

水酶法提取植物油脂技术研究进展

杨建远^{1,2}, 邓泽元^{1*}

(1. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 南昌 330047; 2. 九江学院药学与生命科学学院, 九江 332000)

摘要: 水酶法是在水代法基础上发展起来的一种现代提取植物油脂新技术。水酶法主要利用生物酶的酶解作用促进植物油脂的游离, 与传统压榨法、有机溶剂浸出法及超临界萃取法等相比, 其工艺简单, 对设备的要求低, 无高温处理及有机溶剂残留, 油脂品质更好。因此, 水酶法是一种“绿色、安全、营养”的提油新技术。本文介绍了水酶法提取植物油脂的技术原理及工艺特点, 生物酶的选择与生物酶在水酶法提油中的应用现状, 比较了水酶法与其他传统方法制备的植物油脂的品质; 并重点讨论了水酶法提取植物油脂技术研究的关键问题, 即: 水酶法提油过程中乳化液的形成机制及破乳技术; 同时, 针对水酶法提油技术存在的用酶量大、成本较高及废水处理等问题提出了可能的解决途径, 并对其应用前景进行了展望。

关键词: 水酶法; 乳化机制; 破乳方法; 品质

Research progress on aqueous enzymatic extraction for the production of plant oil

YANG Jian-Yuan^{1,2}, DENG Ze-Yuan^{1*}

(1. *State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China;*
2. *College of Pharmaceutical and Life Sciences, Jiujiang University, Jiujiang 332000, China*)

ABSTRACT: Aqueous enzymatic extraction is an emerging modern technique for oil extraction based on aqueous extraction. Aqueous enzymatic extraction can promote oil dissociate by enzyme digestion, which is simpler, lower requirement for equipments, avoiding high-temperature processing and organic solvent residues, and oil with best quality, compared with the traditional technology such as squeeze, organic solvent extraction and the supercritical fluid extraction method. Aqueous enzymatic extraction is a promising method due to oil nutrition, safety and economy. The technological characteristics and theory, enzymatic selection and application, and the quality of oil were reviewed, and the emulsion formation mechanism, de-emulsification methods were discussed in this paper. Moreover, the existing problems were discussed on aqueous enzymatic extraction, such as consumption of large amounts of enzyme, high cost for produce and wastewater treatment, and the promising prospect of aqueous enzymatic extraction were also forecasted.

KEY WORDS: aqueous enzymatic extraction; emulsification mechanism; de-emulsification; quality

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560464)、江西省研究生创新专项资金项目(YC2015-B015)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31560464) and the Innovation Fund Designated for Graduate Students of Jiangxi Province (YC2015-B015)

*通讯作者: 邓泽元, 教授, 主要研究方向为食品营养与功能食品。E-mail: dengzy@ncu.edu.cn

***Corresponding author:** DENG Ze-Yuan, Professor, State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China. E-mail: dengzy@ncu.edu.cn

1 引言

提油工艺的研究历史悠久, 现有多种传统或现代制油工艺得到广泛研究与应用, 主要有热压榨法、冷压榨法、有机溶剂浸出法、超临界萃取法、水代法及水酶法等。水酶法是在水代法基础上发展起来的一种提油新技术, 由于生物酶的酶解作用有效破坏油体细胞及有效减少了乳化, 水酶法在保留了水代法优点的基础上提高了提油率, 与传统压榨法、有机溶剂浸出法及超临界萃取法等相比, 其工艺简单, 设备要求低, 避免了高温对活性成分的破坏及有机溶剂的残留, 使得油脂品质更好, 具有“绿色、安全、营养”之优点。近年来, 水酶法已是茶油、大豆油、花生油、菜籽油、橄榄油、核桃油、枸杞籽油、南瓜籽油、火龙果种籽油及松籽油等含油种籽提油研究的热点^[1-5]。

2 水酶法技术原理及工艺特点

水酶法是利用机械破碎之后增加生物酶酶解限制乳化或破乳, 使油脂从含油种籽中释放到水相中, 利用蛋白、多糖、淀粉等非油脂成分对油、水的双亲性及油水密度的不同, 采用离心力将油层与水相及残渣分离的技术^[6]。

