

# 水酶法提取油脂研究进展

沈玉平, 周旭, 张祖姣, 蒋黎艳

(湖南科技学院 化学与生物工程学院, 湖南 永州 425199)

**摘要:** 油脂来源十分广泛, 因而高效、安全、环保的提取技术在油脂工业化生产中具有重要的意义。水酶法提取油脂条件温和、绿色、安全、生产工艺简单且所得油脂营养价值较高, 在不同油脂原料的提取中具有应用潜力。对水酶法提取油脂的原理和优缺点进行了介绍, 重点综述了水酶法在植物油脂、动物油脂和微生物油脂提取中的应用研究进展, 以及水酶法与其他辅助手段的联用, 以期水酶法油脂提取技术的发展和应提供参考。

**关键词:** 水酶法; 油脂; 提取; 研究进展

**中图分类号:** TS224.4; TS201.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2021)02-0014-06

## Progress on aqueous enzymatic extraction of oil

SHEN Yuping, ZHOU Xu, ZHANG Zujiao, JIANG Liyan

(College of Chemistry and Bioengineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, Hunan, China)

**Abstract:** The sources of oils and fats is very wide, so efficient, safe and environmentally friendly extraction technology is greatly significant in the industrial production of oils and fats. Aqueous enzymatic oil extraction technology has advantages of mild extraction conditions, green, safe, simple production process and high nutritional value of obtained oils and fats. So, it has great application potential in the extraction of oils and fats from different materials. The principle, advantages and disadvantages of aqueous enzymatic extraction of oils and fats were introduced, and the research progress on aqueous enzymatic extraction of vegetable oil, animal fat and microbial oil were reviewed, as well as aqueous enzymatic method combined with other methods, so as to provide a reference for the development and application of aqueous enzymatic oil extraction technology.

**Key words:** aqueous enzymatic extraction method; oils and fats grease; extraction; progress

油脂具有供应能量、促进脂溶性营养物质吸收和利用、提供必需脂肪酸等功能, 除此之外某些特种油脂还具有基因调节<sup>[1]</sup>、促进伤口愈合<sup>[2]</sup>、抗肿瘤<sup>[3]</sup>、抗病毒、抑菌<sup>[4]</sup>等药理作用, 有些油脂还可作为工业用油, 因而油脂在食品、医药和工业领域有广

泛的应用。

机械压榨法和溶剂浸出法是工业化提取油脂的主要方法, 但机械压榨法提油率较低, 而溶剂浸出法容易造成环境污染和油脂中的溶剂残留<sup>[5]</sup>。因此, 高效、安全、环保的油脂提取技术已成为学术研究的热点。水酶法是一种环境友好型油脂提取方法, 可以同时从油料中提取油脂和蛋白质, 具有安全性高、反应条件温和、绿色、所得油脂营养价值较高等优点<sup>[6-7]</sup>, 有利于环境保护和提升油脂品质。本文就水酶法提取油脂的原理和优缺点进行了介绍, 重点综述水酶法在植物油脂、动物油脂和微生物油脂提取中的应用研究进展, 同时介绍水酶法与其他辅助手段的联用, 以期水酶法提取油脂技术的发展和应提供参考。

**收稿日期:** 2020-05-12; **修回日期:** 2020-11-01

**基金项目:** 永州市 2019 年指导性科技计划项目(永科发[2019]15 号, 2019-yzkj-02); 2020 年湖南科技学院新工科研究与实践项目(湘科院教发[2020]10 号-3); 2019 年第一批产学研合作协同育人项目(201901277004)

**作者简介:** 沈玉平(1981), 男, 讲师, 博士, 研究方向为微生物油脂代谢工程(E-mail)shenyup@mail2.sysu.edu.cn。

**通信作者:** 蒋黎艳, 讲师(E-mail)lyj5423@163.com。

## 1 水酶法提取油脂的原理及优缺点

### 1.1 水酶法提取油脂的原理及工艺特点

油脂通常是以脂肪颗粒或脂滴的形式存在于油料细胞内,或者通过与其他大分子物质相结合存在细胞内,如与蛋白质形成脂蛋白,与碳水化合物形成脂多糖<sup>[8]</sup>。水酶法提取油脂技术是采用生物酶(如纤维素酶、半纤维素酶、蛋白酶、果胶酶、淀粉酶、葡聚糖酶等)对油料组织的细胞结构以及脂多糖和脂蛋白的超微结构进行降解,从而增加油料组织中油的流动性,使其从油料中游离出来,再利用油水不相溶的现象,以及油和水对其他非油成分(蛋白质和碳水化合物)亲和力的差异将油脂分离出来<sup>[9-10]</sup>。

