

酶法脱胶在浓香菜籽油上的应用

程倩^{1,2}, 李杉杉³, 李晓龙^{1,2}, 王翔宇^{1,2}, 王满意^{1,2}, 张宇⁴, 王风艳^{*1,2}

(1. 中粮营养健康研究院有限公司, 北京 102209; 2. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏 南京 210023; 3. 北京农学院 生物与资源环境学院, 北京 102206; 4. 中粮油脂(广元)有限公司, 四川 广元 628021)

摘要: 以浓香菜籽毛油为原料, 分别采用 Purifine[®] PLA1、Purifine[®] PLC 及 Purifine[®] 3G 3 种磷脂酶和传统水化法进行脱胶, 并对油脂得率、脱胶浓香菜籽油质量和风味等进行系统评价。结果表明, 在油脂得率方面, 上述 3 种磷脂酶脱胶较传统水化脱胶均有显著性提升, 采用离心法分别可以提升 0.47%、0.31%、0.52%, 采用自然沉降法分别可以提升 4.32%、2.95%、5.77%。在质量方面, 3 种磷脂酶脱胶和传统水化脱胶均可将浓香菜籽油的含磷量降至 20 mg/kg 以内, 且对脱胶浓香菜籽油的过氧化值、色值、加热试验和冷冻试验等均无显著影响; Purifine[®] PLC 和 Purifine[®] 3G 对脱胶浓香菜籽油酸价无显著影响, Purifine[®] PLA1 可导致酸价的显著上升; 3 种磷脂酶脱胶浓香菜籽油与传统水化脱胶浓香菜籽油的酸价和过氧化值在储藏期间变化趋势一致。在风味方面, 3 种酶法脱胶浓香菜籽油与传统水化脱胶浓香菜籽油在储藏 14 d 后呈现出差异。消费者喜好度分析结果表明, 3 种磷脂酶脱胶浓香菜籽油的风味均优于传统水化脱胶浓香菜籽油。

关键词: 酶法脱胶; 油脂得率; 油脂品质; 风味

中图分类号: Q 814.9 文章编号: 1673-1689(2022)06-0106-06 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.06.013

Applications of Enzymatic Degumming in Fragrant Rapeseed Oil

CHENG Qian^{1,2}, LI Shanshan³, LI Xiaolong^{1,2}, WANG Xiangyu^{1,2},
WANG Manyi^{1,2}, ZHANG Yu⁴, WANG Fengyan^{*1,2}

(1. COFCO Nutrition and Health Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023, China; 3. College of Bioscience and Resources Environment, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 4. COFCO Oils (Guangyuan) Co., Ltd., Guangyuan 628021, China)

Abstract: The degumming of fragrant rapeseed oil was carried out using Purifine[®] PLA1, Purifine[®] PLC and Purifine[®] 3G, and the oil yield, product quality and sensory flavor of degummed fragrant rapeseed oil were systematically analyzed. The results showed that the oil yield of above three enzymatic degumming were significantly improved compared with that of the traditional hydration degumming, which could be increased by 0.47%, 0.31% and 0.52% by centrifugation, respectively, and increased by 4.32%, 2.95% and 5.77% by natural sedimentation, respectively. In terms of product quality, the phosphorus content of fragrant rapeseed oil was reduced to less than 20 mg/kg by all three degumming methods compared with that of traditional hydration degumming process with

收稿日期: 2021-02-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100302)。

* 通信作者: 王风艳(1985—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事食用油脂加工、产品开发、安全营养研究。E-mail: wangfengyan@cofco.com

insignificant effect on the peroxide value, color value, heating test and freezing test of degummed fragrant rapeseed oil. Purifine[®] PLC and Purifine[®] 3G had insignificant effect on the acid value of degummed fragrant rapeseed oil, while Purifine[®] PLA1 could significantly increase the acid value. The variation trend of acid value and peroxide value of three enzymatic degummed fragrant rapeseed oils were consistent with that of the traditional degummed oil during storage. In the aspect of flavor, the significant differences among three enzymatic degummed fragrant rapeseed oils with the traditional degummed oils were observed after 14 d storage. The flavor of three enzymatic degummed fragrant rapeseed oils were superior to that of the traditional degummed oils based on the consumer preference analysis

Keywords: enzymatic degumming, oil yield, oil quality, flavor

菜籽油是我国主要的食用植物油产品之一,居食用油消费量第二位^[1-2],是我国长江以南地区居民的主要食用油。与复杂的精炼菜籽油加工工艺不同,浓香菜籽油的加工流程较为简单,往往只采取传统水化脱胶工艺,将浓香菜籽毛油中的胶质等杂质去除^[3],在保障产品质量的同时,还保留其独特风味。