水酶法提油工艺流程为^[7]: 原料预处理→粉碎过筛→缓冲液、pH 及温度→加酶酶解→灭酶→破乳→离心→清油→干燥, 其工艺酶解提油后水相及残渣中产生的低分子量的植物蛋白、纤维等具有较高的利用价值。因此, 水酶法可以在油料种籽中提取油脂的同时还可生产蛋白、糖等副产物^[8]。

Rovaris 等^[9]研究表明利用水酶法提取大豆油时产生的液体残渣中蛋白占干基的 32%(调 pH 时)或 52%(不调 pH 时), 总碳水化合物约占干基 31%, 蛋氨酸含量为 23~66 mg/L, 蛋白电泳条带显示有多个分子量低于 25 kD 的小肽, 具有较好的综合利用价值。因此, 水酶法绿色安全、投资少、耗能低、废弃物易利用处理, 在油脂工业未来前景广阔^[10]。

3 酶的选择

水酶法主要利用酶对含油植物细胞结构及蛋白等乳化成分进行酶解破坏, 不同的酶的专一性不同, 酶的种类及不同酶组合对水酶法提油率的影响存在差异。因此, 酶的选择对提高水酶法的提油效率至关重要。

国内外有关水酶法提油酶解工艺已在茶油、大豆油、花生油、玉米油及其他种籽油等广泛开展研究, 然而用酶情况各不相同。王超等^[11]研究水酶法提取茶油工艺表明: Alcalase 2.0 L 蛋白酶的效果好, 在酶用量为 0.02 mL/g 的条件下, 固液比 1:6(m:V), 55 °C, pH 8.0, 水解 4 h, 油脂提取率为 78.25%; 孙红等^[12]采用果胶酶、纤维素酶和 Alcalase 2.4 L 蛋白酶组合提取茶油取得到较理想的效果, 结果表明此复合酶的提油率可达 91.40%。有研究表明^[13]蛋白酶和磷脂酶分别或混合加入到水代法提取大豆油工艺中会降低乳化液的稳定性而提高油的产量; Jiang 等^[14]采用 Alcalase 碱性蛋白酶水解提取花生油提油率为 73.45%, 然而, 迟延娜等^[15]采用木瓜蛋白酶水解提取花生油时提油率为 90.56%; Dickey 等^[16]采用复合酶(α -淀粉酶、糖化酶及纤维素酶)提取玉米油时获得了更好的提油效果。其他种籽油的研究及用酶情况详见表 1。

由于含油种籽细胞中主要存在纤维素、果胶、蛋白等复杂天然成分, 不同的酶对不同的油料作物进行酶解, 对其提油效果也可能存在差异, 文献报道大多数采用复合酶进行酶解, 复合酶较单一酶效果更好。

4 水酶法对油脂品质的影响

水酶法提油技术因为其提取条件温和, 未经高温、高压及有机溶剂处理, 对天然活性成分保存较完整, 不会改变其脂肪酸组成, 从而能保证食用油安全性更好、品质更高。

杨辉等^[25]比较压榨法、有机溶剂浸出法、超临界萃取法、水酶法及水代法所提取的茶油, 结果表明水酶法与水代法提取的茶油品质优于其他方法提取的茶油, 符合国家一级食用标准。结果详见表 2。

表 1 水酶法提油技术在其他含油原料中的研究概况

Table 1 Overview of aqueous enzymatic extraction on other oil-bearing materials

含油料材	酶及其辅助方法	提油率	作者
连翘	纤维素酶: 果胶酶: 蛋白酶(1:1:1)	21.62%	Gai 等 ^[17]
南瓜籽	复合酶(纤维素酶、果胶酶及蛋白酶)+微波辅助	64.17%	Jiao 等 ^[18]
玉米胚	复合酶(α -淀粉酶、糖化酶及纤维素酶)	61%	Dickey 等 ^[19]
松仁油	碱性蛋白酶	89.12%	Li 等 ^[20]
亚麻籽	纤维素酶: 几丁质酶: 半纤维素酶(1:1:1)+超声辅助	68.1%	Long 等 ^[21]
文冠果籽仁	纤维素酶: 半纤维素酶: 几丁质酶(1.8:1.3:2.5)+微波辅助	55.8%	Li 等 ^[22]
西瓜籽	Protex 6L+超声预处理	98.64%	Liu 等 ^[23]
板蓝根种籽	纤维素酶: 果胶酶: 蛋白酶(1:1:1)+微波辅助	59.27%	Gai 等 ^[24]