水酶法提取油脂的一般工艺流程为:原料预处理→机械粉碎→调节温度和 pH→酶解→灭酶→破乳→离心→收油→干燥<sup>[11-12]</sup>。在水酶法提取油脂过程中,酶种类的选择取决于含油物质的细胞壁成分和结构<sup>[13]</sup>,不同种类的酶能降解油料中不同成分<sup>[14]</sup>。如:蛋白质是大豆细胞壁的主要成分,与纤维素酶、半纤维素酶和果胶酶相比,使用碱性蛋白酶处理大豆粉,可以提高大豆油的提取率<sup>[15]</sup>;果胶是油菜籽细胞壁的主要成分,当使用果胶酶时,油脂提取率高于其他酶<sup>[16]</sup>。然而酶除专一性外,不同酶之间又具有协同性,复合酶聚集多种酶的不同活性,因此在油脂的提取过程中使用复合酶更有利于破坏油料细胞壁、复合体结构以及脂体的聚集,可以提高提油率。周玥等<sup>[17]</sup>在选定单一酶种的基础上进行酶制剂复配,发现先加高温淀粉酶,再加酸性蛋白酶反应时,油茶籽油提取率最高,在复合酶最佳提取工艺条件下,油茶籽油的提取率高达 92.45%。此外,在水酶法提取油脂工艺中,还可以回收提取油脂后水相及残渣中的蛋白质和多糖等产物,因此水酶法在提取油脂时还可生产蛋白、多糖等副产品<sup>[18]</sup>。

总的来说,水酶法提取油脂工艺反应条件温和、工艺简单、设备要求低、无需高温高压处理、无有机溶剂残留,是一种环保、有前景的油脂提取技术。

### 1.2 水酶法提取油脂的优缺点

张雅娜等<sup>[19]</sup>比较了水酶法与热榨法、冷榨法、水代法提取的芝麻油的品质差异,发现水酶法提取的芝麻油的抗氧化成分(如生育酚、芝麻素和芝麻林素)含量最高,色泽浅,外观品质最好,而酸值、过氧化值、不皂化物含量均低于其他工艺,达到一级成品芝麻油标准。李秀娟等<sup>[20]</sup>对水酶法、压榨法以及溶剂浸出法制得的汉麻仁油进行了分析研究,发现水酶法制得的汉麻仁油中多酚含量最高,达 53.86

mg/kg。葛杭丽等<sup>[21]</sup>采用化学分析法、HPLC、GC-MS 对水代法、水酶法和溶剂浸出法所得山茶油的品质进行了分析,发现水酶法所得山茶油中的角鲨烯、 $\alpha$ -维生素 E、 $\beta$ -维生素 E、 $\delta$ -维生素 E 含量高于其他 2 种方法,从感官、理化指标和生物活性物质角鲨烯及维生素 E 含量综合来看,水酶法提取的山茶油品质较优。Konopka 等<sup>[22]</sup>对水酶法南瓜籽油与冷榨南瓜籽油的质量进行了比较,发现水酶法南瓜籽油中甾醇、角鲨烯和生育酚含量较高,只有类胡萝卜素含量略低于冷榨南瓜籽油。

水代法、溶剂浸出法和水酶法所得油脂的理化指标见表 1。从表 1 可以看出,水酶法提取的油脂的游离脂肪酸、过氧化值、碘值均优于或接近水代法和溶剂浸出法。

表 1 水代法、溶剂浸出法和水酶法所得油脂的理化指标

理化指标	油料	水代法	溶剂浸出法	水酶法	参考文献
游离脂肪酸/%	大豆片	-	0.26	0.25	[23]
	油菜籽	0.56	0.81	0.52	[24]
	辣木籽	0.42	1.26	0.43	[25]
	葵花籽	0.68	0.94	0.66	[26]
碘值(I)/(g/100 g)	油菜籽	114.00	117.00	116.00	[24]
	辣木籽	70.00	67.00	76.00	[25]
	葵花籽	120.00	127.00	124.00	[26]
	亚麻籽	-	140.80	161.20	[27]
过氧化值/(mmol/kg)	大豆片	-	3.25	2.03	[23]
	油菜籽	0.35	0.65	0.36	[24]
	辣木籽	0.80	1.05	0.79	[25]
	葵花籽	0.68	0.89	0.63	[26]
	亚麻籽	-	1.20	1.00	[27]
	火龙果种子	-	0.97	0.72	[28]

