出了水酶法提取特色植物油中存在的问题,对其进行了展望,以期水酶法提取特色植物油的应用和发展提供参考。

表 1 2020—2023 年特色植物油产量及进口量(10⁶t)Table 1 Featured vegetable oil production and imports 2020—2023 (10⁶ t)

植物油种类	2019—2020	2020—2021	2021—2022	2022—2023	
世界 (产量)	葵花籽油	21.15	18.97	19.62	21.68
	棕榈油	73.11	73.28	72.96	77.56
	椰子油	3.61	3.58	3.73	3.71
	橄榄油	3.15	2.93	3.31	2.49
我国 (消费量)	葵花籽油	2.18	2.07	0.96	1.84
	棕榈油	6.20	6.55	5.10	5.60
我国 (进口量)	葵花籽油	1.75	1.64	0.513	1.56
	棕榈油	6.72	6.82	4.39	6.19

注:数据来源于美国农业部 (United States Department of Agriculture USDA) 官网。

Note: Data from the official website of the United States Department of Agriculture (USDA).

1 特色油料的营养成分

1.1 脂肪酸组成

虽然不同植物油中饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的含量与油料作物的生长环境和储存环境以及提油方式都密切相关,但一般来说特色植物油的

不饱和脂肪酸含量要高于传统植物油。而不饱和脂肪酸不仅可以用于预防代谢紊乱,如糖尿病、心血管疾病和癌症等,而且在众多产品中如肥皂、功能性食品和调味品等都广泛存在,同时不饱和脂肪酸更是优质植物油品质的体现^[6]。特色植物油相比于传统植物油独特之处就是不饱和脂肪酸

的组成和含量（见表 2）。

1.2 活性成分

活性成分是指具有一定生理作用的成分，特色油料作物含有众多活性成分，如葵花籽中的绿原酸、亚麻籽中的木酚素、芝麻中的芝麻酚和紫苏籽中的迷迭香酸等，其具有抗氧化、抗癌、降低血糖、调节脂质代谢和提高免疫力等众多功效，所以其在功能性食品、保健食品和婴幼儿食品市

场中都占有一定比例，又因为其具有抑菌、消炎和抗凝血等功效，所以其在药品领域也有应用^[13]。紫苏更是药食同源植物，数百年来一直被用作治疗流感、哮喘、慢性支气管炎、咳嗽和呕吐的药用植物。紫苏籽含有的迷迭香酸、木犀草素、槲皮素和儿茶素等活性成分具有抗炎、抑菌和抗抑郁及促进视力等功效，在胶囊、香料、化妆品、药品和润滑油等方面都有应用^[14]。

表 2 特色植物和传统植物油脂脂肪酸组成及含量

Table 2 Fatty acid composition and content of specialty and traditional vegetable oils

%

植物油	脂肪酸组成和含量						参考文献
	肉豆蔻酸 (C14:0)	棕榈酸 (C16:0)	硬脂酸 (C18:0)	油酸 (C18:1)	亚油酸 (C18:2)	亚麻酸 (C18:3)	
花生油	0.03	10.67	3.00	44.01	34.09	0.08	[7]
大豆油	—	12.12	3.92	21.63	54.41	7.93	[8]
传统植物油	10.31	12.89	12.79	8.95	9.88	54.67	[9]
亚麻籽油	—	6.22	1.82	30.76	20.75	39.53	[10]
牡丹籽油	—	9.55	5.78	43.81	39.23	0.17	[11]
核桃油	—	7.08	2.43	15.79	62.31	12.40	[12]

