

多频超声波辅助磷脂酶处理对菜籽油脱胶效果及品质的影响

徐保国^{1,2}, 魏本喜^{1,2}, 齐文慧¹, 任晓锋^{*1}, 周存山¹, 马海乐¹

(1. 江苏大学 食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学 农产品加工工程研究院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 采用多频超声波技术对菜籽油的酶法(磷脂酶 A1)脱胶效果及其脱胶后油品质变化展开了相关研究。结果表明,多频超声波作用能有效地提高磷脂酶 A1 对菜籽油的脱胶效率,大幅度降低脱胶后菜籽油中的含磷量;并且 20/50 kHz 双频超声处理对菜籽油的脱胶效果最佳。与磷脂酶 A1 脱胶后菜籽油相比,超声波作用后的脱胶油酸价和过氧化值略有上升(均在国家标准所规定的安全范围内),色泽变浅,脂肪酸组成的数值变化不明显。

关键词: 多频超声波;菜籽油;磷脂酶;脱胶

中图分类号:TS 224.6 文献标志码:A 文章编号:1673—1689(2018)12—1306—07

Effect of Multi-Frequency Ultrasound Assisted Enzymatic Treatment on the Degumming Efficiency and Quality Attributes of Rapeseed Oil

XU Baoguo^{1,2}, WEI Benxi^{1,2}, QI Wenhui¹, REN Xiaofeng^{*1}, ZHOU Cunshan¹, MA Haile¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Agriculture Product Process Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The effect of multi-frequency ultrasound assisted enzymatic (phospholipase A1) treatment on the degumming efficiency and quality of rapeseed oil was investigated in this study. The results showed that multi-frequency ultrasonic treatment can effectively improve the degumming efficiency of rapeseed oil and also reduce the ultimate phosphorus content in the rapeseed oil. In addition, the 20/50 kHz dual-frequency ultrasonic treatment had the best degumming efficiency of rapeseed oil. Compared with the rapeseed oil after degumming by phospholipase A1, the acid value and peroxide value of degummed rapeseed oil after ultrasonic treatment increased slightly, but they were all within the safe range stipulated by the national standard. Moreover, the color of degummed oil became lighter, and the change in the value of fatty acid composition was not obvious.

Keywords: multi-frequency ultrasound, rapeseed oil, phospholipase, degumming

收稿日期: 2018-08-05

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2017M611738); 江苏省自然科学基金项目(BK20170538)。

作者简介: 徐保国(1985—), 男, 安徽安庆人, 工学博士, 助理研究员, 主要从事超声波在食品加工中应用方面的研究。E-mail: xbg@ujs.edu.cn

* 通信作者: 任晓锋(1980—), 男, 山东胶州人, 工学博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事超声加工在粮油生产中应用方面的研究。

E-mail: renxiaofeng@ujs.edu.cn

引用本文: 徐保国, 魏本喜, 齐文慧, 等. 多频超声波辅助磷脂酶处理对菜籽油脱胶效果及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(12): 1306-1312.

油菜籽经过物理压榨和溶剂浸提等方法所得到的油,称为菜籽毛油。菜籽毛油中含有多种杂质,如磷脂、蛋白质、糖类、色素、游离脂肪酸等,需要经过一系列精炼工序后才能食用^[1]。在油脂的精炼加工过程中,脱胶是第一个工序,其主要目的是脱除毛油中的磷脂、糖、蛋白质等胶质混合物,其中磷脂是这些胶质中的主要成分,因此脱胶也被称为脱磷。

脱胶过程如果不彻底,会严重影响油脂后续精炼工序的正常进行,如影响油脂碱炼、导致油脂脱色后色度回升、脱臭工序中的高温易导致磷脂焦化变黑而加深油脂色泽^[2];此外,在精炼后油脂的储藏过程中,磷脂的存在会造成油脂返色^[3]和回味^[4]等现象,严重影响产品的品质。传统的脱胶方法包括水化脱胶和酸法脱胶两大种。水化脱胶可以去除大部分与磷脂相结合的胶质类物质,而菜籽毛油中的磷脂分为水化磷脂和非水化磷脂,水化脱胶仅能脱除水化磷脂,而非水化磷脂仍残留在油脂中,难以满足精炼的要求;酸法脱胶可以通过添加一定量的酸,将毛油中与金属离子结合的非水化磷脂转化成水化磷脂,再加入适量的水将其去除,酸法脱胶大大降低了脱胶油的磷质量分数,但是这种方法所达到的脱胶效果大多数都不能满足物理精炼的要求(磷质量分数 $<10\text{ mg/kg}$)^[5-6]。

