

大豆油水酶法提取技术研究进展

郝倩¹, 岳昊²

(1. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东泰安 271018; 2. 山东省农业科学院农产品加工与营养研究所, 济南 250100)

摘要:大豆油是我国居民膳食油的主要来源, 富含多种营养成分。为促进大豆油提取技术的发展, 从水酶法提油的基本原理出发, 重点阐述了大豆油水酶法提取技术中酶的筛选和活性优化、酶解工艺优化、酶解后破乳以及水酶法与其他辅助手段联用的研究进展, 同时综述了水酶法提取对大豆油品质的影响。相比于其他油料, 大豆含油量较低且胞内存在占比较大的蛋白质使得其油脂提取较困难。通过工艺优化可有效提高水酶法提取大豆油的提取率, 且所得油脂营养价值相对较高, 水酶法提取条件温和、能耗低、操作简单安全, 符合大豆油加工业的发展需求, 在大豆油工业化生产中有广阔的应用空间。

关键词:大豆油; 油脂提取; 水酶法; 加工技术

中图分类号: TS224; TQ644

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2024)09-0023-06

Research progress on aqueous enzymatic extraction technology of soybean oil

HAO Qian¹, YUE Hao²

(1. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018,

Shandong, China; 2. Institute of Agro-products Processing and Nutrition, Shandong

Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: Soybean oil is the main source of dietary oil for Chinese residents and rich in various nutrients. In order to promote the development of soybean oil extraction technology, starting from the basic principle of aqueous enzymatic extraction of soybean oil, the research progress of enzyme screening and activity optimization, enzymatic hydrolysis process optimization, post enzymatic demulsification, and the combination of aqueous enzymatic extraction and other auxiliary methods in soybean oil aqueous enzymatic extraction technology were mainly discussed. In addition, the impact of aqueous enzymatic extraction on the quality of soybean oil was reviewed. Compared with other oilseeds, soybean has a low oil content and a large proportion of proteins inside the cell, making it difficult to extract oil. Through process optimization the extraction rate of soybean oil by aqueous enzymatic method can be effectively improved and the obtained oil has relatively high nutritional value. The aqueous enzymatic method has advantages of mild extraction conditions, low energy consumption, simple and safe operation, conforms the development needs of soybean oil processing industry, and will have greater application space in the industrial production of soybean oil.

Key words: soybean oil; oil extraction; aqueous enzymatic method; process technology

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系(SDAIT-28-07);

山东省农业科学院农业科技创新工程(CXGC2024D09);

山东省重点研发计划(2023TZXD010)

作者简介: 郝倩(2002), 女, 在读本科, 研究方向为粮油精

深加工(E-mail)1643639329@qq.com。

通信作者: 岳昊, 助理研究员, 博士(E-mail)942322520@

qq.com。

大豆在我国具有悠久的种植历史, 是我国重要的粮油兼用作物, 也是进口量最大的农产品, 其油脂和蛋白质含量分别约为 20% 和 40%^[1]。大豆油是我国食用植物油消费的主力军^[2], 其不仅含有丰富的油酸和亚油酸等不饱和脂肪酸, 还含有大豆磷脂、维生素 E、胡萝卜素等微量活性成分, 已被证明具有多种营养功效^[3-5]。

目前,大豆油的产业化提取主要采用机械压榨法和有机溶剂浸出法^[6]。然而,机械压榨法存在能耗大、油脂提取率低等问题^[7]。有机溶剂浸出法提取率高(粕残油率在1%以下),是目前油脂工业生产中最常用的方法,但其提取过程中可能会产生化学溶剂残留,影响油脂的安全性^[8]。水酶法具有条件温和、能耗低、无溶剂残留、污染少、油料中营养成分保留率高等优点,能够较好地克服传统制油工艺的弊端,并且可同步分离油脂和蛋白质,因此被油脂科学界称为“一种油料资源的全利用技术”。水酶法近年来被应用于大豆油的提取研究^[9-11],本文就近年来水酶法提取大豆油工艺优化及其与其他技术联用的研究进展进行综述,以期为大豆油产业技术的快速发展提供一定的参考。