2 水酶法的研究进展

2.1 细胞壁的结构

细胞壁是有 3 个独立且交织的聚合网络结构组成，主要包括三层，分别是胞间层、初生壁和次生壁（见图 1）。胞间层中含有大量的果胶，该成分不仅可以避免细胞受到挤压，而且可以促进邻近细胞相互黏合。初生壁形成于细胞生长发育时期，含有 60% 的水分，还含有一定量的纤维素、半纤维素和可溶性蛋白。在生长发育的成熟期，一些特定的细胞会在初生壁和胞间层之间出现沉积，形成次生壁。次生壁中含有疏水性聚苯丙素类大分子木质素和支链未取代的多糖如果胶、纤维素和半纤

维素等，这些多糖之间通过氢键结合形成了排斥水的纤维网络结构^[15-16]。该网络结构使得植物油料作物有一定的机械强度，因此若想获取植物油，需要通过一些机械手段或者破壁酶对细胞壁的网络结构进行破坏。

2.2 水酶法技术原理及工艺特点

水酶法是指在机械粉碎的基础上，采用酶制剂（纤维素酶、果胶酶和蛋白酶等）对油料种子的细胞壁和油脂复合体进行破坏和水解^[29]。从而使油脂和蛋白从植物油料种子中释放，然后通过离心将油与非油成分分离出来，除此之外，酶制剂（蛋白酶）的使用还可以将乳状液表面包裹着油滴的脂蛋白膜破坏，从而将乳状液中的部分油滴释放出来，增加植物油的提取率^[30]。

水酶法提取特色植物油的工艺流程如图 2 所示，可以发现水酶法能同步提取油脂和蛋白，并且具有工艺简单、绿色环保和耗能低等优点。但植物油料种子不同，预处理的手段、粉碎粒径、酶制剂种类和酶解条件都有不同，因此水酶法在提取不同的油料的油脂和蛋白时，提取的工艺条件和流程也有所区别。

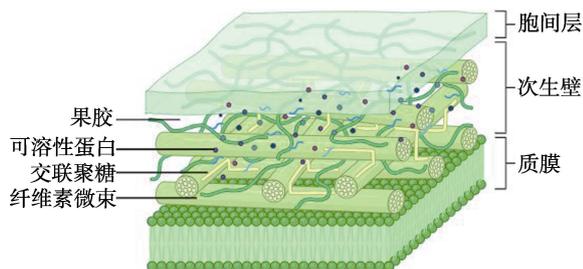


图 1 植物细胞壁的结构与组成（由 BioRender.com 制作）
Fig.1 Structure and composition of plant cell wall
(cited by BioRender.com)

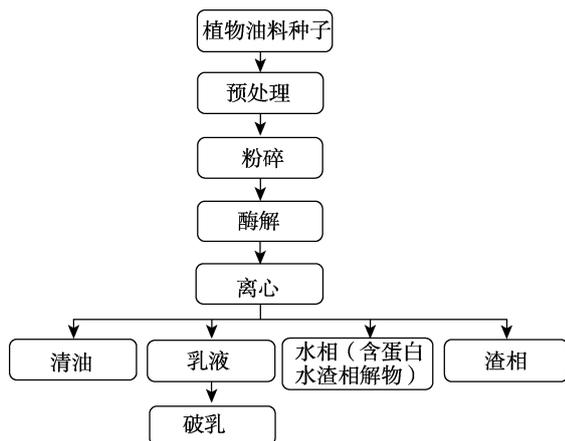


图 2 水酶法提取植物油的工艺流程图

Fig.2 Process flow chart of aqueous enzymatic extraction of vegetable oil

3 水酶法提取特色植物油的研究进展

3.1 工艺条件

水酶法提取植物油时，虽然油料作物有所不同，但可以根据酶制剂对油料种子的破坏成分分为破壁酶、蛋白酶和复合酶等，破壁酶一般主要破坏细胞壁的组成，油料种子不同，破壁酶的及使用量都不同，如花生和葵花籽油提取率最高时，花生使用 1.25% 的 Viscozyme L，而葵花籽使用 2.5% 的复合纤维素酶^[19-20]。蛋白酶主要破坏植物