为了提高脱胶效果,研究人员一直致力于新型脱胶方法的开发,如超临界 CO_2 脱胶^[7]、超滤脱胶^[8]和酶法脱胶^[9-10]等。其中,酶法脱胶因其反应条件温和、中性油损失少、油脂得率高和绿色环保等优点备受关注。虽然酶法脱胶有很好的脱胶效果,但脱胶反应时间较长(4.0~6.5 h)^[11-12],因而制约了酶法脱胶在油脂精炼工业中的应用。为了缩短酶法脱胶时间,提高脱胶效率,将超声波技术引入酶法脱胶的过程当中。本团队的前期研究主要考察了磷脂酶 A1 和超声辅助磷脂酶 A1 对菜籽油脱胶效果的影响^[9],作者在前期实验的基础上,更加系统地研究了多频超声辅助磷脂酶 A1 对菜籽油的脱胶效果以及脱胶后油的品质变化的影响,以期超声波在酶法脱胶工业生产中的应用提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料

菜籽毛油:江苏金太阳粮油股份有限公司提

供,含磷质量分数为 $(467.32\pm 4.79)\text{ mg/kg}$;磷脂酶 A1:杰能科(中国)酶制剂有限公司,酶活为 10 KLU/g 。

1.2 仪器与试剂

1.2.1 主要仪器 多频超声波装置:江苏大学研制;氧化稳定仪:Rancimat 743,瑞士万通公司;马弗炉: SX2-4-10-S,上海帅登仪器有限公司;旋转蒸发器: RE-6000A,上海皖宁精密科学仪器有限公司;气质联用仪: GCMS-QP2010 ULTRA,日本岛津公司;离心机: LD5-2A,北京医用离心机厂。

1.2.2 主要试剂 柠檬酸、氢氧化钠、氢氧化钾、盐酸、氧化锌、硫代硫酸钠、碘化钾、钼酸钠、硫酸联氨、甲醇、乙醇、乙酸等药品和试剂:分析纯,国药集团上海化学试剂公司生产。

1.3 实验方案

根据之前的操作步骤^[9],具体如下:称取 100 g 菜籽毛油,放入 250 mL 的锥形瓶中,恒温水浴加热到 $80\text{ }^\circ\text{C}$,然后,添加质量浓度为 40 g/dL 的柠檬酸溶液 0.13 mL , $10\text{ }000\text{ r/min}$ 均质 1 min ,结束后在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴下以 500 r/min 的转速搅拌 30 min ,再加入一定量 NaOH 溶液(4 mol/L),调节 pH 至设定值($4.2\sim 5.4$),搅拌均匀后,边搅拌边加入一定量的去离子水($1\%\sim 5\%$)和磷脂酶 A1($10\sim 150\text{ }\mu\text{L/kg}$),将锥形瓶置于多频超声波发生装置上进行反应,超声的条件分别为: 20 、 50 、 $20/50$ 、 $20/35/50\text{ kHz}$ 的不同超声频率组合,超声功率为 180 W ,超声的脉冲方式为 10 s 工作/ 3 s 间隙,设置温度为设定值($20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$),待酶法脱胶反应到设定的时间后($10\sim 120\text{ min}$),将菜籽油的温度升高至 $90\text{ }^\circ\text{C}$,灭酶 10 min ,在 $8\text{ }000\text{ r/min}$ 的转速下离心 10 min ,收集上层油层,再旋转蒸发浓缩得到脱胶菜籽油。其中对照组的过程与上述一致,但不采用超声波作用。

1.4 指标测定方法

1.4.1 菜籽油含磷量测定 根据 GB/T 5537-2008《粮油检验 磷脂含量的测定》法进行。

1.4.2 菜籽油品质分析 油脂酸值测定:采用 GB/T 5530-2005 法;油脂碘价测定:采用 GB/T 5532-2008 法;油脂色泽测定:采用 GB/T 22460-2008 法;油脂过氧化值测定:采用 GB/T 5538-2005 法;油脂氧化稳定性的测定(OSI 值):参照 Xu 等^[13-14]方法进行;菜籽油脂脂肪酸组成测定:参照文献^[15]。

