

深度酶法脱胶和物理精炼生产一级大豆油

左青¹, 高瑞斌¹, 陈友军², 徐红闯³, 左晖⁴

(1. 江苏丰尚油脂技术工程有限公司, 江苏扬州 225127; 2. 中储粮天门直属库有限公司, 湖北天门 431700;
3. 中储粮东莞油脂工业有限公司, 广东东莞 523147; 4. 广州星坤机械有限公司, 广州 510890)

摘要:为生产高品质的一级大豆油,以大豆原油为原料,采取深度酶法脱胶、预复脱色、填料塔和板式塔脱臭、双捕集器捕集工艺生产一级大豆油。对于磷含量 600~800 mg/kg 的大豆原油,采用磷脂酶 C(PLC)、磷脂酶 A₁(PLA₁)/磷脂酶 A₂(PLA₂)脱胶,选用低酸性活性白土脱色,先进填料塔脱酸,再进 8 层板式塔脱除微量组分,脱臭条件为温度 230~240 °C(可调)、真空度 100~150 Pa、时间 100 min(可调),采取双捕集器分别捕集维生素 E 含量 10%~12%、酸值(KOH)40~50 mg/g 和维生素 E 含量低于 1%、酸值(KOH)130~140 mg/g 的馏出物。在该工艺条件下,一级大豆油 3-氯丙醇酯含量 678.9 μg/kg,2-氯丙醇酯含量 310.3 μg/kg,缩水甘油酯含量 860 μg/kg,反式脂肪酸含量 0.886%,精炼得率提高 2% 左右。

关键词:深度酶法脱胶;物理精炼;3-氯丙醇酯;缩水甘油酯;反式脂肪酸

中图分类号:TS224.6;TS222+.1 文献标识码:B 文章编号:1003-7969(2024)09-0145-05

Production of first-grade soybean oil by deep enzymatic degumming and physical refining

ZUO Qing¹, GAO Ruibin¹, CHEN Youjun², XU Hongchuang³, ZUO Hui⁴

(1. Jiangsu FAMSUN Oils and Fats Engineering Co., Ltd., Yangzhou 225127, Jiangsu, China;
2. China Sino-grain Tianmen Oils Storage Co., Ltd., Tianmen 431700, Hubei, China;
3. Sino-grain Dongguan Oils and Fats Industrial Co., Ltd., Dongguan 523147, Guangdong, China;
4. Guangzhou Xinmas Co., Ltd., Guangzhou 510890, China)

Abstract: In order to produce high-quality first-grade soybean oil, with crude soybean oil as raw material, first-grade soybean oil was produced using deep enzymatic degumming, pre-decolorization, packed tower and plate tower deodorization, and double catchers processes. For crude soybean oil with phosphorus content of 600–800 mg/kg, PLC, PLA₁/PLA₂ were used for degumming, low acidic active clay was used for decolorization, packed tower was used for deacidification, and then an 8-layer plate tower was used for deodorizing microcomponent and the deodorization conditions were temperature 230–240 °C (adjustable), vacuum degree 100–150 Pa, and time 100 min (adjustable), and double catchers were used to capture distillates with V_E content 10%–12% and acid value 40–50 mgKOH/g, and V_E content less than 1% and acid value 130–140 mgKOH/g. Using this process, the contents of 3-chloropropanol ester, 2-chloropropanol ester, glycidyl ester and *trans* fatty acid in first-grade soybean oil were 678.9, 310.3, 860 μg/kg and 0.886%, respectively, and the refining yield increased by about 2%.

Key words: deep enzymatic degumming; physical refining; 3-chloropropanol ester; glycidyl ester; *trans* fatty acid

收稿日期:2023-09-15;修回日期:2024-02-22

作者简介:左青(1958),男,高级工程师,主要从事油脂企业的技术管理工作(E-mail)zuoqing_bj@163.com。

大豆富含优质蛋白质和油脂以及磷脂等微量营养因子,在大豆加工制油和大豆油精炼过程中,受加工条件影响,会产生甘二酯(DAG)、甘一酯(MAG)、

游离脂肪酸(FFA)、极性物质、反式脂肪酸、3-氯丙醇酯(3-MCPD酯)、2-氯丙醇酯(2-MCPD酯)及缩水甘油酯(GE)等物质。

反式脂肪酸是油脂加工中产生的含1个或1个以上非共轭反式双键的不饱和脂肪酸的总和,不包括天然反式脂肪酸。植物油在高温精炼过程中会产生反式脂肪酸。世界卫生组织建议应尽量控制膳食中的反式脂肪酸,最大摄入量不超过总能量的1%^[1]。我国GB 28050—2011规定当反式脂肪酸含量小于或等于0.3 g/100 g(0.3 g/100 mL)时可以声称无反式脂肪酸或不含反式脂肪酸。