表 2 不同提取方法制备的茶油品质比较^[25]
Table 2 Quality of camellia oil extracted by different methods^[25]

理化指标	提取方法				
	水酶法	水代法	压榨法	浸出法	超临界法
色泽	浅黄	浅黄	黄色	棕黄	棕色
透明度	澄清透明	澄清透明	透明	透明	浑浊
气味	固有清香	固有清香	固有清香	异味	异味
杂质	无	无	少量	无	少量
酸价(mg/g KOH)	0.25±0.007	0.26±0.006	0.90±0.009	0.39±0.011	1.17±0.005
过氧化值(mmol/L)	0.55±0.021	0.52±0.026	0.94±0.031	1.68±0.042	1.26±0.022
角鲨烯含量(μg/mg)	0.0840±0.0004	0.0882±0.0001	0.1136±0.0009	0.0902±0.0004	0.1028±0.0010
VE 含量(μg/mg)	0.2567±0.0005	0.2545±0.007	0.0122±0.0002	0.2739±0.0013	0.3014±0.0024

由表 2 可知, 水酶法与水代法提取的茶油具有茶油固有的清香, 色泽浅黄, 澄清透明, 其酸价及过氧化值都比传统方法更低。

姜慧仙^[26]也研究比较了冷压法、热压法、有机溶剂法及水酶法提取的茶油品质, 表明水酶法制备的茶油品质接近精炼茶油, 其亚油酸和油酸含量分别为 8.6%、79.7%, 饱和脂肪酸含量达 10.8%, 过氧化值、油酸价、磷脂含量均最低, 而碘值、不皂化物含量相对最高, 并且其色澄清透明, 香气清淡, 有明显的茶油香味。刘瑞兴等^[7]研究也表明水酶法提取的茶油无污染、无异味、无需精炼, 色泽清亮, 苯并(α)芘含量低, 酸价、过氧化值等符合一级标准, 对 VE、角鲨烯和不饱和脂肪酸等生物活性成分破坏少。Mirjana 等^[27]研究同样表明, 水酶法提取的玉米胚芽油质量指标接近脱胶油, 呈色物质少, 色泽浅黄, 磷脂含量低。

因此, 与传统的提油方法相比, 水酶法提取的植物油中磷脂及呈色物质较少, 无杂质, 酸价及过氧化值较低, 对含油材料中的营养伴随物损失很少, 一般不需要精练即可获得更安全优质的食用油。

5 水酶法提油技术研究的关键问题

5.1 乳化液的形成机制

水酶法提油的同时还会产生 3 部分其他产物, 即: 纤维含量高的固体残渣部分, 蛋白含量高的液体部分, 油与蛋白、磷脂及多糖等形成的稳定乳化液部分。由于水酶法提油过程中部分油脂存在于这 3 部分产物中, 特别是乳化液中含油量较多, 严重影响提油率, 这是制约水酶法提油工艺推广应用的重要“瓶颈”问题^[28-30]。

乳化液是由不相溶的水、油两相和乳化剂组成的热力学不稳定体系, 其中乳化剂是保持系统稳定的关键成分。常见的乳化剂可分为小分子表面活性剂(如吐温、司班

等)、生物聚合物(如多糖、蛋白质等)及固体颗粒(如淀粉颗粒、壳聚糖颗粒等)。然而, 不同含油种籽中天然乳化成分存在差异, 已有部分含油种籽材料及其乳化机制的相关研究报道。