1.5 统计分析

至少重复 3 次试验,数据以平均值 $\pm$ 标准偏差

表示,采用 SPSS 18.0 软件中的 Duncan 程序进行数据方差分析。

2 结果与分析

2.1 多频超声波辅助磷脂酶对菜籽油脱胶效果的影响

2.1.1 加酶量对多频超声酶法脱胶效果的影响
磷脂酶 A1 的添加量对不同频率超声辅助脱除菜籽油中磷脂的效果见图 1。具体反应条件为:反应温度 40 ℃, pH 4.8, 加水量 2%, 超声波功率 180 W, 搅拌速度 500 r/min, 反应时间 90 min。

从图 1 可以看出,随着磷脂酶 A1 添加量的增加,所有处理方式下,菜籽油的含磷质量分数均呈现出明显的下降趋势;且当磷脂酶 A1 的添加量达到 90 $\mu\text{L/kg}$ 时,再继续增加酶的添加量,菜籽油中的含磷质量分数下降趋势变得缓和。此外,图 1 还显示了超声波作用可显著提高菜籽油中含磷质量分数的降低速率,同时还可以大大降低菜籽油中含磷质量分数的幅度。当酶用量为 90 $\mu\text{L/kg}$ 时,对照组的含磷质量分数为 18.77 mg/kg,而超声作用的菜籽油含磷质量分数均降低至 8 mg/kg 以下。这可能是因为超声波的机械效应给酶解反应体系提供了有效的推动力,促进了油水两相的混合,并且超声波具有较强的乳化^[16]和分散作用^[17-18],可以使反应体系更为均匀,有效地提高底物与磷脂酶 A1 的接触机率,从而提高酶的反应效率。

图 1 还显示了不同超声频率作用下菜籽油的脱胶效果,其中,20/50 kHz 双频组合作用下菜籽油的脱胶效果最好,其次分别为 20/30/50 kHz 三频组合、50 kHz 和 20 kHz。这说明了不同的超声频率对菜籽油的酶法脱胶效果有不同的影响,且存在最佳的脱胶频率。冯若等^[19]研究表明,以频率为 f_a 的超声波作用于体系,只有那些体系共振频率 f_r 接近于 f_a ,体系才能对声场积极响应,声化学产额才能达到最佳。此处,可能是因为 20/50 kHz 双频频率组合更加接近菜籽油酶法反应体系的共振频率,所以相对其他几种频率超声作用而言,20/50 kHz 作用下的脱胶效果更明显。

2.1.2 反应时间对多频超声酶法脱胶效果的影响

图 2 显示了反应时间对不同频率超声辅助脱除菜籽油中磷脂的效果,具体反应条件为:反应温度 40 ℃, pH 4.8, 加水量 2%, 加酶量 90 $\mu\text{L/kg}$, 超声波功

率 180 W, 搅拌速度 500 r/min。

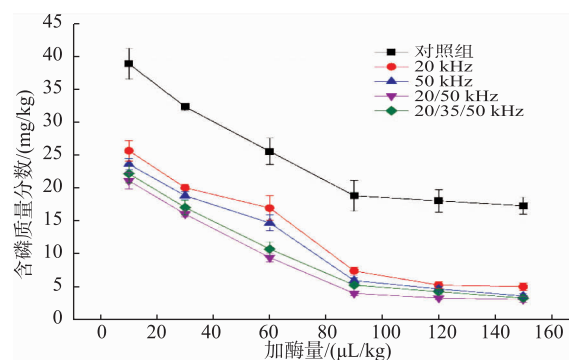


图 1 加酶量对多频超声酶法脱胶效果的影响

Fig. 1 Effect of enzyme dosage on the ultrasound assisted enzymatic degumming efficiency

由图 2 可知,随着反应时间的延长,菜籽油的含磷质量分数持续下降。当反应时间为 10 min 时,对照组的含磷质量分数为 41.25 mg/kg,而不同频率超声作用下的菜籽油含磷质量分数均降至 20 mg/kg 以下;当反应时间延长至 120 min 时,对照组的含磷质量分数为 15.44 mg/kg,仍未能满足菜籽油物理精炼的要求(残磷量 $< 10 \text{ mg/kg}$)^[5],而 20/50 kHz 双频超声作用 30 min 时,菜籽油的含磷量降至 9.83 mg/kg;当作用时间为 60 min 时,所有频率超声作用下的菜籽油含磷质量分数均降至 10 mg/kg 以下,且继续延长作用时间,含磷质量分数的下降幅度不明显。这说明了超声作用可以很大程度上缩短菜籽油脱胶反应的时间,且有效降低了菜籽油的含磷质量分数。