的油体蛋白及降低乳状液的稳定性，在减少乳状液的形成，同时可以提高清油提取率。水酶法提取核桃油时使用 Alcalase 2.4 L，核桃油提取率达到了 57.40%^[21]。复合酶是破壁酶和蛋白酶的复配，对油料作物进行更大程度的破坏。但不同油料作物细胞壁的组成成分含量不同，所以酶制剂的使用量及酶解条件有所不同。

除了酶制剂的之外，水酶法提取传统和特色植物油时还有所不同，大豆含油率（21.30%）低于核桃（70.05%）和紫苏（37.80%）含油率，但是大豆油的提取率远高于核桃（53.37%）和紫苏（31.34%）。而且提取大豆油时还具有料液比低、酶制剂使用量低和酶解时间短等特点^[22-24]。可能是：（1）特色油料作物相比于传统油料作物颗粒较小，因此在处理同样质量的特色油料时，需要更多酶制剂对油料作物细胞结构进行破坏，然后为保证酶制剂的活性，料液比和酶解时间等也会与传统油料的有所不同。（2）不同或相同的油料作物采用的酶制剂的种类和预处理手段不同，工艺条件和提取率都有所不同。（3）特色油料中活性成分（酚类、茶皂素）限制了其植物油提取率。水酶法提取植物油的工艺条件见表 3。

表 3 水酶法提取不同植物油的工艺条件

Table 3 Process conditions of vegetable oils by aqueous enzymatic methods

植物油料	酶制剂	工艺条件	含油量/%	提取率/%	参考文献	
传统油料	花生	Viscozyme L	粉碎时间 72 s, 料液比 1 : 4, 酶制剂使用量为 1.25%, 酶解时间 2 h, 酶解温度 50 °C。	51.43	87.23	[19]
	大豆	碱性蛋白酶	挤压膨化预处理大豆, 料液比 1 : 6.5, 酶制剂使用量 2%, 酶解时间 3 h, 酶解温度 57 °C, 酶解 pH 9.5。	21.30	91.67	[22]
特色油料	葵花籽	复合纤维素酶	料液比 1:5 (加入的为 pH=4.8 的柠檬酸缓冲液), 酶制剂使用量 2.5%, 酶解时间 7 h。酶解转速 250 r/min。	57.62	87.18	[20]
	芝麻	Alcalase 2.4 L	在料液比 1 : 6, 加酶量为 2%, 酶解温度为 45 °C, 酶解时间为 2 h。	-	57.40	[21]
	核桃	纤维素酶、木瓜蛋白酶	料液比 1 : 4, 酶制剂使用量 3%, 酶制剂配比(1/2)酶解温度 60 °C, 酶解 pH 5, 酶解时间 3 h。	70.05	53.37	[23]
	紫苏	纤维素酶、果胶酶、蛋白酶	超声功率 400 w, 超声时间 24.74 min, 粒径为 250 μm, 料液比 1 : 4.4, 酶制剂配比 (5.5% : 4.5% : 7.5%), 酶解温度 50.87 °C, 酶解时间 2.66 h。	37.80	31.34	[24]

3.2 水酶法提取植物油的品质

3.2.1 脂肪酸组成

脂肪酸组成包括饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸两种，不饱和脂肪酸的组成和含量是植物油品质

的评价指标之一（表 4）。特色油料脂肪酸组成更为合理，因此特色植物油的摄入也对人体的健康更为有益。水酶法提取的花生油、油茶籽油、紫苏籽油和牡丹籽油不饱和脂肪酸含量分别为 80.02%、