天然蛋白质分子因许多双亲基团而有良好的乳化性, 其疏水基团能吸附于油滴表面, 亲水基团则在油滴周围与水分子结合而形成保护膜, 降低界面张力, 有利于乳化液的形成和稳定。乳化性大豆蛋白主要是 7S、11S 和大豆亲脂性蛋白(lipophilic protein, LP), 大豆亲脂性蛋白主要来源于油体中的油体结合蛋白(oil body banding protein, OBBP), 而油体结合蛋白有油质蛋白(oleosin)、油体固醇蛋白(steroleosin)和油体钙蛋白(calcosin)3 种。oleosin 分子或与磷脂协同作用在油水界面形成弹性膜, 降低界面张力^[31,32]。不同大豆蛋白乳化能力与蛋白质溶解度大小、分子量大小、表面疏水性等有关^[33]。另外, 谷氨酰胺转氨酶交联大豆分离蛋白可显著提高乳化活性和稳定性^[34]。Zhang 等^[35]研究表明水法提取花生油时乳化液中的蛋白质乳化稳定性与蛋白质分子量、二硫键含量及表面疏水性成正相关。

碳水化合物也是油水(O/W)乳化液的常见乳化稳定剂。Ray 等^[36]研究表明, 变性的大豆乳清蛋白(denatured soy whey proteins, dSWP)和可溶性大豆多糖(soluble soybean polysaccharides, SSPS)以 1.5:1.0 比率混合, 5wt.% O/W 乳化液在 pH=3 时 60 d 不发生相的分离。Wu 等^[37,38]研究表明, 因静电吸引作用, ι -卡拉胶和蔗糖能更好地稳定大豆油体乳化液, 在 pH=3 和 pH=5 时, 由于 λ -卡拉胶的桥连作用而使大豆油体乳化液不稳定, pH=7 时, 与 κ 、 λ -卡拉胶相比, 因 ι -卡拉胶具有密集的带电螺旋结构而使大豆油体乳化液更稳定。另外, 麦芽糊精与酪蛋白复配制备的乳化液稳定性高, 磷脂包埋效果好^[39]。多糖与蛋白还可能形成多层乳化而提高乳化稳定性。蛋白和多糖结合蛋白通常

通过电荷吸附到液滴表面形成初级乳化液,当 pH 低于等电点时带正电荷,带负电荷的多糖即可吸附产生再次乳化,形成静电复合体提高乳化液稳定性^[40]。

磷脂是油脂的组成成分之一,磷脂分子具有两亲性,分散在水中还易形成脂质体而将一定量的油脂包封于囊泡。而蛋白、多糖类物质又可通过离子吸附或疏水作用包覆于脂质体上,进一步提高脂质体的稳定性。Tabtabaei 等^[41]研究表明,在黄芥末粉提油过程中,高分子蛋白乳化剂吸附到磷脂-油质蛋白层而乳化形成稳定的乳化液。Chabrand 等^[42]研究表明,用中性肽链内切酶辅助水法提取大豆油中的乳化层主要为蛋白/多肽和磷脂(卵磷脂、磷脂酸、磷脂酰乙醇胺及溶源性衍生物)。高志明等^[43]研究表明,磷脂对疏水性大豆亲脂性蛋白的乳化稳定性具有重要作用,疏水性大豆亲脂性蛋白扩散到界面后,与磷脂结合形成具有较强的界面吸附能与空间位阻的复合膜,从而磷脂赋予了疏水蛋白颗粒更好的扩散能力,使其扩散至界面,并且复合膜的界面吸附能力与磷脂的含量成正相关。李菊芳等^[44]利用荧光光谱法研究了磷脂-大豆蛋白复合物的形成机制,认为磷脂的加入使蛋白质多肽链的骨架伸展,蛋白结构发生变化,且包埋于磷脂与蛋白结合形成的疏水区域中的酪氨酸和色氨酸残基更多,大豆蛋白与磷脂质量结合比最大为 1.5:1。另外,玉米醇溶蛋白和硬脂酸钠相结合制备的食品级皮克林(pickering)乳液,不容易聚合或分层,乳化更加稳定,说明疏水蛋白和小分子表面活性剂也具协同作用,能形成更稳定的复合界面^[43]。

由此可见,天然的蛋白质、多糖、磷脂等成分良好的乳化剂,可与水、油等形成良好的乳化液,蛋白质与多糖之间、蛋白与磷脂之间、蛋白质和多糖与磷脂之间具有良好的协同乳化效果。因此,进一步阐明各含油种籽在水酶法提油中乳化液的形成机制是有效解决其乳化问题的基础。