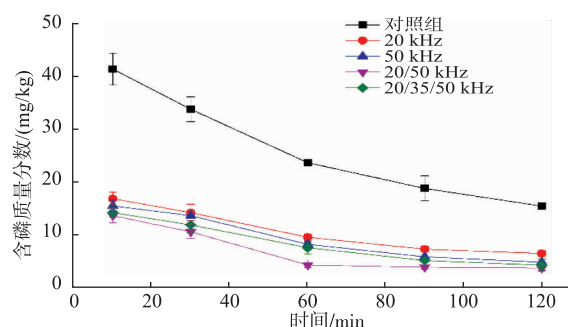


图 2 反应时间对多频超声酶法脱胶效果的影响

Fig. 2 Effect of reaction time on the ultrasound assisted enzymatic degumming efficiency

2.1.3 体系 pH 对多频超声酶法脱胶效果的影响

图 3 显示了体系 pH 值对不同频率超声辅助脱除菜籽油中磷脂的效果。具体反应条件为:反应温度

40 ℃,加水量 2%,加酶量 90 $\mu\text{L/kg}$,超声波功率 180 W,搅拌速度 500 r/min,反应时间 90 min。

在酶与底物反应体系中,pH 值影响着酶分子活性部位的带电基团与底物的结合,当 pH 值偏高或偏低时,酶活性部位的带电属性会产生改变,降低酶与底物的结合能力,从而影响反应体系的酶解效果。由图 3 可知,随着 pH 值的升高,菜籽油的含磷质量分数呈现出先降低后升高的趋势。当 pH 值为 4.8 时,所有处理条件下菜籽油中的含磷质量分数均达到最低值;其中,对照组的含磷质量分数为 18.77 mg/kg,20/50 kHz 双频超声作用下的含磷质量分数最低,为 3.94 mg/kg。

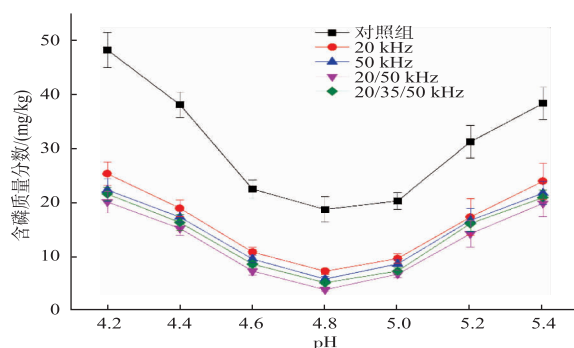


图 3 体系 pH 值对多频超声酶法脱胶效果的影响

Fig. 3 Effect of pH on the ultrasound assisted enzymatic degumming efficiency

2.1.4 反应温度对多频超声酶法脱胶效果的影响

图 4 显示了反应体系温度对不同频率超声辅助脱除菜籽油中磷脂的效果,具体反应条件为:pH 4.8,加水量 2%,加酶量 90 $\mu\text{L/kg}$,超声波功率 180 W,搅拌速度 500 r/min,反应时间 90 min。

温度是影响酶活性的重要因素之一。随着反应体系温度的升高,菜籽油含磷质量分数呈现出先降低后升高的趋势。当体系温度从 20 ℃升高至 40 ℃时,对照组菜籽油的含磷质量分数从 25.33 mg/kg 下降到最低 18.77 mg/kg;随后温度不断升高,菜籽油的含磷质量分数又呈现出上升的趋势,当温度为 60 ℃时,含磷质量分数为 32.33 mg/kg。这说明了对照组体系中,磷脂酶 A1 的最适温度为 40 ℃,而温度升至 60 ℃时,酶活性大大降低,导致含磷质量分数升高。此外,相比较于对照组,超声波辅助磷脂酶脱胶可以大大降低菜籽油中的含磷质量分数。

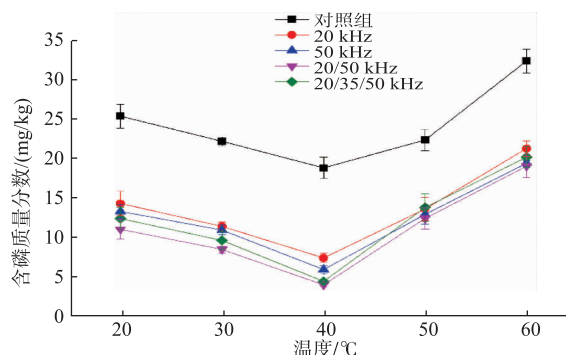


图 4 反应温度对多频超声酶法脱胶效果的影响

Fig. 4 Effect of reaction temperature on the ultrasound assisted enzymatic degumming efficiency