89.61%、86.52%和 92.82%，这也表明采用水酶法提取的特色植物油不饱和脂肪酸远高于传统植物油（花生油），主要原因是特色植物油料作物不饱和脂肪酸含量本就高达 80%以上，其次是水酶法提取条件温和，避免了脂肪酸氧化。对于特色油料，不同的提取方法（机械压榨法、溶剂浸提法和酶法）提取的植物油的脂肪酸组成基本无差异，但其脂肪酸的含量不同。分别采用水酶法和溶剂浸提法提取油茶籽和紫苏籽，发现水酶法提取的油茶籽和紫苏籽的不饱和脂肪酸含量（89.61%、86.52%）高于溶剂浸提法所提取的含量（88.98%、85.18%）^[25-27]。水酶法提取的牡丹籽油（44.15%）中亚麻酸含量高于溶剂浸提法^[28]。一般来说水酶法可以较好程度地保留植物油的不饱和脂肪酸含量。

3.2.2 活性成分

特色植物油的活性成分组成与含量使其区别于传统植物油，活性成分具有众多用途，在食品、化妆品和药品等行业都具有重要作用。采用水酶法提取葵花籽油（ α -生育酚）和芝麻油的（ γ -生育酚）的含量高于花生油的 α -生育酚和 γ -生育酚的含量^[29-30]。不同油料作物在提取活性成分，最适合的方法可能有所不同，如水酶法提取葵花籽油生育酚、角鲨烯和甾醇等活性成分的含量均低于压榨法和溶剂浸出法，但水酶法提取油茶籽油中活性成分含量均高于浸出法^[26,31]。由于水酶法的酶解温度一般不超过 60 °C，所以可以更好地保护特色油料中活性成分，但水酶法酶解的时间和 pH 可能会使某些活性成分（酚类）发生降解。不同方法提取植物油的活性成分组成与含量见表 5。

表 4 不同方法提取植物油的脂肪酸的组成与含量

Table 4 Composition and content of fatty acids of vegetable oils extracted by different methods %

植物油	脂肪酸组成和含量					提取方法	参考文献
	棕榈酸 (C16:0)	硬脂酸 (C18:0)	油酸 (C18:1)	亚油酸 (C18:2)	亚麻酸 (C18:3)		
传统植物油							
花生油	10.89	6.28	46.24	33.13	0.65	水酶法	[25]
	8.24	2.13	81.35	7.33	0.30	溶剂浸提法	
油茶籽油	8.08	2.12	82.10	7.20	0.31	水酶法	[26]
特色植物油							
紫苏籽油	7.42	3.73	21.16	12.64	51.38	溶剂浸提法	
	7.13	2.93	20.56	13.66	52.30	超声辅助水酶法	[27]
牡丹籽油	7.00	2.45	24.00	26.62	37.84	溶剂浸提法	
	5.35	1.54	22.11	26.56	44.15	水酶法	[28]

表 5 不同方法提取植物油的活性成分组成与含量

Table 5 Composition and content of active ingredients of vegetable oils extracted by different methods

植物油	活性成分					提取方法	参考文献
	生育酚/(mg/100 g)		维生素 E/ (mg/100 g)	角鲨烯/ (mg/g)	甾醇/ (mg/100 g)		
	α -生育酚	γ -生育酚					
传统植物油							
花生油	8.34	12.25	21.43	-	-	热榨	
	10.29	14.24	25.47	-	-	冷榨	[29]
	11.76	14.15	26.83	-	-	水酶法	
特色植物油							
芝麻油	-	46.94	-	-	237.56	浸出法	
	-	42.93	-	-	222.04	压榨法	[30]
	-	44.60	-	-	248.96	水酶法	
葵花籽油	16.46	0.35	17.50	0.15	327.35	水酶法	
	59.94	0.43	61.20	0.15	327.99	压榨法	[31]
	56.72	0.40	57.86	0.17	351.07	浸出法	
油茶籽油	-	-	21.52	0.13	-	浸出法	
	-	-	24.73	0.21	-	水酶法	[26]