5.2 破乳方法

为提高水酶法提油工艺的油脂得率,针对水酶法提油工艺中乳化液的成因,必须采取有效方法对乳化液进行破乳。目前,水酶法提取食用油工艺中,常用的破乳方法主要有:离心分离破乳、加热破乳、调节 pH 破乳及有机溶剂萃取破乳等,但其存在能耗大、成本高、安全性差、需要专门设备等缺点,不适合工业化推广^[45-47]。

通过酶解其主要的乳化成分进行破乳具有操作简单、条件温和及能耗低等特点,因此,水酶法工艺中采用生物酶进行二次酶解为一种理想的破乳方法。利用 Protex 7L 蛋白酶酶解后再冷冻解冻,对大豆水酶法提取过程中形成的乳化液的破乳效果好,用 Protex 6L 蛋白酶进行 2 次破乳也可大大提高其破乳率^[48,49]。迟延娜等^[15]研究了水法提取花生油过程中的破乳方法,结果表明碱性蛋白酶、磷脂酶和木瓜蛋白酶破乳效果较好,破乳率分别为 86.39%、

86.61%和 89.30%。蛋白酶和磷脂酶分别或混合加入到水代法提取大豆油工艺中,会降低乳化液的稳定性而提高油的产量^[13]。有研究认为酶解后蛋白质分子量、二硫键含量及表面疏水性下降导致了乳化液的稳定性下降^[35]。然而,据现有的研究报道,酶法破乳在选酶方面还缺乏充分的理论依据,用酶量大,且破乳效果及提油率仍然还不够理想。

除此之外,还有一些其他的破乳方法的报道,例如:在提油时添加一定量的乙醇,可有效破坏油体中的乳化体系提高油脂得率^[50];采用表面活性剂及助溶剂复合能在提取大豆油过程中的乳液产生更低表面张力(<0.01 mN/m),从而更有利于油脂的游出并提高大豆油的提取率^[51]。

6 水酶法存在的问题与展望

水酶法提油工艺技术是一种能同时制备油及植物蛋白的“绿色、安全、营养”新方法,但是,大量高价值酶使用及较低的得油率是制约其广泛应用的“瓶颈”问题。因此,如何解决水酶法提油过程中存在的用酶量较大、破乳成本高等问题至关重要。一方面,可以通过重复利用生物酶进行水解,提高水解酶的效力及其利用率。Jung 等^[13]用蛋白酶 Protex 6L 酶解制备大豆油时,50 °C 作用 1 h 后,水相中还残存着 84.7%的 Protex 6L 酶活性,而乳化液中存在很少的酶活性,因此,可重复利用水相中的酶进行再次酶解,提高酶的利用率;另外,通过酶的固定化技术对酶进行反复使用,也是一种提高酶解效力的好方法^[52]。另一方面,可进一步加强酶工程产品的开发研究,生产出更廉价、高效的水解酶,以提高水酶法酶解效率,降低生产成本。

水酶法提油的另一个问题是用水量大,水处理量大,处理不当可能对环境有一定污染。水酶法提油工艺水相中含有大量的植物蛋白、多糖、淀粉等适合微生物生长繁殖的营养成分,容易迅速滋生各种微生物而腐败,水酶法工艺中产生的水需要及时进行处理。因此,如果能再次对其综合开发利用,不仅可以减少水处理费用,还可提高利用价值。

尽管目前水酶法在应用中还存一些问题,但随着酶工程及酶的固定化技术的快速发展,各种含油种籽材料水酶法提油时产生的乳化液体系中天然乳化成分、乳化机制及破乳技术等研究的广泛深入开展,“绿色、安全、营养”的水酶法提油技术将具有广阔的发展应用前景,将是新型油脂加工业的发展方向之一。

参考文献

- [1] Mat Yusoff M, Gordon MH, Niranjana K. Aqueous enzyme assisted oil extraction from oilseeds and emulsion de-emulsifying methods: A review [J]. Trends Food Sci Technol, 2015, 41(1): 60-82.
- [2] Jiao J, Li ZG, Gai QY, et al. Microwave-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from pumpkin seeds and evaluation of its physicochemical properties, fatty acid compositions and antioxidant