2.1.5 加水量对多频超声酶法脱胶效果的影响

图 5 显示了加水量对不同频率超声辅助脱除菜籽油中磷脂的效果,具体反应条件为:反应温度 40 ℃,pH 4.8,加酶量 90 $\mu\text{L/kg}$,超声波功率 180 W,搅拌速度 500 r/min,反应时间 90 min。

从图 5 可以看出,对照组在 3%的加水量下,菜籽油中的含磷质量分数达到最低,为 17.65 mg/kg;而在超声辅助磷脂酶脱胶的反应体系中,最适的加水量为 2%,这是因为超声波的机械作用可以提高体系的传质效率,使水的利用变得更加有效。此外,当加水量达到 5%时,菜籽油中的含磷质量分数反而升高,这可能是因为过高的水分造成了磷脂的乳化,影响了脱胶的效果,同时也增加了后期实验中分离的难度^[9]。

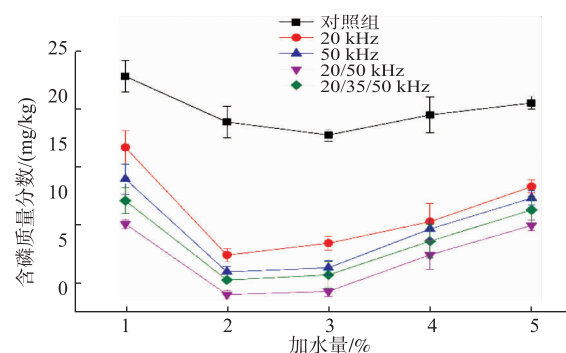


图 5 加水量对多频超声酶法脱胶效果的影响

Fig. 5 Effect of water amount on the ultrasound assisted enzymatic degumming efficiency

2.2 多频超声波辅助磷脂酶对脱胶后菜籽油品质的影响

2.2.1 脱胶后菜籽油品质指标的变化 表 1 显示了多频超声波辅助磷脂酶对脱胶后菜籽油酸值、碘

价、过氧化值和氧化稳定性等指标的影响,具体反应条件为:反应温度 40 ℃,pH 4.8,加水量 2%,加酶量 90 $\mu\text{L/kg}$,超声波功率 180 W,搅拌速度 500 r/min,反应时间 90 min。

由表 1 可以看出,与原菜籽油样品相比,经过磷脂酶 A1 脱胶和超声辅助磷脂酶 A1 脱胶处理后,所得菜籽油的酸价显著上升($p<0.05$),这可能是因为油脂中部分脂肪酸甘油酯在脱胶过程中被磷脂酶 A1 水解成游离脂肪酸,导致油脂酸价上升^[20];相比较于对照组,超声辅助磷脂酶 A1 作用后的菜籽油酸价均未发生显著性变化($p>0.05$)。过氧化值的变化趋势与酸价类似,脱胶后的菜籽油过氧化值显著上升($p<0.05$),且经超声作用后的脱胶油过氧化值比对照组略有提升;此外,脱胶后的菜籽油 OSI 值显著降低($p<0.05$),且 20/50 kHz 超声处理组的

OSI 值显著低于对照组($p<0.05$),这说明了超声作用在一定程度上加速了菜籽油的氧化变质^[9]。除此之外,脱胶后菜籽油的碘价也显著降低($p<0.05$)。尽管脱胶后菜籽油的酸值、碘价和过氧化值都发生了显著变化,但是均在国家标准(GB 1536-2004)所规定的安全范围内。

色泽、气味和滋味是消费者判断食用油品质的重要标准。从表 1 可以看出,菜籽毛油的色泽为黄 35 和红 7.0,脱胶后菜籽油的色泽为黄 28 和红 4.0(对照组),说明了脱胶处理后菜籽毛油的色泽变浅;与对照组相比,超声辅助处理的菜籽油色泽黄值和红值都略有下降,达到国标 GB 1536-2004 规定的三级油的标准。此外,在气味和滋味方面,脱胶后的菜籽油未产生特殊的气味和滋味。

表 1 多频超声波辅助磷脂酶对脱胶后菜籽油酸值、碘价、过氧化值和氧化稳定性等指标的影响

Table 1 Effect of ultrasound assisted enzymatic degumming on the acid values, iodine values, peroxide values and oxidative stability of rapeseed oil