1 水酶法提取大豆油的基本原理

大豆子叶中的油脂以直径为0.2~0.5 μm球体形态紧密排列于蛋白体和细胞壁周围^[12]。这一结构特点使得大豆油难以被提取,主要原因:一是大豆细胞壁的存在使得油脂不易从细胞中流出;二是大豆细胞内的蛋白质和糖类物质与油脂结合,形成脂蛋白和脂多糖等复合体形式。基于上述原因,水酶法提取大豆油的基本原理是利用不同种类酶的特异性分解作用,即选用纤维素酶、半纤维素酶、果胶酶等破坏细胞壁,配合蛋白酶对大豆脂质体膜内脂多糖、脂蛋白等脂质复合体进行降解,从而释放油脂组分,进而利用油、水与非油成分的亲和力和差异进行油脂的分离^[13]。

2 水酶法提取大豆油工艺的研究进展

酶制剂被应用于油料的预处理中以提高油料的油脂提取率已有数十年历史。然而,早期酶制剂过高的价格严重阻碍了这一技术的深入研究和开发。随着酶工程的发展,大量的工业化生产使得酶制剂成本降低,促进了水酶法在油脂加工产业的应用和发展^[14-15]。1978年,Adler-Nissen^[16]使用酶制剂成功从大豆中制备了可溶性蛋白,为水酶法提取大豆油奠定了良好的研究基础和理论依据。后续Olsen等^[17]的研究发现,中性蛋白酶能够有效分离大豆油和大豆蛋白,大豆油提取率超过60%,使得水酶法提取大豆油技术得到了全面发展。近几十年,大量研究在实验室或中试水平上对水酶法提取大豆油进行了研究,主要集中于酶的筛选和活性优化、酶解工艺优化、酶解后破乳及其与其他辅助手段联用等方面。

2.1 酶的筛选和活性优化

水酶法提取大豆油的过程中,不同类型的酶制

剂通过改变大豆内部组织与大分子物质结构,从而将油脂从大豆内部释放出来。因此,寻找适合的酶种类和优化酶活性是水酶法提取大豆油研究的关键^[18]。与其他油料相比,大豆存在独特的内部组分,因此在酶制剂的选择上也存在差异。通常来说,蛋白酶、纤维素酶以及果胶酶等是大豆油水酶法提取中应用较多的酶制剂,可分别作用于脂蛋白复合体、大豆细胞壁内的纤维素结构以及不溶性果胶。如:杨柳等^[19]比较了不同蛋白酶对于水酶法提取大豆油效率的影响,发现相比于中性蛋白酶、风味蛋白酶、木瓜蛋白酶和复合蛋白酶,碱性蛋白酶对于全脂豆粉中大豆油的提取效果最好,在酶添加量2%的条件下酶解4h的油脂提取率可达73.08%,并确定了大豆中油脂与蛋白质提取率之间存在正相关关系。Rosenthal等^[20]的研究也证实,碱性蛋白酶在水酶法提取大豆油得率方面优于纤维素酶、半纤维素酶和果胶酶。Lamsal等^[21-22]研究提出,单独使用纤维素酶无法有效提升大豆油得率,但其同样支持蛋白酶在水酶法提取大豆油中的高效作用。由于酶的专一性,使用单一酶在酶解工艺中可能无法达到复合酶的提取效果。李杨等^[23]采用复合酶酶解制备大豆油,其首先使用纤维素酶和半纤维素酶酶解,再加入碱性蛋白酶进一步酶解,该工艺得到的大豆油提取率达81.04%。此外,将酶固定在介质上可以提高酶的稳定性和重复使用性,有利于降低生产成本和提高生产效率。吴非等^[24]使用 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ -g-P固定化纤维素酶,将固定化酶用于大豆油的提取中,可以有效提升大豆油的提取率。综上,当前已有的研究为水酶法提取大豆油过程中酶制剂的选择提供了依据,但未来还应从降低酶制剂成本、提高大豆油和蛋白质提取率等方面进一步开展研究。

2.2 酶解工艺优化

水酶法提取大豆油的过程中,反应条件对大豆油提取率和品质有重要影响。因此,精确控制反应条件,如酶解温度、pH、酶添加量、酶解时间等,以达到最佳的提取效果也是水酶法提取大豆油的另一重要研究方向。例如,李杨等^[25]采用模糊评判法对水酶法提取大豆油的工艺参数进行了优化,得到最优酶解工艺为料液比1:6、pH9、碱性蛋白酶添加量1.85%、酶解温度50℃、酶解时间3.6h,在此条件下大豆油提取率达到92.76%。除常规酶解工艺外,De Moura等^[26-27]提出在水酶法提取大豆油过程中采用二级逆流策略可使油脂提取率升高至99%。