有研究<sup>[29]</sup>表明,水酶法提取的油脂综合质量指标优于其他方法,可能是因为使用酶水解细胞壁可以进一步促使酚类等物质进入油脂中,酚类等活性物质对油脂的氧化稳定性、货架期、营养、感官等性能均有积极影响。此外,由于水酶法提取过程中水相及乳化层的保护,使一些蛋白质及酚类物质免受氧化。

当然,水酶法的缺点也十分明显。首先,现阶段酶制剂价格仍然较高,提高了生产成本,导致多年来水酶法大多停留在实验室研究和中试阶段,其工业应用一直受到限制。其次,植物油脂提取过程中,由于细胞壁坚硬、厚实、成分复杂,往往需要多种酶的协同作用,这导致部分油料细胞破壁效果欠佳,提油率低。此外,水酶法提取油脂过程中,形成的乳化层和残渣层中残油率高,导致提油率较低。最后,水酶法提取油脂需要消耗大量的水,废水的处理面临很

大的压力。

近年来,随着基因工程、代谢工程和合成生物学技术的发展,酶制剂的生产成本日趋下降,已有工厂开始尝试使用水酶法提取油脂。2013年,湘潭康奕达油茶生物科技有限公司依据湖南农业大学周建平教授的水酶法提取油茶籽油的专利技术,建设投产了全球首条水酶法提取油茶籽油生产线<sup>[30]</sup>。

## 2 水酶法在油脂提取中的应用

### 2.1 水酶法在植物油脂提取中的应用

植物油脂是人体生命活动和机体代谢过程中不可或缺的营养物质,是人类营养的重要来源。研究发现<sup>[31]</sup>,不同的提取方法对植物油脂的功能、品质有显著性影响,水酶法以其反应条件温和、生产工艺简单等优点,在植物油脂的提取研究中备受青睐。刘倩茹等<sup>[32]</sup>采用果胶酶,在料液比1:4、酶解pH 4.5、酶解温度40℃、加酶量1%、酶解时间3h条件下提取油茶籽油,提取率可达到88.63%,油脂品质达到国家二级标准。Liu等<sup>[33]</sup>采用水酶法提取蓖麻籽油,结果发现与其他酶(纤维素酶、半纤维素酶、果胶酶、淀粉酶)相比,中性蛋白酶是提取蓖麻籽油的最好酶,在最佳实验条件下蓖麻籽油最高提取率达77.53%。Yusoff等<sup>[34]</sup>研究了水酶法提取辣木籽油的工艺,结果表明在pH 4.5、料液比1:8和酶解温度40℃条件下以300冲程/min的振荡速度振荡1h,提取率达到70%。Balvardi等<sup>[35]</sup>采用响应面优化水酶法提取伊朗野杏仁油工艺,发现在1%的复合酶(蛋白酶和纤维素酶)、pH 5.76和50℃条件下提取5h,提取率达到77.3%。

水酶法提取的植物油脂的品质较高,无需精炼即可达到国家二级或一级标准。不过,坚硬或细胞壁成分复杂的油料提油率相对较低,这可能是由于酶解效率低,从而无法使油脂从细胞中充分地释放出来。而坚硬度不高、细胞壁成分单一的油料如冬瓜籽<sup>[36]</sup>、玉米胚芽<sup>[37]</sup>等提油率较高,基本在90%以上,更适合采用水酶法提取油脂。

与压榨法、溶剂浸出法相比,水酶法提取的植物油脂的风味物质种类与含量有所不同。研究发现<sup>[38]</sup>,用水酶法提取的花生油风味物质种类比压榨法的多,且水酶法提取的花生油以醛类、醇类、酯类和酸类化合物较多,压榨法提取的花生油以醛类和吡嗪类化合物较多。李鹏飞<sup>[39]</sup>发现在相同的烘烤条件下,新型水酶法提取的花生油风味物质中的吡嗪类化合物含量较压榨法的含量低,而吡嗪类化合物贡献了花生油的特殊烘烤花生风味。用水酶法提取大豆油在一定程度上使大豆油风味浓郁、无异