植物原油中3-MCPD酯和GE含量很低,油脂脱臭过程中的高温是形成3-MCPD酯和GE的重要因素。3-MCPD酯和GE的形成机制不同,3-MCPD酯产生的主要原因是氯离子和DAG,脱臭温度和氯离子是控制3-MCPD酯的关键,GE则主要由DAG形成,油脂中3-MCPD酯和GE含量之间一般没有关系。欧盟对于大豆油中3-MCPD酯和GE限量分别为1.25 mg/kg和1.00 mg/kg^[2]。我国高度重视食用油脂的质量安全,油脂加工厂必须执行相关标准规范,并满足消费者的需求,生产高品质的食用油。以大豆原油为原料,采取深度酶法脱胶、预复脱色、填料塔和板式塔脱臭、双捕集器捕集工艺,可得到质量指标和安全指标较高的一级大豆油。另外,脱胶废水中溶血磷脂和磷酸盐含量高,需采取合适的处理工艺,以达到国家和当地环保部门的排放要求。本文对深度酶法脱胶和物理精炼生产一级大豆油和脱胶废水的处理工艺进行了介绍,以供同行参考。

1 深度酶法脱胶

1.1 酶法脱胶原理

大豆磷脂主要由磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、磷脂酰肌醇(PI)和磷脂酸(PA)组成,其中PC占35%、PI占25%、PE占25%、PA占15%。大豆原油中的磷脂分为水化磷脂和非水化磷脂,其中非水化磷脂主要以磷脂酸和磷脂酸的钙镁盐形式存在^[3],疏水性较强,在水化脱胶中难以去除。磷脂酶可使非水化磷脂转化为水化磷脂,减少乳化,降低重相带油。

磷脂酶A₁(PLA₁)作用于磷脂Sn-1位的羧酸酯键,把磷脂水解为亲水性的溶血磷脂和FFA^[4]。磷脂酶A₂(PLA₂)作用于磷脂Sn-2位不饱和酯键,产物为溶血磷脂和FFA。经PLA₁和PLA₂作用,脱胶油的酸值升高。磷脂酶C(PLC)作用于磷脂

Sn-3位的甘油磷酸酯键,将磷脂水解为DAG和磷脂酸酯,不生成FFA^[5]。PLC对PA无作用。如果大豆原油含2%磷脂(1.3%的PC和PE),PLC脱胶效率为85%,可转化为0.89% DAG^[6]。经酶法脱胶后FFA和DAG留在油中,而水化磷脂转移到水相,这可以降低胶质中的中性油含量。

1.2 酶法脱胶的工艺流程

酶法脱胶工艺流程:大豆原油或水化脱胶油→加热→加柠檬酸→高剪切力混合器混合→反应罐反应→加NaOH调pH→冷却→加水→加PLC→高剪切力混合器混合→反应罐反应→调节温度→加PLA₁/PLA₂→加水→在线混合器混合→反应罐加热反应→离心机分离。

操作步骤:①将大豆原油加热至70~85℃,加0.05%的柠檬酸(50%),进高剪切力混合器混合,进反应罐反应30~45 min,螯合Ca²⁺、Mg²⁺等金属离子,释放出非水化磷脂。②加稀碱液(NaOH溶液),调pH至5.5,将原油冷却至50~55℃,加水(添加量2%~4%),添加PLC(添加量根据磷含量确定),进入高剪切力混合器混合,进入反应罐45℃反应2 h。③调节油温在55℃左右,加PLA₁/PLA₂(添加量50~200 mg/kg),加水(添加量2%左右),在线混合器5 000 r/min混合,进反应罐85℃左右反应4~6 h,进碟式离心机分离胶质。注意调节离心机的背压和向心泵开启度。

大豆原油磷含量在600~800 mg/kg,经PLC脱胶后,油中磷含量为100~150 mg/kg,经PLA₁/PLA₂脱胶后,脱胶油磷含量不超过5 mg/kg。此时,油中FFA上升10%左右。