酶法脱胶技术是近年来广受关注的绿色生物加工技术,因油脂得率高、经济收益好、绿色环保等显著优点,在我国大豆油的生产加工中得以快速推广,但在菜籽油生产加工中尚未得到有效应用。截至目前,酶法脱胶技术在菜籽油上的应用还处于小试研究阶段,主要集中在新型酶制剂的开发、脱胶工艺参数的优化、脱胶效果验证等方面,且没有明确针对浓香菜籽油和精炼菜籽油开展研究。其中,有研究者采用自制磷脂酶 C, 分别将脱胶菜籽油含磷量降低至 7.85、24.4、4.503 mg/kg^[4-6]。毛涛等利用自制磷脂酶 A2,将脱胶菜籽油含磷量降至 10 mg/kg 以下^[7]。汪增乾等优化商品酶 Lecitase ultra (属于 PLA1) 的工艺参数,将脱胶菜籽油含磷量降低到 22.62 mg/kg,油脂得率提高约 1%^[8]。关于酶法脱胶技术对浓香菜籽油质量影响的研究则较少。万楚筠等将 Lecitase ultra 脱胶菜籽油与旧国标四级菜籽油的酸价、过氧化值、色值和脂肪酸组成等方面进行了比较,发现经过该磷脂酶脱胶后,菜籽油酸价和过氧化值显著上升,分别增加 1.04 mg/g、3.60 mmol/kg,其他指标差异不显著^[9];叶展等利用 PLC 酶对菜籽毛油脱胶后,脱胶油过氧化值优于水化脱胶油,皂化值、碘值、气味、滋味和透明度等无显著差异^[10]。对浓香菜籽油风味影响的研究更多集中在不同菜籽品种、不同炒制工艺对风味的影响和对风味物质的鉴定方面^[11-17],研究脱胶工艺对风味的影响则较

少^[18-19],酶法脱胶技术对浓香菜籽油风味的影响几乎没有研究。

酶法脱胶技术能否得到推广应用,不仅要关注其脱胶效果、经济收益等因素,也要综合考虑该技术对产品常规质量、储藏稳定性、风味等影响。作者选择了水解机理不同且已经商品化的磷脂酶 A1、磷脂酶 C 及升级版混合酶,通过系统研究不同磷脂酶在浓香菜籽油脱胶中的应用,综合评估不同磷脂酶对浓香菜籽毛油脱胶效果、产品质量及稳定性、风味等多指标的影响,旨在为酶法脱胶技术在浓香菜籽油上的应用提供理论依据和数据支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

浓香菜籽毛油(总磷(355.24±5.32) mg/kg、非水化磷(8.56±0.96) mg/kg、酸价(2.63±0.16) mg/g、过氧化值(0.86±0.07) mmol/kg)、一级精炼菜籽油:中粮营养健康研究院有限公司提供。

Purifine[®] PLA1、Purifine[®] PLC 及 Purifine[®] 3G:帝斯曼(中国)有限公司产品;柠檬酸、氯化钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司产品。

1.2 仪器与设备

RCT Basic Package 磁力搅拌器:德国 IKA 艾卡集团(中国)有限公司产品;L535-1 低速离心机:湖南湘仪实验室仪器开发有限公司产品;BSA6202S 电子分析天平:德国赛多利斯(中国)仪器公司产品;915 KF Ti-Touch 精灵一代一体式卡尔费休滴定仪:瑞士 Metrohm 万通(中国)有限公司产品。

1.3 研究方法

1.3.1 脱胶方法 传统水化脱胶(简称 W):准确称取一定质量毛油于烧杯中,置于磁力搅拌器上,加

入质量分数 0.8% 的 NaCl 溶液 (质量分数 10%), 室温搅拌反应 2 h。

Purifine® PLA1 单酶脱胶 (简称 DA): 准确称取一定质量毛油于烧杯中, 置于磁力搅拌器上, 加入质量分数 0.04% 的柠檬酸溶液 (质量分数 45%)、50 mg/kg Purifine® PLA1 酶, 将总水添加量补齐至 0.8% (质量分数), 室温反应 2 h。

Purifine® PLC 单酶脱胶 (简称 DC): 准确称取一定质量毛油于烧杯中, 置于磁力搅拌器上, 加入 200 mg/kg Purifine® PLC 酶, 将总水添加量补齐至 0.8% (质量分数), 室温反应 2 h。

Purifine® 3G 单酶脱胶 (简称 3G), 准确称取一定质量毛油于烧杯中, 置于磁力搅拌器上, 加入 200 mg/kg Purifine® 3G 酶, 将总水添加量补齐至 0.8% (质量分数), 室温反应 2 h。

以上脱胶方法中, 采用离心法分离的实验统一称量 300 g 毛油, 采用自然沉降法分离的实验称量 100 g 毛油。

1.3.2 分离方法

1) 离心法 方法参照文献[20]。

2) 自然沉降法 100 g 毛油反应结束后升温至 80 °C 灭活 10 min, 转移至 100 mL 量筒中自然沉降, 7 d 后测量量筒下部油脚的体积 V_1 , 计算油脂得率, 完成后转移上层油样, 取少量测定水分含量, 取样测定脱胶后的含磷量。