- activities [J]. Food Chem, 2014, 147: 17–24.
- [3] 章绍兵, 王璋. 水酶法提取菜籽乳化油的工艺研究[J]. 农业工程学报, 2006, 11(22): 250–253.
Zhang SB, Wang Z. Aqueous enzymatic extraction of rapeseed emulsified oil [J]. Trans CSAE, 2006, 22(11): 250–253.
- [4] 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
- [5] Najafian L, Ghodsvai A, Haddad Khodaparast MH, *et al.* Aqueous extraction of virgin olive oil using industrial enzymes [J]. Food Res Int, 2009, 42(1): 171–175.
- [6] 王瑛瑶, 贾照宝, 张霜玉, 等. 水酶法提油技术的应用进展[J]. 中国油脂, 2008, 33(7): 24–26.
Wang YY, Jia ZB, Zhang SY, *et al.* Advance in the application of aqueous enzymatic extraction of edible oil [J]. China Oils Fats, 2008, 33(7): 24–26.
- [7] 刘瑞兴, 张智敏, 吴苏喜, 等. 水酶法提取油茶籽油的工艺优化及其营养成分分析[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(12): 54–61.
Liu RX, Zhang ZM, Wu SX, *et al.* Optimization and the nutritional components analysis of oil-tea camellia seed oil extracted by aqueous enzymatic extraction process [J]. J Chin Oils Assoc, 2012, 27(12): 54–61.
- [8] Karki B, Maurer D, Kim TH, *et al.* Comparison and optimization of enzymatic saccharification of soybean fibers recovered from aqueous extractions [J]. Biores Technol, 2011, 102(2): 1228–1233.
- [9] Rovaris A, Balsamo GM, De Oliveira Costa AC, *et al.* Chemical characterization of liquid residues from aqueous enzymatic extraction of soybean oil [J]. LWT-Food Sci Technol, 2013, 51(1): 51–58.
- [10] 江连洲, 李杨, 王妍, 等. 水酶法提取大豆油的研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(09): 346–350.
Jiang LZ, Li Y, Wang Y, *et al.* Research advance in aqueous enzymatic extraction of soybean oil [J]. Food Sci, 2013, 34(09): 346–350.
- [11] 王超, 方柔, 仲山民, 等. 水酶法提取山茶油的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(5): 267–269.
Wang C, Fang R, Zhong SM, *et al.* Study on extraction of oil from Camellia oleifera by hydrolysis enzymes [J]. Sci Technol Food Ind, 2010, 31(5): 267–269.
- [12] 孙红, 费学谦, 方学智. 茶油水酶法提取工艺初步研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(3): 0597–0601.
Sun H, Fei XQ, Fang XZ. A preliminary study on the extraction technology of oil-tea camellia seed oil by aqueous enzymatic method [J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2011, 33(3): 0597–0601.
- [13] Jung S, Maurer D, Johnson LA. Factors affecting emulsion stability and quality of oil recovered from enzyme-assisted aqueous extraction of soybeans [J]. Biores Technol, 2009, 100: 5340–5347.
- [14] Jiang L, Hua D, Wang Z, *et al.* Aqueous enzymatic extraction of peanut oil and protein hydrolysates [J]. Food Bioprod Proc, 2010, 88(2-3): 233–238.
- [15] 迟延娜. 花生水相提油工艺中乳状液性质及其破除研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
Chi YN. Characterization and destabilization of the emulsion formed during aqueous extraction of peanut oil [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [16] Dickey LC, Johnston DB, Kurantz MJ, *et al.* Modification of aqueous enzymatic oil extraction to increase the yield of corn oil from dry fractionated corn germ [J]. Ind Crops Prod, 2011, 34(1): 845–850.
