

固定化酶技术在油脂精炼及结构脂制备过程中的应用研究进展

张思怡¹, 闫静坤¹, 李霞², 苗颖¹, 王秀秀³, 徐同成³

(1. 天津农学院 食品科学与生物工程学院, 天津 300384; 2. 滨城区杜店街道办事处 农业综合服务中心, 山东 滨州 256600; 3. 山东省农业科学院农产品加工与营养研究所/山东省特殊医学用途配方食品工程技术研究中心/山东省农产品精深加工技术重点实验室/农业农村部新食品资源加工重点实验室, 济南 250100)

摘要: 生物酶技术在油脂精炼和结构脂制备中具有广阔的应用前景, 而酶的固定化有利于实现酶的重复利用。为了促进固定化酶技术在油脂行业中的应用, 就固定化酶技术在油脂脱胶、油脂脱酸和结构脂制备中的应用研究现状进行了综述, 并对研究方向进行了展望。固定化酶技术的应用对于油脂产业提质增效具有积极的作用。未来应围绕新型生物酶的发掘以及生产过程中酶活的保持展开研究。

关键词: 固定化酶; 油脂精炼; 结构脂

中图分类号: TS224.6; Q814.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2024)02-0132-05

Research progress on application of immobilized enzyme technology in oil refining and structural lipid preparation

ZHANG Siyi¹, YAN Jingkun¹, LI Xia², MIAO Ying¹,
WANG Xiuxiu³, XU Tongcheng³

(1. College of Food Science and Bioengineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Agricultural Integrated Service Center, Bincheng District Dudian Sub-District Office, Binzhou 256600, Shandong, China; 3. Institute of Agricultural Products Processing and Nutrition, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Shandong Engineering and Technology Research Center of Formula Food for Special Medical Use/Shandong Key Laboratory of Deep Processing Technology of Agricultural Products/Key Laboratory of New Food Resources Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China)

Abstract: Biological enzyme technology has broad application prospects in oil refining and structural lipid preparation, and enzyme immobilization is conducive to the reuse of enzymes. In order to promote the application of immobilized enzyme technology in the oil industry, the research status of immobilized enzyme technology applied in oil degumming, oil deacidification and structural lipid preparation was reviewed, and the research direction was prospected. The application of immobilized enzyme technology plays a positive role in improving the quality and efficiency of oil industry. In the future, the discovery of new biological enzymes and the maintenance of enzyme activity in the production process should be focused.

Key words: immobilized enzyme; oil refining; structural lipid

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-11-03

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2021CXGC010807);
济南市“新高校20条”资助项目(2021GXRC025)

作者简介: 张思怡(1999), 女, 在读硕士, 研究方向为粮油加工与特医食品(E-mail) 498427673@qq.com。

通信作者: 苗颖, 副教授(E-mail) miaoying007@163.com。

原油中通常含有一定量的非甘油酯物质(统称杂质), 如机械杂质、水溶性杂质和脂溶性杂质。一些杂质的存在不仅影响油脂的稳定性, 还会影响油脂精炼和深度加工的效果^[1]。油脂精炼可以去除油脂中所含杂质, 进而提升油脂的食用安全性、感官

品质和贮藏稳定性^[2]。油脂精炼主要包括化学精炼和物理精炼,二者的区别主要在于去除游离脂肪酸的方法不同,前者易产生大量废水和皂脚,后者对原油质量有要求,仅适用于低胶质、高酸值原油^[3]。随着生物技术的快速发展,生物酶逐渐应用于传统油脂精炼工艺中,在提高油脂品质、减少精炼副产物等方面展现出良好的应用前景^[4]。

此外,在“大健康”背景下,居民对油脂的了解不断加深,对深加工产品——功能性脂质的认可度和需求度正逐步上升,因此开发结构脂产品是助推传统油脂加工产业转型升级的有效措施。结构脂是一类健康功效显著、产品附加值高的功能性脂质,其制备过程中涉及多种具有位点专一性的脂肪酶,在这些脂肪酶的作用下,甘油骨架上脂肪酸的种类和分布位置发生改变,从而产生独特的健康功效。