2.3 酶解后破乳

高含量的蛋白质使得水酶法提取大豆油过程中形成大量乳状液,导致油脂分离困难^[28-29]。破乳可有效提高油脂提取效率、降低能耗、提升产品质量、方便后续处理等^[30]。因此,选择适当的破乳技术对水酶法提取大豆油的应用十分关键。目前的破乳方法主要有物理破乳、化学破乳和微生物破乳等^[31-33]。王文睿等^[34]采用微波对大豆油乳状液进行破乳,结果发现,在 pH 4.66、乳状液体积分数 82%、微波强度 700 W、微波时间 49 s 的条件下,破乳率达到 75.88%。李杨等^[35]采用琥珀酸酐对酶解过程中的水解液进行酰化改性以减少乳状液的形成,结果发现,在加酶量 5 660 U/g、液料比 6.34:1、琥珀酸酐添加量 2.95%、酶解时间 2.53 h、改性时间 2.48 h 条件下,水酶法总油脂提取率达 94.49%。刘琪等^[36]发现乙醇冷浴也具有较好的破乳效果,在冷浴温度 -34℃、乙醇与脱磷酶解液体积比 1:1.06、乙醇体积分数 81% 条件下冷浴 36 min 破乳,大豆油提取率达 91.25%。pH 对于乳状液的稳定性影响巨大^[37-38]。Wu 等^[39]研究发现将乳状液的 pH 调至 4.5 能够实现有效破乳。De Moura 等^[40]研究发现调整酶解后乳状液的 pH 至 4.5 能够获得更高的破乳率。吴海波等^[41]发现添加无机盐和降低 pH 均能够破乳,其中添加 0.04 mol/L CaCl₂ 的乳状液在 60、70、80℃ 分别反应 90、50、30 min 和调节乳状液 pH 至 3~4,在 50℃ 作用 30 min 时破乳率均达 100%。姚莉等^[42]首次发现将莫海威芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌以及污泥诺卡氏菌混合菌发酵液应用于水酶法提取大豆油过程中乳状液破乳,破乳率高达 92.57%。Chabrand 等^[43]发现,在溶血磷脂酶 A₁ 添加量 200 mg/10 g、pH 4.5、温度 50℃ 的条件下可实现对大豆油水酶法提取过程中乳状液的完全破乳,而添加蛋白酶 Protex 6L 在类似条件下也可实现 72% 的破乳率。Jung 等^[44]采用蛋白酶 Protex 6L 对水酶法提取大豆油过程中乳状液进行破乳,结果发现,在加酶量 1.25%、温度 50℃、时间 90 min 的条件下可实现 100% 的破乳。现有研究已经初步研究出适用于水酶法提取大豆油的破乳方法,但当前破乳方法仍过于烦琐,不利用工业化应用,需进一步精简。

2.4 水酶法与其他辅助手段的联用

研究发现水酶法与其他辅助手段的联用能够进一步提升水酶法的效率,从而显著提升大豆油的提取率和品质。当前主要辅助手段有挤压膨化辅助、微波或超声波辅助等。

2.4.1 挤压膨化辅助

油料的预处理已被证明可显著提高水酶法油脂提取率。挤压膨化可以充分破坏大豆细胞壁结构,增强水酶法提油过程中蛋白酶与蛋白质分子间的相互作用,加强酶解效率,从而提高油脂提取率^[21]。Domínguez 等^[45]研究发现,挤压膨化处理后的油料再经酶制剂处理可使油脂提取率升高 13%。Freitas 等^[46]将挤压膨化技术应用于大豆水酶法提油工艺中,在最优挤压膨化条件下油脂提取率可达 88%。Jung 等^[47]研究发现,挤压膨化处理后全脂大豆片的油脂提取率显著增加,且可同步高效提取大豆中的蛋白质。李杨等^[48]研究发现,相较于传统湿热处理,挤压膨化处理对于提高水酶法大豆油提取率更显著,大豆油提取率达到 91.67%。王心刚等^[49]确定了真空挤压膨化水酶法提取大豆油的最佳条件为温度 87℃、真空度 -0.067 MPa、模孔孔径 22 mm、物料含水率 16%,在此条件下总油提取率可达到 93.87%,相比湿热处理总油提取率提高了 21.33 百分点。齐宝坤等^[50]研究发现,在温度 96℃、螺杆转速 96 r/min、物料含水率 14.6%、模孔孔径 15 mm、膨化后物料粉碎粒度 125 μm(120 目)条件下对大豆进行挤压膨化和微体化,并采用水酶法提油,大豆油提取率达到 94.34%。De Moura 等^[26-27]的研究表明,挤压膨化处理可使大豆油提取率升高至 95%,二阶段水酶法大豆油提取率可达到 99%。