指标	菜籽油标准 (GB 1536-2004)	原油样	对照组	20 kHz	50 kHz	20/50 kHz	20/35/50 kHz
酸值(mg KOH/g)	≤ 4.0	2.25 ± 0.20^a	3.43 ± 0.15^b	3.52 ± 0.25^b	3.62 ± 0.14^b	3.87 ± 0.32^b	3.81 ± 0.28^b
碘价(g I/hg)	94~120	112.35 ± 1.35^a	110.23 ± 1.58^b	109.21 ± 2.54^b	109.33 ± 2.31^b	109.61 ± 1.38^b	109.22 ± 2.59^b
过氧化值(mmol/kg)	≤ 7.5	3.05 ± 0.11^a	3.66 ± 0.08^{ab}	3.87 ± 0.09^{ab}	3.95 ± 0.23^b	4.02 ± 0.18^b	3.98 ± 0.15^b
OSI 值/h	无	6.23 ± 0.55^a	5.56 ± 0.21^b	5.22 ± 0.18^b	5.38 ± 0.08^b	4.89 ± 0.11^c	5.10 ± 0.10^{bc}
色泽 ^A	黄 35, 红 7.0 (四级)	黄 35, 红 7.0	黄 28, 红 4.0	黄 24, 红 3.8	黄 24, 红 3.6	黄 23, 红 3.6	黄 26, 红 3.9
气味和滋味	具有菜籽油固有的 气味和滋味, 无异味	菜籽油固有滋 味,无异味	菜籽油固有滋 味,无异味	菜籽油固有滋 味,无异味	菜籽油固有滋 味,无异味	菜籽油固有滋 味,无异味	菜籽油固有滋 味,无异味

注:^A表示所用罗维朋比色槽为 25.4 mm。小写字母表示每个样品之间的差异,每行相同的字母表示没有显著性差异($p>0.05$),不同的字母表示有显著性差异($p<0.05$)。

2.2.2 脱胶后菜籽油的脂肪酸组成变化 图 6 显示了多频超声波辅助磷脂酶脱胶后菜籽油的脂肪酸组成图谱,经解谱后得到表 2。由表 2 可以看出,与原油样相比,磷脂酶 A1 和超声辅助磷脂酶 A1 脱胶后的菜籽油中亚麻酸(C18:3)、花生一烯酸(C20:1)和芥酸(C22:1)的质量分数略有下降,下降幅度分别在 0.9%、0.5%和 2.0%;棕榈酸(C16:0)、硬脂酸(C18:0)、油酸(C18:1)和亚油酸(C18:2)的质量分数有所上升,上升幅度分别在 0.4%、0.5%、2.8%和

0.9%。此外,饱和脂肪酸质量分数和单不饱和脂肪酸质量分数有所上升,多不饱和脂肪酸质量分数略有下降。综合分析,对比原油样的实验数据发现,脱胶后的菜籽油各脂肪酸数值的上升和下降幅度都不明显,均在 3%以内;与对照组相比,超声辅助处理所得的菜籽油各脂肪酸数值的上升和下降幅度非常小,说明超声辅助处理对菜籽油脂肪酸质量分数影响不显著。