由此可见,无论是传统精炼还是深加工,生物酶在油脂行业的应用前景均十分广阔。然而,酶存在操作稳定性低、回收难以及可重复使用性差的缺点,使得生产成本增加,限制了其在工业领域的广泛应用^[5]。目前,可通过高通量筛选技术、微生物酶技术及固定化酶技术减少生物酶应用的限制条件。其中,固定化酶技术可以有效保持甚至增强酶的活性,而且有利于实现酶的重复利用^[6]。将生物酶应用于油脂行业将有助于降低环境污染,提高生产效率和产品附加值。本文就近几年固定化酶技术在油脂精炼及结构脂制备过程中的应用进行介绍,以期对固定化酶技术在油脂行业中的应用提供参考。

1 固定化酶技术在油脂脱胶中的应用研究进展

1.1 酶法脱胶的原理

传统脱胶方法主要包括水化法和酸炼法,水化脱胶是以磷脂的亲水性为基础,在原油中添加一定量的水,再通过离心沉淀或重力沉降的方式将磷脂除去^[7],但其仅能除去水化型磷脂,而非水化型磷脂仍然存在于油脂中,因而脱胶效果不佳^[8]。酸炼脱胶是指向原油中添加一定量的酸溶液,使原油中的非水化型磷脂发生转化形成水化型磷脂,再通过加入适量的水,在其吸水膨胀后将其去除^[9]。相较于水化脱胶而言,酸炼脱胶能将水化型磷脂和非水化型磷脂同时脱除,但仅适用于一些初始磷脂含量较低的油脂,对于磷脂含量较高的油脂,多数情况下脱胶效果达不到物理精炼的要求^[10]。此外,物理吸附法是一种工艺简单的脱胶方法,但吸附选择性低,会将油脂中的有益成分一同脱除,从而降低了油脂的功能性^[11-12]。酶法脱胶是利用磷脂酶将原油中

的非水化型磷脂水解为水化型磷脂后再经水化脱除^[6]。磷脂酶根据催化特性分为磷脂酶 A1 (PLA1)、磷脂酶 A2 (PLA2)、磷脂酶 B (PLB)、磷脂酶 C (PLC)、磷脂酶 D (PLD) 等(图 1)。其中: PLA1、PLA2、PLB 可将磷脂水解为亲水性的溶血磷脂、甘油酰磷脂及游离脂肪酸,PLC 能将磷脂水解成亲油性甘油二酯和亲水性含磷基团,这 4 种磷脂酶均能起到脱胶作用;而 PLD 水解产物为亲水性较弱的磷脂酸,无法达到脱胶效果^[13-14]。与其他脱胶方法相比,酶法脱胶工艺具有高效、稳定、绿色等优点,目前已被广泛用于植物油加工业中^[15-17]。

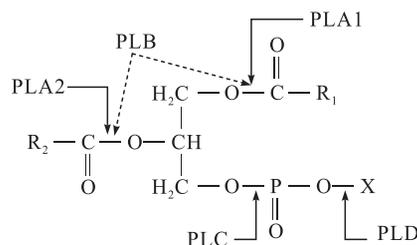


图 1 不同磷脂酶在磷脂上的作用位点

1.2 固定化酶在脱胶工艺中的应用

与传统脱胶工艺相比,酶法脱胶不仅可以实现极低的磷脂含量,即磷含量小于 15 mg/kg,而且具有减少酸用量、废水产生量和运行成本,提高产品收率的优点。因此,酶法脱胶为油脂脱胶过程提供了一种安全、环保的解决方案。Wang 等^[18]将 PLA1 固定在磁性载体上,并分别用甲醛、葡聚糖-醛和葡聚糖-醛-甘氨酸对磁性酶进行化学修饰,探究了不同化学改性剂对磁性固定化 PLA1 脱胶效果的影响。结果显示,在最优条件下得到的脱胶油磷含量为 9.2 mg/kg,固定化 PLA1 重复使用 7 次后的相对酶活为 77.6%。鲍赛^[19]研究了磁性纳米粒子固定化磷脂酶及其在菜籽油脱胶中的应用,通过合成比表面积大的环氧基磁性铁纳米粒子(MNPs),使单位质量粒子的 PLA1 载量增加,且利用 MNPs 的磁性实现固定化酶和油的快速分离,增加了固定化酶的稳定性,固定化 PLA1 在重复使用 10 次后,仍保留 51.1% 的酶活,工业化潜力较大。

2 固定化酶技术在油脂脱酸中的应用研究进展

2.1 酶法脱酸的原理

植物油脱酸最常用的方法是化学碱法精炼,一般用于低游离脂肪酸含量的原油。化学碱法精炼会导致生物活性成分和抗氧化成分的损失,且该过程会产生大量废水,污染环境。相比之下,物理精炼对油中营养组分的保留效果更好,但其要求油脂的磷含量低,因此需要更高的能量输入^[20]。酶法脱酸是