2.4.2 微波、超声波辅助

超声波和微波通过破坏大豆细胞结构或引发分子的高速运动而加速油脂的释放,从而有效提高油脂提取率,大量研究证实,其与水酶法之间存在良好的协同作用^[51-52]。孙禹凡等^[53]采用微波辅助生物解离法提取大豆油,对工艺条件进行优化,结果表明,微波辅助水酶法的最优条件为微波功率 700 W、蛋白酶 Protex 6L 添加量 0.90%、液料比 5.15:1、微波时间 7.6 min,在此条件下大豆油提取率为 92.13%。杨柳等^[54]采用超声波辅助水酶法提取大豆油,结果表明,在超声温度 50℃、超声功率 400 W、超声时间 15 min 的条件下,大豆油提取率达 86.13%,相较单一水酶法提高 12.57%。

总的来说,联合其他方法是解决水酶法油脂提取率低、反应时间长等问题的可行措施,但多种方法协同作用的潜在机制仍需深入阐明,以进一步促进水酶法的条件优化和实际应用。

3 水酶法提取对大豆油品质的影响

早期有研究指出水酶法和溶剂浸出法提取大豆油的品质相当,在碘值、不皂化物、甾醇含量等指标

上无显著差异^[10, 55]。近年来,随着水酶法大豆油提取工艺的改进提升,新近研究大部分认为水酶法提取大豆油的品质相较于其他工艺好。如:韩宗元等^[56]发现水酶法提取大豆油的品质相较于溶剂浸出法好,其色泽、酸值、皂化物含量、过氧化值、含磷量、游离脂肪酸含量均显著降低,除水分及挥发物含量外均满足国标三级大豆油的标准。孙禹凡等^[53]的研究表明,微波辅助碱性蛋白酶酶解得到的大豆油过氧化值和磷脂含量较低,品质满足国标一级大豆油的要求。冯雪等^[57]比较了多种提取方法对大豆油品质的影响,发现水酶法提取的大豆油氧化稳定性最好。李杨等^[58]研究发现,相比于其他提取方法,水酶法提取的大豆油挥发物和总不饱和脂肪酸含量最高,饱和脂肪酸含量最低。值得注意的是,冯红霞等^[59]采用挤压膨化联合水酶法提取大豆油,发现挤压膨化处理中套筒温度与油脂色泽、酸值、过氧化值等呈正相关,提示在挤压膨化和水酶法联用过程中不但要注意大豆油提取率,更要注意其品质变化。

4 结束语

水酶法提取大豆油具有操作安全、环境友好、油脂品质好等优点,符合当今大豆油加工业的发展需求。然而,当前水酶法提取大豆油也存在缺点和不足,如生产成本低、破乳烦琐和出油率偏低等。在未来的研究中,应着重发挥水酶法的优势,开发多手段联用的大豆提油技术,以克服水酶法在应用和推广中的限制。相信随着酶工程技术和水酶法制油工艺的进一步发展提升,水酶法在大豆油工业化生产中将拥有越来越广阔的应用空间。

参考文献:

- [1] 李杨. 大豆全产业链加工研究进展[J]. 大豆科技, 2022(1): 14-26.
- [2] 王凤忠. 油脂加工视角下新时期提升我国大豆油自给率问题探讨[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(1): 1-3.
- [3] LÓPEZ-SALAZAR V, TAPIA M S, TOBÓN-CORNEJO S, et al. Consumption of soybean or olive oil at recommended concentrations increased the intestinal microbiota diversity and insulin sensitivity and prevented fatty liver compared to the effects of coconut oil[J/OL]. J Nutr Biochem, 2021, 94: 108751 [2023-12-04]. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2021.108751>.
- [4] MESSINA M, SHEARER G, PETERSEN K. Soybean oil lowers circulating cholesterol levels and coronary heart disease risk, and has no effect on markers of inflammation and oxidation [J/OL]. Nutrition, 2021, 89: 111343 [2023-12-04]. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2021.111343>.
- [5] ZHU H, CHEN J, HE Z, et al. Soybean germ oil reduces blood cholesterol by inhibiting cholesterol absorption and enhancing bile acid excretion[J]. Food Funct, 2019, 10(4): 1836-1845.
- [6] 田其英, 王静. 大豆油体的提取及影响因素研究进展[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(4): 7-9.
- [7] JUNAID P M, DAR A H, DASH K K, et al. Advances in seed oil extraction using ultrasound assisted technology: A comprehensive review[J/OL]. J Food Process Eng, 2023, 46(6): 14192 [2023-12-04]. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14192>.
- [8] 张晓飞, 李昌, 刘方波, 等. 非烃类物质作为食用植物油浸出溶剂的安全性分析[J]. 中国油脂, 2008, 33(2): 1-4.
- [9] 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(9): 346-350.
- [10] 郭兴凤, 陈定刚, 孙金全, 等. 水酶法提油技术概述[J]. 粮油加工, 2007(5): 70-72.
- [11] VOVK H, KARNPAKDEE K, LUDWIG R, et al. Enzymatic pretreatment of plant cells for oil extraction[J]. Food Technol Biotechnol, 2023, 61(2): 160-178.
- [12] 吴隆坤, 肖志刚. 大豆油体的研究进展及其在食品中的应用[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(3): 369-372.
- [13] 沈玉平, 周旭, 张祖姣, 等. 水酶法提取油脂研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(2): 14-19.
- [14] 李杨, 江连洲, 杨柳. 水酶法制取植物油的国内外发展动态[J]. 食品工业科技, 2009, 30(6): 383-387.
- [15] 谭春兰, 袁永俊. 水酶法在植物油脂提取中的应用[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(7): 128-130.
- [16] ADLER-NISSEN J. Enzymatic hydrolysis of soy protein for nutritional fortification of low pH food[J]. Ann Nutr Aliment, 1978, 32(2/3): 205-216.
- [17] OLSEN H S, ALDER N J. Industrial production and applications of a soluble enzymatic byproduct of soy protein[J]. Process Biochem, 1979, 14(7): 6-11.
- [18] 杜彦山, 张连富. 水酶法提油工艺初步研究[J]. 粮食与油脂, 2005, 18(6): 10-12.
- [19] 杨柳, 江连洲, 李杨, 等. 蛋白酶对水酶法提取大豆油脂及蛋白质的影响研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(10): 240-243.
- [20] ROSENTHAL A, PYLE D L, NIRANJAN K. Aqueous and enzymatic processes for edible oil extraction[J]. Enzyme Microb Technol, 1996, 19(6): 402-420.
- [21] LAMSAL B P, JOHNSON L A. Separating oil from aqueous extraction fractions of soybean[J]. J Am Oil Chem Soc, 2007, 84(8): 785-792.