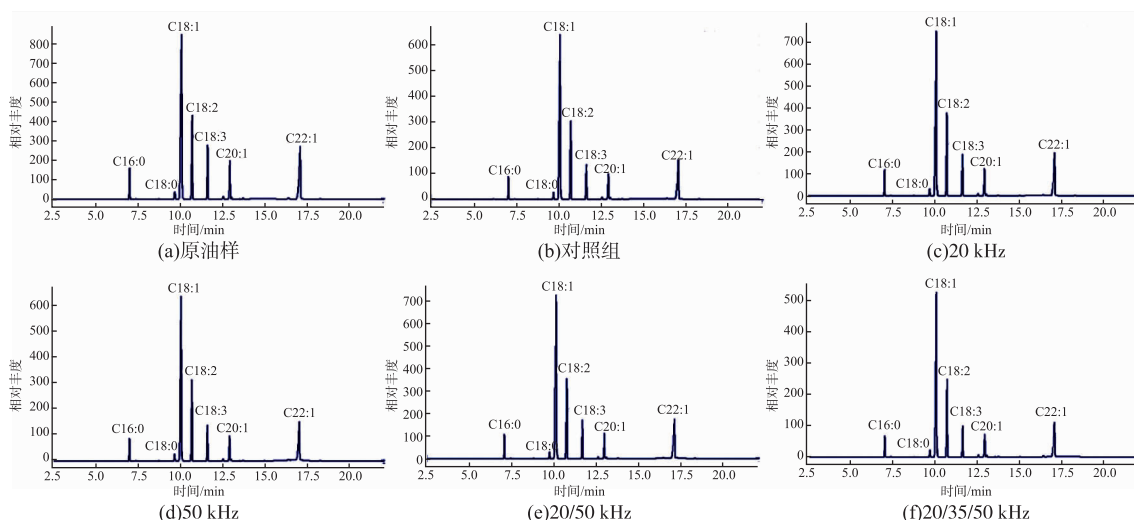


图 6 多频超声波辅助磷脂酶脱胶后菜籽油的脂肪酸组成图谱

Fig. 6 Pictures of fatty acid compositions of rapeseed oil after ultrasound assisted enzymatic degumming

表 2 多频超声波辅助磷脂酶对脱胶后菜籽油脂肪酸组成的影响

Table 2 Effect of ultrasound assisted enzymatic degumming on the fatty acid compositions of rapeseed oil

脂肪酸	相对丰度百分比						
	菜籽油标准 (GB 1536-2004)	原油样	对照组	20 kHz	50 kHz	20/50 kHz	20/35/50 kHz
棕榈酸质量分数/%	1.5~6.0	3.54±0.02 ^a	3.89±0.01 ^a	3.92±0.02 ^a	3.78±0.00 ^a	3.59±0.02 ^a	3.62±0.02 ^a
硬脂酸质量分数/%	0.5~3.1	2.16±0.01 ^a	2.41±0.00 ^a	2.35±0.01 ^a	2.45±0.01 ^a	2.62±0.01 ^a	2.31±0.01 ^a
油酸质量分数/%	8.0~60.0	46.55±0.01 ^a	48.33±0.00 ^{ab}	47.54±0.02 ^a	47.73±0.01 ^{ab}	49.33±0.03 ^b	48.21±0.03 ^{ab}
亚油酸质量分数/%	11.0~23.0	14.85±0.01 ^a	15.23±0.02 ^a	15.08±0.00 ^a	15.21±0.02 ^a	15.13±0.01 ^a	15.11±0.02 ^a
亚麻酸质量分数/%	5.0~13.0	8.98±0.00 ^a	8.25±0.03 ^b	8.24±0.01 ^b	8.31±0.03 ^b	8.12±0.01 ^b	8.21±0.01 ^b
花生一烯酸质量分数/%	3.0~15.0	6.45±0.02 ^a	6.01±0.02 ^a	6.14±0.03 ^a	6.12±0.01 ^a	6.21±0.00 ^a	6.18±0.01 ^a
芥酸质量分数/%	3.0~60.0	15.54±0.01 ^a	14.25±0.01 ^{ab}	14.89±0.02 ^a	14.43±0.02 ^{ab}	13.59±0.02 ^b	14.52±0.02 ^{ab}
饱和脂肪酸质量分数/%		5.70±0.02 ^a	6.30±0.02 ^b	6.27±0.02 ^b	6.23±0.01 ^b	6.21±0.01 ^b	5.93±0.01 ^a
单不饱和脂肪酸质量分数/%		68.54±0.00 ^a	68.59±0.02 ^a	68.57±0.0 ^a	68.28±0.01 ^a	69.13±0.02 ^b	68.91±0.02 ^{ab}
多不饱和脂肪酸质量分数/%		23.83±0.01 ^a	23.48±0.00 ^{ab}	23.32±0.03 ^b	23.52±0.02 ^{ab}	23.25±0.01 ^b	23.32±0.01 ^b
总量/%		98.07±0.02 ^a	98.37±0.02 ^a	98.16±0.02 ^a	98.03±0.01 ^a	98.59±0.00 ^a	98.16±0.02 ^a

注:小写字母表示个样品之间的差异,每行相同的字母表示没有显著性差异($p>0.05$),不同的字母表示有显著性差异($p<0.05$)。

3 结 语

作者研究了多频超声波辅助酶法对菜籽油脱胶效果及其品质的影响,通过与常规酶法脱胶进行对比,得出如下结论:

1)超声波处理能显著提高磷脂酶 A1 对菜籽油的脱胶效率,显著降低脱胶后菜籽油中的含磷质量分数;不同的超声波频率对磷脂酶 A1 的脱胶效果有明显差异,其中 20/50 kHz 双频处理对磷脂酶 A1 脱胶效果最佳;在反应温度 40 ℃、pH 4.8,加水量