味,而用溶剂浸出法提取大豆油会产生异味,可能是因为油中游离脂肪酸含量过高使油脂带有刺激气味,同时溶剂浸出法存在高温过程,也会使油脂中的多不饱和脂肪酸发生氧化裂变,进而产生异味<sup>[40]</sup>。还有研究发现用水酶法提取橄榄油可以使其香气增强<sup>[41]</sup>。所以,在水酶法提油过程中如何改善或保留油脂风味有待进一步研究。

### 2.2 水酶法在动物油脂提取中的应用

动物油脂是人类最早广泛食用的油脂,种类繁多,在动物体内通常与蛋白质结合形成脂蛋白或被蛋白质包裹。水酶法可利用蛋白酶等生物酶对蛋白质和脂蛋白等复合体进行降解,从而促进油脂的释放,同时对油脂的品质影响较小。Wang等<sup>[42]</sup>采用水酶法从猪的肥肉中提取猪油,分别对不同性质的蛋白酶如碱性蛋白酶2.4L、中性蛋白酶1.5MG、风味蛋白酶1000L和复合蛋白酶进行了猪油提取率和品质的研究,结果发现碱性蛋白酶2.4L效果较好,提取率达95.19%。张立佳等<sup>[43]</sup>对碱性蛋白酶和胰蛋白酶复合水解黄粉虫提取黄粉虫油的工艺条件进行了研究,发现在酶解温度50.04℃、加酶量799.38U/g(以原料质量计)、pH 8.49、液料比5:1和酶解时间120min的条件下,黄粉虫油提取率为78.51%;采用GC-MS对提取的黄粉虫油脂脂肪酸组成进行分析,共检出18种脂肪酸,其中不饱和脂肪酸含量高达76.22%。李招等<sup>[44]</sup>采用水酶法从大鲵中提取大鲵油,在酶解温度60℃、pH 6.5、酶添加量0.75%和酶解时间90min的条件下,大鲵油提取率可达89.34%;同时采用GC-MS对提取的粗大鲵油脂脂肪酸组成进行了分析,发现粗大鲵油中可检出20种脂肪酸,所得粗大鲵油达到SC/T 3502—2016二级粗鱼油指标要求。

水酶法在动物油脂的提取中应用较普遍,而且提取率较高,最高提取率达到90%以上,最低提取率亦接近80%,所用酶基本为蛋白酶,因为动物油脂主要是以脂蛋白或蛋白质包裹的脂小体的形式存在,只需用蛋白酶将脂蛋白或包裹脂质的蛋白膜水解,即可将油脂释放出来。因此,水酶法较为适合动物油脂的提取。

### 2.3 水酶法在微生物油脂提取中的应用

微生物油脂又称单细胞油脂,是指产油微生物在适宜条件下,利用糖或一般性油脂作为碳源合成的油脂。目前,产油微生物主要有细菌、酵母、霉菌和藻类等<sup>[45]</sup>,其中藻类的含油量和生物量远高于大豆、玉米等陆生植物<sup>[46]</sup>。因此,快速高效的微生物油脂提取方法的开发是利用微生物油脂的关键一

环。微生物油脂提取的方法主要有超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法<sup>[47]</sup>、有机溶剂萃取法<sup>[48]</sup>、酸热法<sup>[49]</sup>、超声波辅助萃取法<sup>[50]</sup>、反复冻融辅助提取法<sup>[51]</sup>、微波辅助提取法<sup>[52]</sup>。相对于上述微生物油脂提取方法,水酶法无需专用设备、条件温和、机械能耗低、对内源产物损伤小,通过酶的专一性作用破坏微生物细胞的细胞壁,促进胞内脂肪颗粒和油滴的释放,是提取微生物油脂的有效方法。