1.3 需注意的问题

国储大豆油按四级油储存,两年轮换,磷含量不超过200 mg/kg,在储存过程中会产生较稳定的胶体,因此酶法脱胶不适合国储大豆油。

磷脂酶都是水溶性的,为了让酶充分参与脱胶反应,要使油和水充分乳化^[5]。酶制剂有针对性和选择性,在脱胶前应先检测原油中磷脂的种类和含量,选择合适的酶^[5]。调节pH可提高酶的活性和选择性^[7],使用表面活性剂有助于酶稳定在活化构象^[8]。根据油中磷含量计算磷脂酶添加量^[9],一般在50~200 mg/kg,反应温度在50~60℃,反应时间取决于酶添加量,按经验酶添加量低则反应时间长,如:添加量为30 mg/kg时,反应时间为6 h;添加量为100 mg/kg时,反应时间为2 h。

游离PLC和固定化PLC的最适反应温度有差

异^[9],游离 PLC 在 45 ~ 55 °C 活力较高,55 °C 活力达到最高,温度高于 55 °C 后活力下降较快。固定化 PLC 在 50 ~ 65 °C 活力较高,温度高于 65 °C 后活力下降。固定化 PLC 的耐热性比游离 PLC 强。固定化 PLC 和游离 PLC 的适宜 pH 分别是 6.5 和 7。游离 PLC 的反应时间在 1 h,固定化 PLC 反应时间在 1.5 h。固定化 PLC 重复使用时活力下降,重复使用 5 次后脱胶油磷含量低于 10 mg/kg。

美国大豆原油品质较好,金属离子含量不超过 200 mg/kg,深度酶法脱胶油色泽不变,而酸值(KOH)为 4 mg/g 的巴西大豆原油经深度酶法脱胶后色泽加深。

2 预复脱色

2.1 脱色工艺

脱色要求为适度脱色,降低过氧化值,降低磷含量,减轻脱臭压力,保留营养成分。采取预复脱色工艺,用废白土预过滤脱酸油,脱除油杂、磷脂、皂脚,可节省 10% ~ 15% 白土,在有效脱色前脱磷脂,对减少白土用量有利,对硅胶吸附脱色效果更有利。

脱色条件:温度 85 ~ 110 °C,时间 20 ~ 30 min,真空度 6.67 ~ 13.3 kPa,水分 0.2% ~ 0.3%。

脱色油指标:叶绿素含量 < 50 ng/kg,过氧化值 < 0.25 mmol/kg,磷含量 < 5 mg/kg,无皂迹和胶迹,Fe 含量 < 0.2 mg/kg,水分 0.1%。滤饼厚度 25 mm,滤饼含油 20%。

2.2 需注意的问题

温度上升时,叶绿素脱除率大,油色浅,过滤速度增加,但是氧化反应加快,脱臭油色泽加深。在一定的温度下,随着脱色时间延长,叶绿素脱除率增加,但是氧化副产物增多,脱臭油色泽加深。

真空度小于 6.67 kPa,真空度上升,油脂干燥速度快;真空度大于 13.3 kPa,真空度下降,氧化反应加快,油脂干燥速度慢,脱色油过滤慢。

酸性白土需要油含一定水分,水分大于 0.5% 或水分小于 0.1%,脱色效率下降。采用低酸性活性白土对金属离子含量不超过 200 mg/kg 的美国大豆原油进行脱色,经过酶法脱胶,白土用量不增加;而对酸值(KOH)4 ~ 5 mg/g 的巴西大豆原油进行脱色,白土用量需增加 5% ~ 10%。中性白土适合降低 3-MCPD 酯、FFA、有机物,减少油脂返色返酸,成品油氧化稳定性也增强。

按历史生产数据和原料油来源,确定白土种类及混合比例,有针对性地进行调整。白土用量与油脂氧化及异构化呈正相关。根据原料油和成品油的

色泽要求确定白土用量。

安装 Optek 在线检测仪,检测油脂色泽黄、红、蓝值,叶绿素含量,杂质含量和残皂等。

3 脱臭

3.1 填料塔和板式塔脱臭

脱色油在进行换热加热后先进填料塔汽提脱除 FFA,再进板式塔(二段共 8 层板塔)脱除微量组分(如维生素 E、甾醇)、多环芳烃、热解色素、臭味,最后进真空节能器脱除在脱臭过程中产生的微量 FFA 和聚合物,成品油氧化性能稳定。