2%,加酶量 90 μL/kg,超声波功率 180 W,搅拌速度 500 r/min 的条件下,20/50 kHz 双频处理仅需 30 min 便可使菜籽油中的含磷质量分数降至安全标准范围内。

2)与常规酶法脱胶后菜籽油对比,超声波作用后的脱胶菜籽油酸价和过氧化值略有上升(但均在国家标准所规定的安全范围内),氧化稳定性下降,色泽变浅;在脂肪酸组成上,数值有所上升和下降,但幅度均不显著。实验证明了超声波在菜籽毛油脱胶的加工当中有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 谢丹. 精炼及储藏对菜籽油品质的影响[D]. 无锡:江南大学,2012.
- [2] SHEN Caiying. Color reversion of refined soybean oil[J]. **China Oilsand Fats**, 2008, 33(11):17-20.(in Chinese)
- [3] LI Yanling. Discuss on the factors of affecting rapeseed salad colour reversion[J]. **China Oilsand Fats**, 2002, 27(5):40-42.(in Chinese)
- [4] SMOUSE T H. A review of soybean oil reversion flavor[J]. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, 1979, 56(11): 747A-751A.
- [5] 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]. 无锡:江南大学,2015.
- [6] JIANG X, CHANG M, WANG X, et al. The effect of ultrasound on enzymatic degumming process of rapeseed oil by the use of phospholipase A(1)[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2014, 21(1):142.
- [7] LIST G R, KING J W, JOHNSON J H, et al. Supercritical CO₂ degumming and physical refining of soybean oil[J]. **Journal of the American Oil Chemists Society**, 1993, 70(5):473-476.
- [8] PAGLIERO C, OCHOA N, MARCHESE J, et al. Dugumming of crude soybean oil by ultrafiltration using polymeric membranes [J]. **Journal of the American Oil Chemists Society**, 2001, 78(8):793-796.
- [9] REN Xiaofeng, XU Baoguo, QI Wenhui. et al. Effects of ultrasound treatment on removing phospholipids from rapeseed oil by phospholipase[J]. **Food Research and Development**, 2018, 39(7):76-81.(in Chinese)
- [10] MORE N S, GOGATE P R. Ultrasound assisted enzymatic degumming of crude soybean oil[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2018, 42:805-813.
- [11] BO Y, RONG Z, YANG J G, et al. Insight into the enzymatic degumming process of soybean oil[J]. **Journal of the American Oil Chemists Society**, 2008, 85(5):421-425.
- [12] JAHANI M, ALIZADEH M, PIROZIFARD M, et al. Optimization of enzymatic degumming process for rice bran oil using response surface methodology[J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2008, 41(10):1892-1898.
- [13] XU B, WEI B, REN X, et al. Dielectric pretreatment of rapeseed 1:influence on the drying characteristics of the seeds and physico-chemical properties of cold-pressed oil[J]. **Food & Bioprocess Technology**, 2018, 11(6):1236-1247.
- [14] REN X, WANG L, XU B, et al. Influence of microwave pretreatment on the flavor attributes and oxidative stability of cold-pressed rapeseed oil[EB/OL]. <http://doi.org/10.1080/07373937.2018.1459682>, 2018-04-27.
- [15] XU B, ZHANG M, XING C, et al. Composition, characterisation and analysis of seed oil of *Suaeda salsa* L[J]. **International Journal of Food Science & Technology**, 2013, 48(4):879-885.
- [16] SUN Jianxian, MEI Zhouxiong, BAI Weibin. et al. Research progress on the effects of ultrasonic cavitation on food quality[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2017, 36(4):337-342.(in Chinese)
- [17] SUSLICK K S, PRICE G J. Applications of ultrasound to materials chemistry[J]. **Annual Review of Materials Science**, 1999, 29(1):295-326.
- [18] MASON T J, PANIWNKY L, LORIMER J P. The uses of ultrasound in food technology[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 1996, 3(3):253-260.
- [19] FENG Ruo, CHEN Zhaohua, ZHU Changping, et al. Study on the sonochemical effect of dual frequency orthogonal irradiation[J]. **Chinese Science Bulletin**, 1997, 42(9):925-928.(in Chinese)
- [20] WAN Chuyun, HUANG Fenghong, XIA Fujian. et al. Effects of enzymatic treatment on rapeseed oil degumming and quality[J]. **Food Science**, 2007, 28(5):194-198.(in Chinese)