- [22] LAMSAL B P, MURPHY P A, JOHNSON L A. Flaking and extrusion as mechanical treatments for enzyme - assisted aqueous extraction of oil from soybeans[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2006, 83(11): 973 - 979.
- [23] 李杨, 江连洲, 王中江, 等. 混料设计优化复合酶水解水酶法提取大豆油工艺[J]. *食品科学*, 2011, 32(6): 66 - 70.
- [24] 吴非, 吴泽楠, 孙秋月, 等. 纳米磁酶水酶法在磁流化床中提取大豆油脂的数值模拟及应用[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 302 - 311.
- [25] 李杨, 江连洲, 张兆国, 等. 模糊评判优化水酶法提取膨化大豆油脂和蛋白[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 375 - 380.
- [26] DE MOURA J M L N, DE ALMEIDA N M, JOHNSON L A. Scale - up of enzyme - assisted aqueous extraction processing of soybeans[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2009, 86(8): 809 - 815.
- [27] DE MOURA J M L N, MAURER D, JUNG S, et al. Pilot - plant proof - of - concept for integrated, countercurrent, two - stage, enzyme - assisted aqueous extraction of soybeans[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2011, 88(10): 1649 - 1658.
- [28] YANG X, WU Y, LIU Y, et al. Digestive characteristics of oil body extracted from soybean aqueous extract at different pHs[J/OL]. *Food Res Int*, 2022, 161: 111828 [2023 - 12 - 04]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111828>.
- [29] 江连洲, 王立敏, 隋晓楠, 等. 大豆生物解离过程中形成的乳状液结构特征[J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 14 - 19.
- [30] 刘向军, 陆启玉, 章绍兵. 水酶法提油过程中产生乳状液的破乳方法研究进展[J]. *中国油脂*, 2013, 38(4): 5 - 8.
- [31] FAISAL W, ALMOMANI F. A critical review of the development and demulsification processes applied for oil recovery from oil in water emulsions [J/OL]. *Chemosphere*, 2022, 291(Pt 3): 133099 [2023 - 12 - 04]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133099>.
- [32] NIU R H, CHEN F S, ZHAO Z T, et al. Effect of papain on the demulsification of peanut oil body emulsion and the corresponding mechanism[J]. *J Oleo Sci*, 2020, 69(6): 617 - 625.
- [33] 李杨, 齐宝坤, 隋晓楠, 等. 超声辅助二次酶解对大豆乳状液破乳工艺研究[J]. *中国油脂*, 2016, 41(2): 16 - 19.
- [34] 王文睿, 江连洲, 郑环宇, 等. 大豆乳状液的微波破乳工艺优化[J]. *食品科学*, 2011, 32(18): 11 - 14.
- [35] 李杨, 刘雯, 江连洲, 等. 琥珀酰化对水酶法提取大豆油的影响[J]. *中国油脂*, 2012, 37(2): 14 - 18.
- [36] 刘琪, 江连洲, 李杨, 等. 乙醇冷浴辅助酶法提取大豆油工艺研究[J]. *中国油脂*, 2012, 37(11): 4 - 7.
- [37] GAO Y, ZHENG Y, YAO F, et al. A novel strategy for the demulsification of peanut oil body by caproic acid[J/OL]. *Foods*, 2023, 12(16): 3029 [2023 - 12 - 04]. <https://doi.org/10.3390/foods12163029>.
- [38] 胡森, 齐宝坤, 谢凤英, 等. pH 对水酶法大豆乳状液稳定性影响的机理研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(3): 30 - 35.
- [39] WU J, JOHNSON L A, JUNG S. Demulsification of oil - rich emulsion from enzyme - assisted aqueous extraction of extruded soybean flakes [J]. *Bioresour Technol*, 2009, 100(2): 527 - 533.
- [40] DE MOURA J M L N, CAMPBELL K, MAHFUZ A, et al. Enzyme - assisted aqueous extraction of oil and protein from soybeans and cream de - emulsification[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 85(10): 985 - 995.
- [41] 吴海波, 江连洲. CaCl₂ 和 pH 值对水酶法提取大豆油形成乳状液破乳效果影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23): 299 - 306.
- [42] 姚莉, 黄敏, 李淑红. 水酶法提取大豆油混合破乳菌发酵工艺研究[J]. *食品科技*, 2018, 43(12): 21 - 26.
- [43] CHABRAND R M, GLATZ C E. 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.
- [44] 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.
- [45] DOMÍNGUEZ H, SINEIRO J, NÚÑEZ M J, et al. Enzymatic treatment of sunflower kernels before oil extraction[J]. *Food Res Int*, 1995, 28(6): 537 - 545.
- [46] FREITAS S P, HARTMAN L, COURI S, et al. The combined application of extrusion and enzymatic technology for extraction of soybean oil[J]. *Lipid*, 1997, 99(9): 333 - 337.
- [47] JUNG S, MAHFUZ A A. Low temperature dry extrusion and high - pressure processing prior to enzyme - assisted aqueous extraction of full fat soybean flakes [J]. *Food Chem*, 2009, 114(3): 947 - 954.
- [48] 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]. *中国油脂*, 2009, 34(6): 6 - 10.
- [49] 王心刚, 江连洲, 李杨, 等. 真空挤压膨化水酶法提取大豆油的工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(11): 28 - 31, 36.