利用脂肪酶催化原油中的游离脂肪酸与酰基受体发生酯化反应,将其转变为酯,从而降低油中游离脂肪酸的含量,达到脱酸的目的^[21]。

2.2 固定化酶在脱酸工艺中的应用

油脂中游离脂肪酸的存在会影响油脂的贮藏稳定性和品质,因此脱除油脂中的游离脂肪酸是油脂精炼中的关键步骤。相较于传统的化学碱法精炼脱酸和物理精炼脱酸,酶法脱酸具有油脂损耗低、有益物质保留率高等优点^[22]。Dong 等^[23]将南极假丝酵母脂肪酶 B(CALB)与磁芯纳米二醛淀粉包覆载体(MDSNP)交联得到磁性固定化酶 MDSNP-CALB,并进一步使用乙醇胺作为酰基受体对脱胶米糠油进行脱酸处理。结果表明,在重复使用 10 次后,MDSNP-CALB 活性仍保持在 79% 以上,其认为 MDSNP-CALB 可用于米糠油脱酸。脂肪酶 G 可以催化游离脂肪酸与甘油单酯、甘油二酯以及溶血磷脂酰胆碱发生酯化反应,既能够实现脱酸又不会减少油脂中甘油三酯和磷脂的含量。Xu 等^[24]使用 ECR8806 树脂固定化脂肪酶 G,并将其用于高 α -亚麻酸油的脱酸。结果表明,经固定化脂肪酶 G 处理后,油脂中甘油三酯的组成和含量保持不变,生育酚、甾醇、磷脂酰胆碱和磷脂酰乙醇胺保留率分别为 $(87.62 \pm 2.29)\%$ 、 $(88.81 \pm 2.06)\%$ 、 $(96.94 \pm 1.43)\%$ 和 $(95.67 \pm 1.09)\%$,实现了脂类伴随物的高效保留,且固定化脂肪酶 G 重复使用 10 次后脱酸效率未显著降低。

3 固定化酶在结构脂制备过程中的应用研究进展

3.1 结构脂的定义

结构脂是指通过化学法或酶法改变甘油三酯碳链骨架上脂肪酸组成或者位置分布制备的具有特定分子结构、特殊功能作用的一类新型油脂^[25]。基于脂肪酸在甘油骨架上的位置分布差异以及脂肪酸链长等差异,目前文献报道较多的结构脂有中长链甘油三酯(MLCT)、1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯(OPO)、1,3-甘油二酯(1,3-DAG)等^[26]。

3.2 固定化酶在结构脂制备中的应用

3.2.1 中长链甘油三酯

MLCT 中的中链脂肪酸吸收、代谢速度快,具有预防肥胖的作用,长链脂肪酸可以满足人体对某些脂肪酸的需求,也能够提高 MLCT 的烟点,使其适用于高温烹饪^[27-28]。周盛敏^[29]以菜籽油和中链甘油三酯(MCT)为原料,在固定化脂肪酶 Lipozyme TL IM 催化下合成 MLCT,在最优条件下产物中 MLCT 含量约为 72%,再通过分子蒸馏、脱色、脱臭等工艺将 MLCT 含量提高至 91.5%,所制备的 MLCT 的理

化指标符合一级食用油的国家标准。姜瑄等^[30]采用两步酶法制备了 sn-2 位富含二十二碳六烯酸(DHA)的 MLCT,其利用固定化脂肪酶 Lipozyme 435 催化 DHA 藻油醇解,并通过溶剂法萃取得到富含 DHA 的单甘酯,再利用固定化脂肪酶 Lipozyme TL IM 催化单甘酯和癸酸的酯化反应合成 sn-2 位富含 DHA 的 MLCT,在最优工艺条件下酯化产物中甘油三酯含量为 96.55%,DHA 占 sn-2 位脂肪酸的 72.15%。