我国微生物油脂产业的发展比较落后,目前大多处于实验室研究或中试阶段。Wu 等<sup>[53]</sup>采用水酶法从微拟球藻中提取油脂,结果发现在最佳条件下油脂提取率可达 90.0%,所得油脂主要含饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸。荣辉等<sup>[54]</sup>以裂壶藻干藻粉为原料,采用两步水酶法对裂壶藻油的提取工艺进行了研究,结果表明:最适工艺条件为料液比 1:7、中性蛋白酶添加量 7%、酶解温度 45℃、酶解时间 3 h、酶解 pH 6.5,碱性蛋白酶添加量 10%、酶解温度 68℃、酶解时间 6 h、酶解 pH 9.4;在最适条件下裂壶藻清油提取率可以达到 91.37%;通过 GC-MS 对裂壶藻油的脂肪酸组成进行分析,其不饱和脂肪酸含量为 47.43%,二十二碳六烯酸(DHA)含量为 35.09%。罗灿选等<sup>[55]</sup>采用水酶法从小球藻中提取油脂,在藻类质量浓度 2.5 g/L, pH 3.5 或 4.5, 温度 30℃ 或 50℃, 纤维素酶、果胶酶和半纤维素酶质量比 1:1:1 或 1:2:1 的工艺条件下,藻油提取率能够达到 86.1%。徐华等<sup>[56]</sup>采用中性蛋白酶和纤维素酶提取裂殖壶菌油脂,并通过单因素实验和正交实验对工艺参数进行优化,油脂提取率达到 82.47%。

#### 2.4 水酶法与其他辅助手段的联用

近年来也有研究人员为了充分发挥各种提取方法的优势,通过水酶法与其他辅助手段的联用来提高油脂的提取率和品质。这些辅助手段主要有超声波辅助、微波辅助、超声波-微波辅助、高压处理和短波红外辅助等。

Goula 等<sup>[57]</sup>采用超声波辅助水酶法提取石榴籽油,结果发现,超声波辅助处理比单独水酶法提取石榴籽油的提取率提高了 18.4%,提取时间缩短了 91.7%,油脂提取率达到 95.8%。超声波辅助水酶法具有高效、环保等特点,在油脂提取方面具有潜力。刘蒙佳等<sup>[58]</sup>采用微波辅助水酶法提取黑芝麻油,在液料比 7:1、微波处理功率 400 W、微波处理时间 4 min、碱性蛋白酶添加量 0.10%、pH 8.0、酶解温度 50℃ 和酶解时间 2 h 的工艺条件下,黑芝麻油得率可达 207.43 g/kg,所得的黑芝麻油气味清香,

质地柔滑而不黏手,呈稳定均一的淡黄色液体状态。微波辅助水酶法提取油脂具有提取时间短、操作简单、原油品质好等优点。Hu 等<sup>[59]</sup>采用超声波-微波辅助水酶法提取樱桃籽油,将樱桃籽粉碎至粒径小于 0.425 mm,在超声波功率 560 W、微波功率 323 W、提取时间 38 min、提取温度 40℃,纤维素酶、半纤维素酶和果胶酶(1:1:1)组成的酶混合物添加量 2.7%,液固比 12:1、酶解时间 240 min、酶解温度 40℃、pH 3.5 的条件下,樱桃籽油提取率为 83.85%,提取的樱桃籽油具有优良的理化性质和较高的生物活性成分。Yusoff 等<sup>[60]</sup>首次将高压处理(HPP)应用于水酶法提取辣木籽油的预处理过程中,结果发现,在 50 MPa、60℃ 下使用 HPP 预处理 35 min,形成的乳液层比单独水酶法形成的更薄,油脂提取率达到 73.02%。此外,Deng 等<sup>[61]</sup>采用短波红外辅助水酶法提取花生油,结果发现,与对照组相比,油脂提取率显著提高了 8.74%,达到 83.75%;通过对花生油品质特性的进一步分析发现,短波红外辅助水酶法提取的花生油中多酚类物质的含量(2.79 mg/kg)比对照组的高 62.21%,挥发性化合物的种类和相对含量也大大增加,使得整体风味更佳。