3.3 植物蛋白的功能性质

水酶法相比传统提取方法压榨法和溶剂浸出法, 可以同步提取植物油和蛋白质, 因此其蛋白功能性质也受到了关注。蛋白的功能性质(溶解度、乳化性和起泡性等)使其在功能性食品、婴幼儿食品和啤酒、蛋糕等方面都有一定作用。特色植物蛋白资源的开发一定程度上可以用来补充传统植物蛋白资源的不足或功能性质的缺陷。

水酶法提取的花生蛋白的起泡稳定性和持水性分别为 51.2% 和 7.4 g/g 远高于市售花生蛋白的起泡稳定性(42.9%)和持水性(4.2 g/g)^[32]。虽然特色油料作物的功能性质(溶解度、乳化稳定性、起泡性、起泡稳定性和持水性)远高于大宗油料作物(花生)的功能性质, 但采用水酶法提取特色植物蛋白, 都会对油料作物进行一定预处理, 因为特色油料中的某些活性成分如酚类会对蛋白品质有一定的影响^[33]。采用水酶法提取核桃蛋白和牡丹籽蛋白时, 发现脱酚的核桃水相蛋白乳化稳定性(31.28%)、起泡性(51.23%)和起泡稳定性(2.59 g/g)均高于未脱酚的核桃水相蛋白的乳化稳定性(23.71%)、起泡性(50.03%)和起泡稳定性(1.98 g/g)^[34]。酸浸烘烤预处理的牡丹籽蛋白溶解度(85.06%)和起泡性(62.76%)均高于未处理的牡丹籽蛋白的溶解度(69.17%)和起泡性(34.53%)。因为酸浸烘烤和脱酚都会一定程度破坏酚类, 使蛋白品质得到改善^[35]。

4 展望

特色植物油含有独特的营养价值和活性成分, 开发和提取特色植物油一定程度上可以缓解目前我国植物油对外依存度, 并且可以推动特色植物油品质化和功能化等更深层次的发展。水酶法提取植物油具有工艺简单、条件温和特点, 但水酶法提取特色植物油方面还存在一定的问题:

(1) 特色油料与传统油料作物含油量接近, 但水酶法提取的特色植物油提取率较低。(2) 水酶法提取特色植物油与蛋白时, 某些活性成分如酚类和皂素等, 会对乳状液的稳定性和蛋白品质有一定影响。(3) 酶制剂的使用量较大, 目前水酶法提取特色植物油时酶制剂的使用量约为 2%~3%,

使得酶制剂成本较高, 同时水酶法提取过程会消耗大量的水。

为推动水酶法提取特色植物油的发展, 保障我国消费者对植物油的需求量, 有以下 3 点建议:

(1) 针对于特色油料时, 应结合油料作物本身特性, 实现预处理与水酶法提取工艺合理化结合或提出新型的水酶法提取工艺, 这样也可以更好地保证油和蛋白的提取率与品质。(2) 探究特色油料中活性成分保留的具体方法以及活性成分对乳状液稳定性和蛋白品质影响的原因和机理。(3) 推动酶制剂的发展如固定化酶的技术, 增加酶制剂的生产量, 降低酶制剂成本, 优化部分提取过程, 以实现水资源循环和减少水资源浪费。

参考文献:

- [1] 张雯丽. 中国特色油料产业高质量发展思路与对策[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(2): 167-174.
ZHANG W L. High quality development in direction and countermeasures of specialized oil industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2020, 42(2): 167-174.
- [2] JI J, ZHANG Y, WANG Y, et al. Influence of seed-roasting degree on quality attributes of sunflower oil[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(10): 4028-45.
- [3] 曹历娟, 洪伟, 张兵兵. 新冠疫情与中美第一阶段协议叠加背景下中国农产品进口: 外生冲击与合理应对[J]. 国际贸易, 2021(7): 36-44.
CAO L J, HONG W, ZHANG B B. Study on china's agricultural important under the context of COVID-19 pandemic superimposed the Sino-US and trade agreement: exogenous shock and reasonable response[J]. China Business Update, 2021(7): 36-44.
- [4] GAO Y, DING Z, LIU Y, et al. Aqueous enzymatic extraction: A green, environmentally friendly and sustainable oil extraction technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 104315.
- [5] ZHAO Y, CHEN F, LIU C. Peanut oil and protein extraction using an aqueous enzymatic method and analysis of the characteristics of the emulsions produced[J]. Cereal Chemistry, 2023, 100(3): 762-74.
- [6] 蒋霞, 赵佳平, 刘朋, 等. 木本油料脂肪酸组成、提纯及其应用研究进展[J]. 生物质化学工程, 2022, 56(2): 60-68.
JIANG X, ZHAO J P, LIU P, et al. Research progress of fatty acid composition, purification and application of woody oil[J]. Biomass Chemical Engineering, 2022, 56(2): 60-68.
- [7] YE QING L, XIAODI P, YANNA X. Reliability of peanut oil authenticity identification based on fatty acids and establishment

- of adulteration analysis model[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 512(1): 012063.
- [8] HEMINGWAY J, ESKANDARI M, RAJCAN I. Genetic and environmental effects on fatty acid composition in soybeans with potential use in automotive industry[J]. Crop Science, 2015, 55(2): 658-668.
- [9] AZAD M, NADEEM M, GULZAR N, et al. Impact of fractionation on fatty acids composition, phenolic compounds, antioxidant characteristics of olein and super olein fractions of flaxseed oil[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e15369.
- [10] HAN J, LIU Z, LI X, et al. Diversity in seed oil content and fatty acid composition in three tree peony species with potential as sources of omega-3 fatty acids[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2016, 91: 175-9.
- [11] MOHAMED AHMED I A, MUSA ÖZCAN M, USLU N, et al. Effect of microwave roasting on color, total phenol, antioxidant activity, fatty acid composition, tocopherol, and chemical composition of sesame seed and oils obtained from different countries[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(10): e14807.
- [12] LI H, HAN J, ZHAO Z, et al. Roasting treatments affect oil extraction rate, fatty acids, oxidative stability, antioxidant activity, and flavor of walnut oil[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9, 1077081.
- [13] PARIKH M, NETTICADAN T, PIERCE G N. Flaxseed: its bioactive components and their cardiovascular benefits[J]. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 2018, 314(2): H146-H159.
- [14] PAN F, WEN B, LUO X, et al. Influence of refining processes on the bioactive composition, in vitro antioxidant capacity, and their correlation of perilla seed oil[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 1160-1166.
- [15] MCFARLANE H E, DÖRING A, PERSSON S. The cell biology of cellulose synthesis[J]. Annual Review of Plant Biology, 2014, 65: 69-94.
- [16] 袁雅雯. 梔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.
YUAN Y W. Study on ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of gardenia fruit (*Gardenia jasminoids* Ellis) oil and preparation of nanoemulsion[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2023.
- [17] STEINBRUCH E, WISE J, LEVKOV K, et al. Enzymatic cell wall degradation combined with pulsed electric fields increases yields of water-soluble-protein extraction from the green marine macroalga *Ulva* sp[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103231.
- [18] 包放, 孙晓洋, 陈复生, 等. 物理场耦合水酶法同步释放植物油和蛋白的研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-8[2023-10-02].
- BAO F, SUN X Y, CHEN F S et al. Research advance in the simultaneous release of plant oil and protein using physical field coupled aqueous enzymatic method[J/OL]. Food and Fermentation Industries: 1-8[2023-10-02].
- [19] LIU C, CHEN F, NIU R, et al. Effects of pretreatment on the yield of peanut oil and protein extracted by aqueous enzymatic extraction and the characteristics of the emulsion[J]. Journal of Oleo Science, 2020, 69(11): 1445-1453.
- [20] 冷玉娟. 水酶法提取葵花籽油和葵花籽蛋白的回收[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
LENG Y X. Aqueous enzymatic extraction of sunflower seed oil and recovery of protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.
- [21] LATIF S, ANWAR F. Aqueous enzymatic sesame oil and protein extraction[J]. Food Chemistry, 2011, 125(2): 679-84.
- [22] 李杨, 江连洲, 许晶, 等. 挤压膨化预处理水酶法提取大豆油工艺的研究[J]. 大豆科技, 2019(S1): 127-131.
LI Y, JIANG L Z, XU J, et al. Preparation of soy oil with extrusion pretreatment and aqueous enzymatic extraction[J]. Soybean Science & Technology, 2019(S1): 127-131.
- [23] 刘璇璇. 水酶法同步制备核桃油与核桃多肽工艺及核桃多肽乳化特性研究[D]. 咸阳: 陕西科技大学, 2023.
LIU X X. Study on simultaneous preparation of walnut oil and walnut polypeptide by aqueous enzyme method and emulsification characteristics of walnut polypeptide[D]. Xianyang: Shaanxi University of Science and Technology, 2023.
- [24] LI H, ZHANG Z, HE D, et al. Ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from perilla seeds and determination of its physicochemical properties, fatty acid composition and antioxidant activity[J]. Food Science and Technology, 2017, 37: 71-77.
- [25] 刘晨, 李宇健, 陈复生, 等. 烘烤对水酶法提取花生油品质及乳状液稳定性的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(6): 1-5.
LIU C, LI Y J, CHEN F S, et al. Effect of roasting on quality of peanut oil extracted by aqueous enzymatic method and emulsion stability[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(6): 1-5.
- [26] FANG X, FEI X, SUN H, et al. Aqueous enzymatic extraction and demulsification of camellia seed oil (*Camellia oleifera* Abel.) and the oil's physicochemical properties[J]. European journal of lipid science and technology, 2016, 118(2): 244-251.
- [27] LI Y, ZHANG Y, SUI X, et al. Ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from perilla (*Perilla frutescens* L.) seeds[J]. CyTA-journal of Food, 2014, 12(1): 16-21.
- [28] 荣蕊, 邓晓彤, 黄茜楠, 等. 不同贮藏条件下的水酶法牡丹籽油的氧化稳定性与货架期预测[J/OL]. 中国油脂: 1-13[2024-01-28].
RONG H, DENG X T, HUANG Q N, et al. Oxidation stability and Shelf life prediction of peony seed oil extracted by aqueous enzymatic method under different storage conditions[J/OL]. China Oils and Fats: 1-13 [2024-01-28].
- [29] 李鹏飞. 水酶法提取花生油及蛋白质[D]. 无锡: 江南大学,