3.2.2 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯

组成 OPO 的脂肪酸在种类及甘油骨架上的分布与人乳脂十分相似,是婴儿配方奶粉中广泛使用的结构脂^[31]。OPO 的制备方法通常是采用 sn-2 位富含棕榈酸的甘油三酯以及游离的油酸为底物,在 sn-1,3 位专一性脂肪酶的催化作用下,将油酸结合到甘油三酯的 sn-1,3 位上^[32]。He 等^[33]通过固定化脂肪酶催化三棕榈酸甘油酯酸解制备 OPO,评价了 4 种固定化脂肪酶的酸解性能,其中,固定化 *Thermomyces lanuginosa* 脂肪酶(TLL)的整体性能更好,制备的产物中 OPO 含量可达 64.73%。此外,在重复使用 5 次后,固定化 TLL 保留了其初始活性的 81.04% (基于 OPO 含量)和 98.88% (基于 sn-2 位棕榈酸含量)。Ghide 等^[34]设计了一种合成 OPO 的新方法,即将脂肪酶固定化在磁性多壁碳纳米管上,并通过两步酶解反应合成 OPO,所得产物中 sn-2 位棕榈酸、sn-1,3 位油酸的含量分别达到 92.93% 和 57.82%。该方法制备的固定化酶比商业化脂肪酶 Lipozyme RM IM 有更好的催化活性和重复使用性,并且,利用纳米管的磁性通过外加磁场即可实现产物与酶的分离。

3.2.3 1,3-甘油二酯

1,3-DAG 是由脂肪酸在甘油的 sn-1 位和 sn-3 位上酯化生成的,天然油脂中存在一定数量的 1,3-DAG,但含量极低。与常见的甘油三酯相比,1,3-DAG 因其健康功效受到研究人员的关注。已有研究证明,1,3-DAG 可显著改善血脂和肥胖^[35-37]。Zhao 等^[38]通过化学共沉淀法合成纳米级的 Fe_3O_4 ,然后用 3-氨丙基三乙氧基硅烷和戊二醛在其表面引入醛基,以蔗糖酯-11 作为表面活性剂,将米根霉的脂肪酶成功固定在载体上,所制备的固定化酶的比酯化活性约为游离酶的 1.5 倍。推测其机制为在固定化过程中,脂肪酶处于界面激活状态,从而提高了活性。 Fe_3O_4 固定化的脂肪酶在重复使用 60 次后的活性为 174.8 U/mg(约为初始活性的 79%)。并且,与游离酶相比,固定化酶的热稳定

性也得到了增强,在 40℃ 和 50℃ 的热稳定性分别提高了 10.9% 和 9.1%。推测其机制可能是由于戊二醛导致蛋白质或蛋白质与支持物之间形成共价键,增加了酶的构象灵活性,并防止其因热交换而扭曲或损坏。Duan 等^[39]研究表明,在无溶剂体系中,甘油吸附在固定化脂肪酶表面,会导致酶活性和操作稳定性严重降低,而在叔丁醇体系中,甘油是可溶的,因此可以完全消除甘油对脂肪酶有害影响,基于此,其在将叔丁醇用于固定化脂肪酶 Novozym 435 催化合成 1,3-DAG 的研究中,详细探索了时间、酶用量、油酸与甘油物质的量比 3 个因素对 1,3-DAG 产率的影响,结果表明,在最佳工艺条件下得到的产物中 1,3-DAG 含量为 40%,且 Novozym 435 在使用 100 次后,其催化效率基本不变。

4 总结与展望

将生物酶用于油脂等大宗商品的加工不仅会产生巨大的经济效益,而且符合国家发展低碳经济和实施“健康中国”的战略目标。研究人员通过设计固定化载体、表面修饰化学分子、优化反应体系等方式进一步提高了生物酶在油脂精炼和结构脂制备过程中的催化活性和重复使用次数,对于传统油脂产业提质增效以及向营养健康领域转型升级具有积极的推动作用。然而,为了将生物酶广泛地应用于实际生产,未来还应围绕新型生物酶的挖掘、生产过程中酶活的保持等方面开展大量研究工作。

目前,随着高通量检测技术的发展,通过深度学习从头设计、合成自然界中不存在的脂肪酶是一种发展趋势。此外,除了挖掘新型脂肪酶,在现有的工艺基础上,仍有许多关键环节有待优化提升,例如:①开发低成本、易制备的新型固定化载体,提高固定化酶的稳定性;②通过量子化学模拟,深入揭示结构脂制备过程中酰基迁移原理,从而有效避免不稳定中间产物的生成,提高目标产物纯度;③基于 X 射线、吸收光谱等表征手段,深入挖掘脂肪酶的催化机制,提高酶的催化效率和重复使用次数。

参考文献:

[1] LAMAS D L, CRAPISTE G H, CONSTENLA D T. Changes in quality and composition of sunflower oil during enzymatic degumming process [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2014, 58(1): 71 - 76.