综上所述,水酶法与其他方法联用,有助于破坏细胞壁、增加细胞膜的透油性,从而缩短提取时间,提高油脂的提取率,提升油脂的品质。

### 3 结束语

总体而言,水酶法是一种安全、环保、经济的新兴提油技术,符合当今社会低碳环保、绿色安全、环境友好的发展趋势。水酶法提取油脂在不改变油脂脂肪酸组成的情况下,能够获得高品质的油脂,有些甚至不需要进一步的精炼就可以生产出符合质量要求的优质油脂,此外还能较大限度地保留有益成分,符合当今社会人们对营养健康的要求。但水酶法也有缺点,如酶的特异性不高且目前对特异性问题研究较少,酶制剂价格偏高导致生产成本高,以及水和油之间形成乳化层不利于油的提取。相对而言,压榨法和溶剂浸出法制油操作简单,成本低,所以在食用植物油的相关产品标准中,绝大多数均为压榨法成品油、浸出精炼成品油,而水酶法制取油脂的产品还没有投入工业化应用。对水酶法来说,发挥其优势,克服其不足,针对不同油料的特点和产品市场定位,有针对性地与其他辅助手段联用,各取所长,方能更好地发挥水酶法作用,促进水酶法的应用和推广。相信,未来随着科学技术的发展,酶制剂成本的下降,水酶法在油脂工业化生产中将拥有一定的开

发应用潜力。

### 参考文献:

- [1] JUMP D B. *N* - 3 polyunsaturated fatty acid regulation of hepatic gene transcription[J]. *Curr Opin Lipidol*, 2008, 19 (3): 242 - 247.
- [2] ZONG J W, JIANG J, SHI P. Fatty acid extracts facilitate cutaneous wound healing through activating AKT, ERK, and TGF - beta/Smad3 signaling and promoting angiogenesis [J]. *Am J Transl Res*, 2020, 12(2): 478 - 492.
- [3] JÓŹWIAK M, FILIPOWSKA A, FIORINO F, et al. Anticancer activities of fatty acids and their heterocyclic derivatives [J/OL]. *Eur J Pharmacol*, 2020, 871: 17293 [2020 - 05 - 12]. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2020.172937>.
- [4] WANG W Y, WANG R, ZHANG G J. In vitro antibacterial activities and mechanisms of action of fatty acid monoglycerides against four foodborne bacteria [J]. *J Food Prot*, 2020, 83(2): 331 - 337.
- [5] 黄鑫, 张利军, 张保艳. 油茶籽油提取方法对比分析 [J]. *中国油脂*, 2019, 44(6): 9 - 13.
- [6] LATIF S, ANWAR F. Aqueous enzymatic sesame oil and protein extraction [J]. *Food Chem*, 2011, 125(2): 679 - 684.
- [7] SHENDE D, SIDHU G K. Response surface methodology to optimize enzyme - assisted aqueous extraction of maize germ oil [J]. *J Food Sci Technol*, 2016, 53 (8): 3282 - 3295.
- [8] MUNIGLIA L, CLAISSE N, BAUDELET P H, et al. Enzymatic aqueous extraction (EAE) [M]//CHEMAT F, VIAN M A. *Alternative solvents for natural products extraction*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 167 - 204.
- [9] 邱青璐, 闫桂莲, 崔海明, 等. 水酶法在植物油提取技术中的应用进展 [J]. *世界热带农业信息*, 2019 (9): 21 - 23.
- [10] 吴翰, 宋元达. 果蔬籽油提取技术研究进展 [J]. *中国果菜*, 2020, 40(1): 1 - 5, 10.
- [11] YUSOFF M M, GORDON M H, NIRANJAN K, et al. Aqueous enzyme assisted oil extraction from oilseeds and emulsion de - emulsifying methods: a review [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2015, 41(1): 60 - 82.
- [12] FANG X Z, FEI X Q, SUN H, et al. Aqueous enzymatic extraction and demulsification of camellia seed oil (*Camellia oleifera* Abel.) and the oil's physicochemical properties [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2016, 118(2): 244 - 251.
- [13] PASSOS C P, YILMAZ S, SILVA C M, et al. Enhancement of grape seed oil extraction using a cell wall degrading enzyme cocktail [J]. *Food Chem*, 2009, 115 (1): 48 - 53.