脱臭条件:温度 230 ~ 240 °C(可调),时间 100 min(可调),真空度 100 ~ 150 Pa。

3.2 双捕集器捕集

脱臭真空系统夹带约 2% 的 FFA 和维生素 E 等馏出物^[10],采用二级捕集器,安装 1 m 的填料,改进蒸汽洗涤器,减少中性油损失,增加脱臭馏出物的价值。馏出物含有一定量的中性油、DAG、FFA、维生素 E 等^[11]。根据进油的 FFA 和维生素 E 汽提量,在不同温度下对脱臭馏出物进行捕集,同时降低被真空系统抽出的 FFA 和油的量,降低真空水中的化学需氧量(COD)和生化需氧量(BOD)。

捕集器在脱臭塔之外,基于维生素 E 与脂肪酸沸点不同进行两次捕集。第一次捕集器控制馏出物在 145 °C 冷凝,称“热馏出物”,得到维生素 E 含量 10% ~ 12%、酸值(KOH)40 ~ 50 mg/g 的馏出物;第二次捕集器控制馏出物在进口温度 52 °C 左右,出口温度 52.4 °C 冷凝,称“冷捕集”,得到维生素 E 含量低于 1%、酸值(KOH)130 ~ 140 mg/g 的馏出物。控制第二次捕集器的捕集温度高于 42 °C,防止脂肪酸凝固后贴在管内壁上。

3.3 真空系统

填料塔是上引真空,板式塔是内引真空,真空节能器是外引真空。

采取干冰非冷凝真空系统^[12]:用罗茨泵代替蒸汽喷射泵,由 2 台一级罗茨泵、1 台二级罗茨泵、1 台三级罗茨泵、1 台水环真空泵、1 台冷凝器和 1 台汽液分离器组成。经气阱后气体(不含脂肪酸挥发物和水蒸气)在经过罗茨泵系统后在水环真空泵中与经过冷凝器冷凝的循环废液混合,气体中部分可溶性物质溶于废液中,气液混合物经过分离,分离出的液体进入废液循环管路,不溶气体排空(该系统基本上没有蒸汽消耗,主要是在清洗冷凝器时会用去少量的蒸汽)。罗茨泵的用电量,应避免水蒸气进入润滑油内造成轴承磨损。

冷冻水系统比水冷系统增加电耗 5 ~ 6 kWh/t,

节省蒸汽 15 kg/t。

3.4 脱臭过程安全指标的控制

大豆原油反式脂肪酸含量在 0.3% ~ 0.4%^[9]。高温、水蒸气中铁离子是产生反式脂肪酸的因素^[13]。研究发现,油脂异构化从 225 °C 开始,脱臭 4 min 后产生 0.02% 异构体;在 245 °C 和 265 °C 脱臭 4 min,异构体含量分别为 0.08% 和 0.15%,脱臭 20 min 后分别达到 0.09% 和 0.52%;在 280 °C 脱臭 115 min 后异构体含量达到 10%。在通常的脱臭过程中,形成 1.5% ~ 2.5% 反式异构体,油脂精炼后聚合甘油酯含量增加 0.4% ~ 1.0%^[14]。脱臭过程中脱臭温度与脱臭时间对大豆油反式脂肪酸含量的影响见表 1。

表 1 脱臭过程中脱臭温度与脱臭时间对大豆油反式脂肪酸含量的影响

处理量/ (t/h)	脱臭温度/ °C	脱臭时间/ min	反式脂肪酸 含量/%	酸值(KOH)/ (mg/g)
20	240	76	0.886	0.056
20	240	76	0.881	0.054
20	240	76	0.929	0.057
20	240	76	0.737	0.055
21	238	73	0.673	0.056
21	238	73	0.541	0.056
21	238	73	0.540	0.055

由表 1 可知,随着脱臭温度的升高和脱臭时间延长,产生“热重组效率”,反式脂肪酸含量上升。控制反式脂肪酸的操作条件:脱臭温度 ≤ 235 °C,真空度 120 ~ 150 Pa,脱臭时间 ≤ 76 min。