[2] 左青,左晖. 油脂精炼工艺和设备的改进实践 [J]. *中国油脂*, 2020, 45(10): 22 - 27.

[3] 甘光生,曹川,甘征亚,等. 油脂精炼工艺过程及脱色条件对大豆油品质的影响 [J]. *安徽科技学院学报*, 2018, 32(4): 50 - 55.

[4] 陈伟,宋立荣, SOMMERFELD M, 等. 基于酯酶等生物酶的藻细胞生物转化在藻类生物能源研究中的应用 [C]//中国藻类学会第八次会员代表大会暨第十六次学术讨论会论文摘要集. 北京:中国藻类学会,2011.

[5] 冯小倩,徐晴,张立慧,等. 金属有机框架材料固定化酶的研究进展 [J]. *生物加工过程*, 2022, 20(5): 490 - 499.

[6] MORE N S, GOGATE P R. Ultrasound assisted enzymatic degumming of crude soybean oil [J]. *Ultrason Sonochem*, 2018, 42: 805 - 813.

[7] FAN X, BURTON R, AUSTIC G. Conversion of degummed soybean oil to biodiesel: Optimization of degumming methods and evaluation of fuel properties [J]. *Int J Green Energy*, 2010, 7(6): 593 - 599.

[8] 张佰清,蔡莹. 树莓籽油脱胶工艺研究 [J]. *食品与机械*, 2012, 28(3): 220 - 222.

[9] 赵光辉,董平,姜伟,等. 油脂脱胶技术现状及发展方向 [J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(11): 14 - 16.

[10] 卢萧竹. 磷脂酶 A1 对山茶油脱胶及脱胶产物乳化性能的研究 [D]. 广州:华南理工大学,2016.

[11] 徐赢华,王国敬,李春,等. 酶法脱胶在植物油脂精炼中的应用进展 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 269 - 276.

[12] 杨继国,杨博,林炜铁. 植物油物理精炼中的脱胶工艺 [J]. *中国油脂*, 2004, 29(2): 7 - 10.

[13] 蒋晓菲. 磷脂对食用油品质的影响及酶法脱胶技术的研究 [D]. 江苏 无锡:江南大学,2015.

[14] 詹逸舒. 产磷脂酶 C 菌株的筛选及其酶学性质的研究 [D]. 长沙:湖南农业大学,2010.

[15] 毛程鑫,李桂华,薛武军,等. 菜籽油酶法脱胶的研究 [J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(8): 75 - 79.

[16] SAMPAIO K A, ZYAYKINA N, UITTERHAEGEN E, et al. Enzymatic degumming of corn oil using phospholipase C from a selected strain of *Pichia pastoris* [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2019, 107: 145 - 150.

[17] 胡旭东,蔡永国,周勇,等. 磷脂酶 A1 和磷脂酶 C 对沙棘果油脱胶的影响 [J]. *新疆农业大学学报*, 2019, 42(6): 431 - 437.

[18] WANG W N, TANG H L, CHEN Y, et al. Chemically modified magnetic immobilized phospholipase A1 and its application for soybean oil degumming [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 59: 317 - 326.

[19] 鲍赛. 磁性纳米粒子固定化磷脂酶及其在菜籽油脱胶中的应用 [D]. 合肥:合肥工业大学,2019.

[20] KORANKANOK A, JIRAPORN P, SUPATHRA L, et al. Effects of crude rice bran oil components on alkali - refining loss [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 85(5): 475 - 479.

[21] 彭立凤. 有机相脂肪酶催化的有机物合成反应 [J].