- [14] 刘晨, 陈复生, 牛瑞浩, 等. 水酶法提取花生油研究进展 [J]. *食品工业*, 2020, 41(3): 262 - 266.
- [15] ROSENTHAL A, PYLE D L, NIRANJAN K, et al. Combined effect of operational variables and enzyme activity on aqueous enzymatic extraction of oil and protein from soybean [J]. *Enzyme Microb Technol*, 2001, 28 (6): 499 - 509.
- [16] ZHANG S B, WANG Z, XU S Y. Optimization of the aqueous enzymatic extraction of rapeseed oil and protein hydrolysates [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2007, 84 (1): 97 - 105.
- [17] 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.
- [18] KARKI B, MAURER D, KIM T H, et al. Comparison and optimization of enzymatic saccharification of soybean fibers recovered from aqueous extractions [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(2): 1228 - 1233.
- [19] 张雅娜, 齐宝坤, 郭丽, 等. 水酶法芝麻油与其他工艺芝麻油品质差异研究 [J]. *中国油脂*, 2019, 44(9): 36 - 40, 46.
- [20] 李秀娟, 薛雅琳, 刘晓辉, 等. 3 种不同加工工艺汉麻仁油营养成分研究 [J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(12): 105 - 109.
- [21] 葛杭丽, 彭丽, 孟祥河, 等. 不同提取方法所得山茶油的品质比较 [J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(7): 1195 - 1200.
- [22] KONOPKA I, ROSZKOWSKA B, CZAPLICKI S, et al. Optimization of pumpkin oil recovery by using aqueous enzymatic extraction and comparison of the quality of the obtained oil with the quality of cold - pressed oil [J]. *Food Technol Biotechnol*, 2016, 54(4): 413 - 420.
- [23] JUNG S, MAURER D, JOHNSON L A. Factors affecting emulsion stability and quality of oil recovered from enzyme - assisted aqueous extraction of soybeans [J]. *Bioresour Technol*, 2009, 100(21): 5340 - 5347.
- [24] LATIF S, DIOSADY L L, ANWAR F. Enzyme - assisted aqueous extraction of oil and protein from canola (*Brassica napus* L.) seeds [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2008, 110(10): 887 - 892.
- [25] LATIF S, ANWAR F, HUSSAIN A I, et al. Aqueous enzymatic process for oil and protein extraction from *Moringa oleifera* seed [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2011, 113(8): 1012 - 1018.
- [26] LATIF S, ANWAR F. Effect of aqueous enzymatic processes on sunflower oil quality [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2009, 86(4): 393 - 400.
- [27] LONG J J, FU Y J, ZU Y G, et al. Ultrasound - assisted extraction of flaxseed oil using immobilized enzymes [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(21): 9991 - 9996.
- [28] RUI H, ZHANG L, LI Z, et al. Extraction and characteristics of seed kernel oil from white pitaya [J]. *J Food Eng*, 2009, 93(4): 482 - 486.
- [29] NAJAFIAN L, GHODSVALI A, KHODAPARAST M H H, et al. Aqueous extraction of virgin olive oil using