GE 在 200 °C 左右形成,高于 230 °C 后明显增加,在 DAG 含量超过 4% 时,GE 含量增加,3 - MCPD 酯在 160 ~ 200 °C 形成,不会随着温度升高而增加。油脂在低于 230 °C 条件下脱臭,可避免 GE 含量明显增加^[15]。在脱臭过程中,GE 增量大于 3 - MCPD 酯增量。DAG 含量对 GE 含量的影响大于 MAG 含量的影响^[16]。脱臭塔填料段大豆油中 GE 和 FFA 含量见表 2。脱臭油中 3 - MCPD 酯和 GE 含量见表 3。经脱臭后,大豆油的抗氧化能力显著增强,油脂抗返色返酸能力增强,包装油的货架期延长。

表 2 脱臭塔填料段大豆油中 GE 和 FFA 含量

脱臭温度/°C	GE 含量/(mg/kg)	FFA 含量(C16:0)/%
220	0.10	0.12
230	0.14	0.09
240	0.17	0.07
260	0.20	0.04

表 3 一级大豆油安全指标(企业标准) μg/kg

安全指标	3 - MCPD 酯	2 - MCPD 酯	GE
企业限量指标	1 250	1 250	1 000
检测数据	678.9	310.3	860

3.5 需要注意的问题

采用填料塔和板式塔组合脱臭。要防止填料塔漏气,造成油脂质量下降,填料结垢。随着温度升高,空气对工艺的影响成倍增加,油脂经除氧器后含氧量一般不超过 5 mg/kg,油中含氧量一般在 50 mg/kg,设备系统漏气时油脂含氧量在 0.5 ~ 3 kg/t。为防止脱臭系统漏气,连接件要焊接,并防止汽提蒸汽及氮气中可能含氧。后脱酸可采取立式软塔或 Alfa laval 卧式真空节能器,热回收效率高,成品油抗氧化稳定性好;增加油泵及控制点。为降低脱臭温度,把过热蒸汽发生器改用不锈钢材质,增加 20% 的直接过热蒸汽量,过热蒸汽锅炉用水为无氯离子水。

4 废水处理

大豆原油酶法脱胶后废水中富含溶血磷脂和磷酸盐,废水 COD 3 万 ~ 4 万 mg/kg。废水处理工艺:隔油→沉降(采用氯化铝、氧化钙沉淀磷酸盐)→气浮[按溶气压力 0.60 ~ 0.75 MPa,气浮负荷 9.6 ~ 12.0 m³/(m²·h)]→厌氧发酵 12 h(培养菌种,把大分子有机物分解为小分子有机物)→H/O 好氧发酵 24 h(生物代谢,降解有机物)→混凝沉淀→砂滤→清水达标排放。

5 结束语

对于磷含量 600 ~ 800 mg/kg 的大豆原油,采用 PLC、PLA₁/PLA₂脱胶,选用低酸性活性白土脱色,先进填料塔脱酸,再进 8 层板式塔脱除微量组分,脱臭条件为温度 230 ~ 240 °C(可调)、真空度 100 ~ 150 Pa,时间 100 min(可调),采取双捕集器分别捕集维生素 E 含量 10% ~ 12%、酸值(KOH)40 ~ 50 mg/g 和维生素 E 含量低于 1%、酸值(KOH)130 ~ 140 mg/g 的馏出物。在该工艺条件下,一级大豆油 3 - MCPD 酯含量 678.9 μg/kg,2 - MCPD 酯含量 310.3 μg/kg,GE 含量 860 μg/kg,反式脂肪酸含量 0.886%,精炼得率提高 2% 左右。由于进厂的大豆和大豆油品质不同及市场价格的波动,很难计算增加利润,大数据分析,大豆原油价格在 8 000 元/t 或以上,用深度酶法脱胶和物理精炼,利润增加 40 ~ 45 元/t。

参考文献:

- [1] 卫生部:专家解读反式脂肪酸管理及相关科学知识 [EB/OL]. [2023 - 09 - 15]. https://www.gov.cn/gzdt/2010-11/20/content_1749660.htm.