2017.

LI P F. Enzyme-assisted aqueous extraction of oil and protein from peanut[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.

- [30] RIBEIRO S A O, NICACIO A E, ZANQUI A B, et al. Improvements in the quality of sesame oil obtained by a green extraction method using enzymes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 464-70.

- [31] 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.

CHENG Q, CHU B J, YANG X, et al. Optimization of aqueous enzymatic extraction process of sunflower seeds oil and the effect on its quality[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(17): 6969-6974.

- [32] LIU C, HAO L, CHEN F, et al. Study on extraction of peanut protein and oil bodies by aqueous enzymatic extraction and characterization of protein[J]. Journal of Chemistry, 2020, 2020: 1-11.

- [33] 任健. 葵花籽水酶法取油及蛋白质利用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.

REN J. Study on Aqueous enzymatic extraction of oil and the utilization of protein from sunflower seed[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.

- [34] 孙敬敬. 核桃仁的脱酚及其水酶法加工研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.

SUN J J. Dephenolization and enzyme assisted aqueous enzymatic extraction of walnut [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.

- [35] 盖晴晴. 水酶法提取牡丹籽油工艺改进及水相蛋白特性研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2020.

GAI Q Q. Process improvement on aqueous enzymatic extraction of peony seed oil and investigation on protein properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。