- industrial enzymes [J]. Food Res Int, 2009, 42(1): 171-175.
- [30] 李木子. 全球首条水酶法油茶籽油生产线投产[J]. 农产品加工, 2013(2): 74.
- [31] XU Y J, JIANG F, LIU Y F, et al. Foodomics revealed the effects of extract methods on the composition and nutrition of peanut oil [J]. J Agric Food Chem, 2020, 68: 1147-1156.
- [32] 刘倩茹, 赵光远, 王瑛瑶, 等. 水酶法提取油茶籽油的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(8): 36-40.
- [33] LIU Q, LI P W, CHEN J Z, et al. Optimization of aqueous enzymatic extraction of castor (*Ricinus communis*) seeds oil using response surface methodology [J]. J Biobased Mater Bioenergy, 2019, 13(1): 114-122.
- [34] YUSOFF M M, GORDON M H, EZEH O, et al. Aqueous enzymatic extraction of *Moringa oleifera* oil [J]. Food Chem, 2016, 211: 400-408.
- [35] BALVARDI M, REZAEI K, MENDIOLA J A, et al. Optimization of the aqueous enzymatic extraction of oil from Iranian wild almond [J]. J Am Oil Chem Soc, 2015, 92(7): 985-992.
- [36] 吕秋冰, 罗霜, 杨恒, 等. 水酶法提取冬瓜籽油工艺优化及体外抗氧化活性研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(3): 16-21.
- [37] DICKEY L C, JOHNSTON O B, KURANTZ M, et al. Modification of aqueous enzymatic oil extraction to increase the yield of corn oil from dry fractionated corn germ [J]. Ind Crop Prod, 2011, 34(1): 845-850.
- [38] 董林均, 刘国琴, 李琳. 五种制油工艺对花生油风味物质种类的影响 [J]. 粮油食品科技, 2020, 28(2): 14-21.
- [39] 李鹏飞. 水酶法提取花生油及蛋白质 [D]. 江苏无锡: 江南大学, 2017.
- [40] 李杨, 张雅娜, 王欢, 等. 水酶法提取大豆油与其他不同种大豆油品质差异研究 [J]. 中国粮油学报, 2014, 29(6): 46-52.
- [41] 雷春妮, 张雅珩, 李经纬, 等. 不同品种与加工工艺对初榨橄榄油挥发性风味成分的影响 [J]. 中国油脂, 2019, 44(10): 35-41, 54.
- [42] WANG Q L, JIANG J, LI J W, et al. High quality lard with low cholesterol content produced by aqueous enzymatic extraction and  $\beta$ -cyclodextrin treatment [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2016, 118(4): 553-563.
- [43] 张立佳, 张建新, 王临宾. 水酶法提取黄粉虫油工艺优化 [J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(1): 166-170.
- [44] 李招, 王建文, 王建辉, 等. 大鲮油的水酶法提取及精制过程中脂肪酸组成的变化 [J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31(11): 1975-1981.
- [45] 林粤顺, 景旭东, 周红军, 等. 微生物油脂研究进展 [J]. 仲恺农业工程学院学报, 2015, 28(3): 66-70.
- [46] MIAO X L, WU Q Y. High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides* [J]. J Biotechnol, 2004, 110(1): 85-93.
- [47] 王莉娟, 王卫卫, 张前, 等. 超临界二氧化碳法萃取丝状真菌油脂及其成分测定 [J]. 微生物学杂志, 2009(5): 103-107.
- [48] GALAFASSI S, CUCCHETTI D, PIZZA F, et al. Lipid production for second generation biodiesel by the oleaginous yeast *Rhodotorula graminis* [J]. Bioresour Technol, 2012, 111: 398-403.
- [49] 常艳红. 酸热法提取酵母油脂条件的研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012(13): 25.
- [50] 马千然. 利用发酵废母液培养小球藻及超声波破壁提取油脂的工艺研究 [D]. 北京: 北京工商大学, 2013.
- [51] 杜晓凤, 邹宁, 孙东红. 微绿球藻油脂提取方法的优化 [J]. 中国油脂, 2012, 37(5): 10-12.
- [52] BALASUBRAMANIAN S, ALLEN J D, KANITKAR A, et al. Oil extraction from *Scenedesmus obliquus* using a continuous microwave system - design, optimization, and quality characterization [J]. Bioresour Technol, 2011, 102(3): 3396-3403.
- [53] WU C C, XIAO Y, LIN W G, et al. Aqueous enzymatic process for cell wall degradation and lipid extraction from *Nannochloropsis* sp. [J]. Bioresour Technol, 2017, 223: 312-316.
- [54] 荣辉, 吴兵兵, 杨贤庆, 等. 响应面优化水酶法提取裂壶藻油的工艺 [J]. 中国油脂, 2018, 43(2): 98-103.
- [55] 罗灿选, 李耀光. 小球藻中油脂的水酶法提取及在卷烟中应用 [J]. 食品工业, 2019, 40(8): 40-43.
- [56] 徐华, 张茹, 刘连亮, 等. 裂殖壶菌油脂水酶法提取工艺优化及其脂肪酸组成分析 [J]. 中国粮油学报, 2018, 33(2): 44-49.
- [57] GOULA A M, PAPTAEODOROU A, KARASAVVA S, et al. Ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from pomegranate seeds [J]. Waste Biomass Valor, 2018, 9(1): 1-11.
- [58] 刘蒙佳, 周强, 黄玲玲. 微波辅助水酶法提取黑芝麻油脂的研究 [J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 95-101.
- [59] HU B, WANG H Y, HE L F, et al. A method for extracting oil from cherry seed by ultrasonic-microwave assisted aqueous enzymatic process and evaluation of its quality [J]. J Chromatogr A, 2019, 1587: 50-60.
- [60] YUSOFF M M, GORDON M H, EZEH O, et al. High pressure pre-treatment of *Moringa oleifera* seed kernels prior to aqueous enzymatic oil extraction [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2017, 39: 129-136.
- [61] DENG B X, LI B, LI X D, et al. Using short-wave infrared radiation to improve aqueous enzymatic extraction of peanut oil: evaluation of peanut cotyledon microstructure and oil quality [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2018, 120(2): 1-27.