- [2] 刘壮, 刘萱, 罗日明, 等. 植物油精炼过程中缩水甘油酯和3-氯丙醇酯的形成及脱除研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(3): 64-70.
- [3] 马云肖, 周龙长. 粗油中非水化磷脂的产生及脱除方法[J]. 粮油加工, 2009(7): 41-43.
- [4] 李杉杉, 程倩, 谢亮, 等. 大豆原油酶法脱胶[J]. 中国油脂, 2022, 47(9): 30-34.
- [5] 李世磊, 程倩, 黄昭先, 等. 酶法脱胶在大豆油脱胶中的应用[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 1-5.
- [6] 余榛榛, 常明, 刘睿杰, 等. 磷脂酶C在酶法脱胶中研究进展[J]. 中国油脂, 2013, 38(7): 19-22.
- [7] 康佳惠子, 王秀秀, 贾敏, 等. 脂肪酶位置选择性的影响因素[J]. 中国油脂, 2023, 48(7): 115-119.
- [8] 张帆, 程路峰, 曹红, 等. 基于酶反应动力学理论优化脂肪酶活力测定体系[J]. 中国油脂, 2023, 48(5): 146-152.
- [9] HAMM W, HAMILTON R J, CALLIAUW G. Edible oil processing[M]. 2nd ed. Chichester, West Sussex: John Wiley&Sons, Ltd., 2000.
- [10] 左青, 郭华, 吕瑞, 等. 关于加工微量变质巴西大豆损失的评估[J]. 中国油脂, 2014, 39(6): 23-24.
- [11] 丁安帮, 陆利霞, 熊晓辉, 等. 用大豆脱臭馏出物制备脂肪胺甲酯和 V_E 及预处理技术[J]. 粮油加工, 2010(1): 27-29.
- [12] 左青, 卞青德. 冷冻水系统与冰冷系统在脱臭真空系统中的应用[J]. 中国油脂, 2014, 39(6): 93-97.
- [13] 梁少华, 董彩文, 赵西周, 等. 脱臭工艺条件对棉籽油中反式脂肪酸含量的影响[C]//中国粮油学会油脂分会第十八届年会论文集. 北京: 中国粮油学会油脂分会, 2009.
- [14] 杜宣利. 反式脂肪酸与人体健康[J]. 中国油脂, 2004, 29(7): 64-67.
- [15] FRANKE K, STRIJOWSKI U. Influence of chemical refining process and oil type on bound 3-chloro-1,2-prapanediol content in palm oil and rapeseed oil[J]. LWT - Food Sci Technol, 2009, 42(10): 1751-1754.
- [16] 陈华勇, 唐小红, 王永华, 等. GC-MC定性分析食用油中缩水甘油酯有害物[J]. 中国油脂, 2012, 37(3): 66-69.
-
- (上接第119页)
- [10] ZHOU L Z, CHEN F S, HAO L H, et al. Peanut oil body composition and stability[J]. J Food Sci, 2019, 84(10): 2812-2819.
- [11] 赵宇辉. 水酶法同步分离花生油和蛋白过程中乳液体特性及破乳机制研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [12] LIU C, CHEN F S, NIU R H, 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]. J Oleo Sci, 2020, 69(11): 1445-1453.
- [13] 薛远, 宋春丽, 任健. 糖含量对大豆蛋白起泡性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(10): 118-124.
- [14] 郭华, 罗军武, 周建平, 等. 几种油料的子叶细胞形态与主要化学成分分析[J]. 现代食品科技, 2006, 22(4): 33-36.
- [15] 熊浩然. 花生水酶法制油水相体系中油脂和蛋白的稳定机制研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [16] 朱凯艳, 张文斌, 杨瑞金, 等. 粉碎处理对花生水酶法提取油脂和蛋白质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 119-122.
- [17] 范康俊, 吴士筠, 艾廷阳, 等. 水酶法提取红花籽油的工艺优化及其抗氧化性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(8): 61-65, 94.
- [18] TEIXEIRA C B, MACEDO G A, MACEDO J A, et al. Simultaneous extraction of oil and antioxidant compounds from oil palm fruit (*Elaeis guineensis*) by an aqueous enzymatic process[J]. Bioresour Technol, 2013, 129: 575-581.
- [19] 黄亚芳, 李罗明, 李俊杰, 等. 水酶法提取杨梅核仁油的工艺优化[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 65-70.
- [20] 曹盼, 朱科学, 彭伟, 等. 酶法制备燕麦浆工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 309-313.
- [21] JEEVAN KUMAR S P, VIJAY KUMAR G, DASH A, et al. Sustainable green solvents and techniques for lipid extraction from microalgae: A review[J]. Algal Res, 2017, 21: 138-147.
- [22] KHAN N R, RATHOD V K. Microwave assisted enzymatic synthesis of speciality esters: A mini-review[J]. Process Biochem, 2018, 75: 89-98.