- 合成化学, 2000, 8(4): 294-300.
- [22] 赵晨伟, 王勇, 李明祺, 等. 米糠毛油酶法脱酸的工艺优化[J]. 中国油脂, 2019, 44(4): 17-20.
- [23] DONG T, ZHOU X, DAI Y, et al. Application of magnetic immobilized enzyme of nano dialdehyde starch in deacidification of rice bran oil [J/OL]. *Enzyme Microb Technol*, 2022, 161: 110116 [2023-11-03]. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2022.110116>.
- [24] XU Q Q, LIU D M, LIU X, et al. Enzymatic deacidification of α -linolenic acid-enriched oils with negligible change in triacylglycerol composition [J]. *Process Biochem*, 2021, 111(part 1): 230-240.
- [25] KORMA S A, ZOU X, ALI A H, et al. Preparation of structured lipids enriched with medium- and long-chain triacylglycerols by enzymatic interesterification for infant formula [J]. *Food Bioprod Process*, 2018, 107: 121-130.
- [26] 王强, 贺稚非, 谢跃杰, 等. 长链多不饱和脂肪酸结构脂合成方法及影响因素研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8): 285-292.
- [27] PANTH N, ABBOTT K A, DIAS C B, et al. Differential effects of medium- and long-chain saturated fatty acids on blood lipid profile: A systematic review and meta-analysis [J]. *Am J Clin Nutr*, 2018, 108(4): 675-687.
- [28] ZOU X, YE L, HE X, et al. Preparation of DHA-rich medium- and long-chain triacylglycerols by lipase-catalyzed acidolysis of microbial oil from *Schizochytrium* sp. with medium-chain fatty acids [J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2020, 191(3): 1294-1314.
- [29] 周盛敏. 中长链脂肪酸结构脂的酶法合成、安全性评价及减肥功能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [30] 姜莹, 杨瑶, 徐秀丽, 等. 酶法合成 sn-2 位富含 DHA 的中长链结构脂 [J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 71-76, 99.
- [31] 王秀秀, 贾敏, 宗爱珍, 等. 中国结构脂产业现状与发展对策建议 [J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 12-20.
- [32] 万建春, 徐振波. 酶法合成食品营养强化剂 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯研究进展 [J]. 粮食与油脂, 2019, 32(7): 1-4.
- [33] HE L, ZENG C, WEI L, et al. Fabrication of immobilized lipases for efficient preparation of 1,3-dioleoyl-2-palmitoylglycerol [J/OL]. *Food Chem*, 2023, 408: 135236 [2023-11-03]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135236>.
- [34] GHIDE M K, LI K, WANG J, et al. Effective production of human milk fat substitutes rich in 1,3-dioleoyl-2-palmitoyl glycerol (OPO) via a new strategy [J]. *Food Biophys*, 2022, 17(4): 495-507.
- [35] AGAPAY R C, JU Y H, TRAN-NGUYEN P L, et al. Synthesizing precursors for functional food structured lipids from soybean oil deodorized distillates [J]. *Waste Biomass Valoriz*, 2021, 12(7): 3899-3911.
- [36] ANDO Y, SAITO S, YAMANAKA N, et al. α -linolenic acid-enriched diacylglycerol consumption enhances dietary fat oxidation in healthy subjects: A randomized double-blind controlled trial [J]. *J Oleo Sci*, 2017, 66(2): 181-185.
- [37] PRABHAVATHI DEVI B L A, GANGADHAR K N, PRASAD R B N, et al. Nutritionally enriched 1,3-diacylglycerol-rich oil: Low calorie fat with hypolipidemic effects in rats [J]. *Food Chem*, 2018, 248: 210-216.
- [38] ZHAO J F, LIN J P, YANG L R, et al. Enhanced performance of *Rhizopus oryzae* lipase by reasonable immobilization on magnetic nanoparticles and its application in synthesis 1,3-diacylglycerol [J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2019, 188(3): 677-689.
- [39] DUAN Z Q, DU W, LIU D H. Novozym 435-catalyzed 1,3-diacylglycerol preparation via esterification in *t*-butanol system [J]. *Process Biochem*, 2010, 45(12): 1923-1927.

(上接第 103 页)

品质棉籽蛋白的同时, 生产出了附加值更高的棉子糖产品, 提高了棉籽的综合利用价值。

参考文献:

- [1] 兰宏兵, 余述燕, 朱庆莉. 棉籽中棉子糖和棉酚综合利用研究进展[J]. 安徽化工, 2021, 47(3): 1-3.
- [2] CLAUDIA A, SARA C, BEATRIZ B, et al. *In vitro* fermentation of raffinose to unravel its potential as prebiotic ingredient [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 126: 1-8.
- [3] 孙亚森, 韩文杰, 杨伟国, 等. 棉籽粕脱酚效果影响因素分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(11): 96-99, 111.
- [4] 邵会, 韩文杰, 韩建峰, 等. 影响低温棉籽蛋白 KOH 蛋白质溶解度因素的研究 [J]. 中国油脂, 2016, 41(5): 30-33.
- [5] 樊文端, 韩文杰, 张军, 等. 高蛋白含量棉籽粕的生产工艺探讨 [J]. 中国油脂, 2018, 43(5): 52-53.
- [6] 曹通, 常中强, 袁庆杰, 等. 棉子糖及其提取液的稳定性研究 [J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(12): 42-45.