- [17] Gai QY, Jiao J, Wei FY, *et al.* Enzyme-assisted aqueous extraction of oil from Forsythia suspense seed and its physicochemical property and antioxidant activity [J]. Ind Crops Prod, 2013, 51: 274–278.
- [18] Jiao J, Li ZG, Gai Q Y, *et al.* Microwave-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from pumpkin seeds and evaluation of its physicochemical properties, fatty acid compositions and antioxidant activities [J]. Food Chem, 2014, 147: 17–24.
- [19] Dickey LC, Johnston DB, Kurantz MJ, *et al.* Modification of aqueous enzymatic oil extraction to increase the yield of corn oil from dry fractionated corn germ [J]. Ind Crops Prod, 2011, 34(1): 845–850.
- [20] Li Y, Jiang L, Sui X, *et al.* Optimization of the aqueous enzymatic extraction of pine kernel oil by response surface methodology [J]. Proc Eng, 2011, 15: 4641–4652.
- [21] Long JJ, Fu YJ, Zu YG, *et al.* Ultrasound-assisted extraction of flaxseed oil using immobilized enzymes [J]. Biores Technol, 2011, 102(21): 9991–9996.
- [22] Li J, Zu YG, Luo M, *et al.* Aqueous enzymatic process assisted by microwave extraction of oil from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.) seed kernels and its quality evaluation [J]. Food Chem, 2013, 138(4): 2152–2158.
- [23] Liu S, Jiang L, Li Y. Research of aqueous enzymatic extraction of watermelon seed Oil of ultrasonic pretreatment assisted [J]. Proc Eng, 2011, 15: 4949–4955.
- [24] Gai QY, Jiao J, Mu PS, *et al.* Microwave-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from Isatis indigotica seeds and its evaluation of physicochemical properties, fatty acid compositions and antioxidant activities [J]. Ind Crops Prod, 2013, 45: 303–311.
- [25] 杨辉, 赵曼丽, 范亚苇, 等. 不同提取方法所得茶油的品质比较[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 267–274.
Yang H, Zhao ML, Fan YW, *et al.* Comparing quality of camellia oil extracted by different methods [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(11): 267–274.
- [26] 姜慧仙. 水酶法提取油茶籽油的工艺及品质研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
Jiang HX. Study on quality and process of oil-tea camellia seed oil extracted by aqueous enzymatic extraction [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2013.
- [27] Mirjana B, Djerdj K, Jovan T, *et al.* Quality of corn germ oil obtained by aqueous enzymatic extraction [J]. J Am Oil Chem Soc, 1993, 70(12):1273–1277.
- [28] 章绍兵, 吕燕红, 胡玥, 等. 水剂法提取花生油中的破乳研究[J]. 河南工业大学学报, 2010, 31(5): 1–4.
Zhang SB, Lv YH, Hu Y, *et al.* Study on demulsification of emulsion formed during aqueous extraction of peanut oil [J]. J Henan Univ Technol, 2010, 31(5): 1–4.
- [29] Rosenthal A, Pyle DL, Niranjana K. Aqueous and enzymatic processes for edible oil extraction [J]. Enzyme Microb Technol, 1996, 19: 402–20.
- [30] Chabrand RM, Glatz CE. Destabilization of the emulsion formed during the enzyme-assisted aqueous extraction of oil from soybean flour [J]. Enzyme Microb Technol, 2009, 45(1): 28–35.
- [31] Nikiforidis CV, Ampatzidis C, Lalou S, *et al.* Purified oleosins at air-water interfaces [J]. Soft Matter, 2013, 9: 1354–1363.
- [32] Deleu M, Vaca-Medina G, Fabre J F, *et al.* Interfacial properties of oleosins