- quality protein maize and chickpea extruded based weaning food[J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2007, 62(1): 31–37.
- [16] 李建武. 生物化学实验原理和方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994: 160–168.
- [17] JEONG C H, CHOI G N, KIM J H, et al. Antioxidant activities from the aerial parts of *Platycodon grandiflorum* [J]. *Food Chem*, 2010, 118(2): 278–282.
- [18] MAUGERI F, MALTESE A, WARDK W, et al. Hydroxyl radical scavenging activity of a new ophthalmic viscosurgical device[J]. *Curr Eye Res*, 2007, 32(2): 105–111.
- [19] OYAIZU M. Antioxidative activities of browning products of glucosamine fractionated by organic solvent and thin-layer chromatography [J]. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 1988, 35(11): 771–775.
- [20] KONG B, XIONG Y L. Antioxidant activity of zein hydrolysates in a liposome system and the possible mode of action[J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(16): 6059–6068.
- [21] MARKLUND S, MARKLUND G. Involvement of the superoxide anion radical in the autoxidation of pyrogallol and a convenient assay for superoxide dismutase[J]. *Eur J Biochem*, 1974, 47(3): 469–474.
- [22] 张红玉, 李会珍, 张天伟, 等. 抗氧化肽作用机制研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(12): 3981–3988.
- [23] MARTINEZ – ALVARENGA M S, MARTINEZ – RODRIGUEZ E Y, GARCIA – AMEZQUITA L E, et al. Effect of Maillard reaction conditions on the degree of glycation and functional properties of whey protein isolate – maltodextrin conjugates [J]. *Food Hydrocolloid*, 2014, 38: 110–118.
- [24] 付森. TGase 诱导的壳寡糖糖基化与交联对两种蛋白质的性质影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [25] AI S, TANABE S, NISHIMURA T. Antioxidant activity of peptides obtained from porcine myofibrillar proteins by protease treatment [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(12): 3661–3667.
- [26] ZHU L, CHEN J, TANG X, et al. Reducing, radical scavenging, and chelation properties of *in vitro* digests of Alcalase – treated zein hydrolysate [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(8): 2714–2721.
- [27] WANG P, JIANG X, JIANG Y, et al. *In vitro* antioxidative activities of three marine oligosaccharides [J]. *Nat Prod Res*, 2007, 21(7): 646–654.
- [28] 孙宏. 菌酶协同处理棉籽粕的营养特性、棉籽肽的制备及其抗氧化活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [29] DECKER E A, CRUM A D, CALVERT J T. Differences in the antioxidant mechanism of carnosine in the presence of copper and iron [J]. *J Agric Food Chem*, 1992, 40(5): 756–759.
- [30] 王鑫, 林强, 田平芳, 等. 低分子量壳寡糖改善 II 型糖尿病大鼠症状及其作用机制研究[J]. *食品科学*, 2007, 28(11): 529–532.
-
- (上接第 27 页)
- [50] 齐宝坤, 江连洲, 李杨, 等. 挤压膨化后微体化预处理水酶法提取大豆油脂工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(21): 196–200.
- [51] WALAYAT N, YURDUNUSEVEN – YILDIZ A, KUMAR M, et al. Oxidative stability, quality, and bioactive compounds of oils obtained by ultrasound and microwave – assisted oil extraction [J/OL]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023: 1–18 [2023–12–04]. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2219452>.
- [52] MARTÍNEZ – PADILLA L P, HERNÁNDEZ – ROJAS F S, SOSA – HERRERA M G, et al. Novel application of ultrasound and microwave – assisted methods for aqueous extraction of coconut oil and proteins [J]. *J Food Sci Technol*, 2022, 59(10): 3857–3866.
- [53] 孙禹凡, 齐宝坤, 廖一, 等. 微波辅助生物解离法提取大豆油工艺及作用机理研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(7): 16–22.
- [54] 杨柳, 江连洲, 李杨, 等. 超声波辅助水酶法提取大豆油的研究[J]. *中国油脂*, 2009, 34(12): 10–14.
- [55] KIM I H, YOON S H. Effect of extraction solvents on oxidative stability of crude soybean oil [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1990, 67(3): 165–167.
- [56] 韩宗元, 李晓静, 江连洲. 水酶法提取大豆油脂的中试研究[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 283–289.
- [57] 冯雪, 钱珊珊, 于彤, 等. 提取方法对大豆油脂体组成及氧化稳定性的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 148–156.
- [58] 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.
- [59] 冯红霞, 隋晓楠, 齐宝坤, 等. 挤压膨化参数对水酶法提取大豆油品质的影响[J]. *中国油脂*, 2016, 41(4): 51–55.