- and phospholipids from rapeseed for the stability of oil bodies in aqueous medium [J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2010, 80(2): 125–132.
- [33] 殷军, 华欲飞, 陆健健, 等. 大豆蛋白乳化性能比较及机理探讨[J]. *中国油脂*, 2005, 30(5): 35–38.
- Yin J, Hua YF, Lu JJ, *et al.* Comparison of emulsifying properties and mechanisms of soy proteins [J]. *China Oils Fats*, 2005, 30(5): 35–38.
- [34] 王稳, 黄国清, 肖军霞, 等. 谷氨酰胺转氨酶对大豆分离蛋白溶解性和乳化性的影响[J]. *粮油食品科技*, 2014, (2): 38–42.
- Wang W, Huang GQ, Xiao JX, *et al.* Effects of transglutaminase on the solubility and emulsifying property of soybean protein isolate [J]. *Sci Technol Cereals Oils Foods*, 2014, (2): 38–42.
- [35] Zhang SB, Lu QY. Characterizing the structural and surface properties of proteins isolated before and after enzymatic demulsification of the aqueous extract emulsion of peanut seeds [J]. *Food Hyd*, 2015, 47: 51–60.
- [36] Ray M, Rousseau D. Stabilization of oil-in-water emulsions using mixtures of denatured soy whey proteins and soluble soybean polysaccharides [J]. *Food Res Int*, 2013, 52(1): 298–307.
- [37] Wu NN, Huang X, Yang XQ, *et al.* Stabilization of soybean oil body emulsions using ι -carrageenan: Effects of salt, thermal treatment and freeze-thaw cycling [J]. *Food Hyd*, 2012, 28(1): 110–120.
- [38] Wu NN, Yang XQ, Teng Z, *et al.* Stabilization of soybean oil body emulsions using κ , ι , λ -carrageenan at different pH values [J]. *Food Res Int*, 2011, 44(4): 1059–1068.
- [39] Yu C, Wang W, Yao H, *et al.* Preparation of phospholipid microcapsule by spray drying [J]. *Drying Technol*, 2007, 25(4): 695–702.
- [40] Aoki T, Decker EA, McClements DJ. Influence of environmental stresses on stability of O/W emulsions containing droplets stabilized by multilayered membranes produced by a layer-by-layer electrostatic deposition technique [J]. *Food Hyd*, 2005, 19(2): 209–220.
- [41] Tabatabaei S, Diosady LL. Aqueous and enzymatic extraction processes for the production of food-grade proteins and industrial oil from dehulled yellow mustard flour [J]. *Food Res Int*, 2013, 52(2): 547–556.
- [42] Chabrand RM, Glatz CE. Destabilization of the emulsion formed during the enzyme-assisted aqueous extraction of oil from soybean flour [J]. *Enzyme Microb Technol*, 2009, 45(1): 28–35.
- [43] 高志明. 大豆亲脂性蛋白的界面吸附、乳化及输送特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- Gao ZM. Interfacial adsorption, emulsifying and delivery properties of soy lipophilic protein [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [44] 李菊芳. 磷脂-大豆蛋白复合物形成机理及其理化、功能特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- Li JF. The formation mechanism of lecithin-soybean protein complex and the research of its physicochemical and functional properties [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [45] 吴桐, 康健, 张丽霞, 等. 水酶法提沙棘果油破乳方法的研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(12): 280–283.
- Wu T, Kang J, Zhang LX, *et al.* Research of the demulsification method of the emulsion formed in aqueous enzymatic extraction of oil from seabuckthorn [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2011, 32(12): 280–283.
- [46] McClements DJ. *Food emulsions: principles, practice, and techniques* (2nd ed) [M]. Boca Raton FL: CRC Press, 2005.
- [47] Harada T, Yokomizi K. Demulsification of oil-in-water emulsion under freezing conditions: Effect of crystal structure modifier [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2000, 77: 859–863.
- [48] Ramón MC, Kim HJ, Zhang C, *et al.* Destabilization of the emulsion formed during aqueous extraction of soybean oil [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 85(4): 383–390.
- [49] Ramón MC, Charles EG. Destabilization of the emulsion formed during the enzyme-assisted aqueous extraction of oil from soybean flour [J]. *Enzyme Microb Technol*, 2009, 45(1): 28–35.
- [50] 李强, 杨瑞金, 张文斌, 等. 乙醇对油茶籽油水相提取的影响[J]. *中国油脂*, 2012, 37(3): 6–9.
- Li Q, Yang RJ, Zhang WB, *et al.* Influence of ethanol on aqueous extraction of oil-tea camellia seed oil [J]. *China Oils Fats*, 2012, 37(3): 6–9.
- [51] Do LD, Stevens TL, Kibbey TCG, *et al.* Preliminary formulation development for aqueous surfactant-based soybean oil extraction [J]. *Ind Crops Prod*, 2014, 62: 140–146.
- [52] Long JJ, Fu YJ, Zu YG, *et al.* Ultrasound-assisted extraction of flaxseed oil using immobilized enzymes [J]. *Biores Technol*, 2011, 102: 9991–9996.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



杨建远, 讲师, 博士研究生, 研究方向为食品生物技术与食品营养。
E-mail: yjy731@sohu.com



邓泽元, 教授, 博士生导师, 研究方向为食品营养与功能食品。
E-mail: dengzy@ncu.edu.cn