1.3.3 储藏期稳定性评价 将脱胶油样品分装至 300 mL 样品瓶中, 每瓶分装 270 mL 样品 (约占样品瓶体积 90%), 充氮气后封口置于阴凉处货架上, 定期检测样品的酸价和过氧化值。

1.3.4 浓香菜籽油的感官评价 将通过离心分离法制得的 4 种脱胶油样品与一级精炼菜籽油按质量比 3:7 混合, 混匀后进行分装, 充氮气后封口置于阴凉处货架上, 14 d 后开展感官评价实验。参照 GB/T 12311—2012《感官分析方法 三点检验》进行三点检验感官评价实验, 参照 GB/T 12315—2008《感官分析方法学 排序法》进行喜好度评价实验, 感官评价小组共 24 名成员, 均经过严格培训且具有丰富的感官评价经验。

1.3.5 油脂得率的计算

1) 离心法 油脂得率的计算公式参照文献[20]。

2) 自然沉降法

$$L = \frac{110 - V_1}{110} \times 100$$

式中: L 为油脂得率, %; V_1 为油脚的体积, mL; 110 指油水混合体系的总体积, 以 110 mL 计。

1.3.6 非水化磷检测样品制备方法 非水化磷检测样品制备方法参照文献[20]。

1.3.7 质量指标检测方法 含磷量的测定参照 GB/T 5537—2008《粮油检验 磷脂含量的测定》中的钼蓝比色法; 酸价的测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》; 冷冻试验参照 GB 35877—2018《粮油检验 动植物油脂冷冻试验》; 加热试验参照 GB/T 5531—2018《粮油检验 植物油加热试验》; 色值测定参照 GB/T 22460—2008《动植物油脂 罗维朋色泽的测定》。

1.3.8 数据统计及分析 采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同磷脂酶对浓香菜籽毛油脱胶后油脂得率的影响

更高的油脂得率意味着具有更好的经济效益, 这是酶法脱胶技术得到推广应用的重要因素之一。3 种磷脂酶脱胶和传统水化脱胶后浓香菜籽油油脂得率的结果表明 (见表 1), 在 2 种分离法中, 3 种磷脂酶脱胶油脂得率较传统水化脱胶均有显著提升 ($P < 0.05$)。其中 Purifine® 3G 酶脱胶后油脂得率提升最多, 离心法和沉降法分别为 0.52% 和 5.77%; 其次是 Purifine® PLA1 酶, 得率分别提升 0.47% 和 4.32%; 最后是 Purifine® PLC 酶, 得率分别提升 0.31% 和 2.95%。该结果与浓香菜籽毛油的磷脂组成及 3 种酶制剂的功能密切相关。Purifine® 3G 酶是 Purifine® PLC 和 PI-PLC 与极少量 PLA2 酶的混合酶^[21], 可以将浓香菜籽毛油中的磷脂酰胆碱 (phosphatidyl cholines, PC)、磷脂酰乙醇胺 (phosphatidyl ethanolamines, PE) 和磷脂酰肌醇 (phosphatidyl inositols, PI) 水解为甘油二酯及相应含磷基团, 并适当水解部分甘油磷脂酸 (phosphatidic acid, PA) 为溶血磷脂酸和游离脂肪酸; 该酶在保留磷脂水解生成甘油二酯的同时, 也避免了磷脂乳化带走中性油导致的损失^[21-24]。相比之下 Purifine® PLC 酶仅能水解 PC 和 PE, 缺少水解 PI 的功能。因此脱胶时, Purifine® 3G 酶较 Purifine®

PLC 酶在油脂得率提升幅度上更为显著。Purifine® PLA1 虽然可以有效水解油脂中常见的 4 种磷脂,但与 Purifine® 3G 酶相比,其仅能减少磷脂夹带中性油的损失,无法增加甘油二酯的含量^[21-24],而浓香菜籽毛油中一般 PA 较少,因此 Purifine® 3G 较

Purifine® PLA1 酶脱胶油脂得率更高。至于 Purifine® PLC 酶得率低于 Purifine® PLA1 酶,则与浓香菜籽毛油磷脂组分的比例和含量密切相关,有待结合多批次菜籽毛油脱胶效果及磷脂组分进一步分析。

表 1 不同磷脂酶脱胶对浓香菜籽油油脂得率的影响

Table 1 Effects of different phospholipase degumming on the yield of fragrant rapeseed oil

方法	离心法		自然沉降法	
	油脂得率/%	得率提升/%	油脂得率/%	得率提升/%
W	96.36±0.10 ^c	—	92.73±0.00 ^d	—
DA	96.83±0.06 ^a	0.47	97.05±0.32 ^b	4.32
DC	96.67±0.04 ^b	0.31	95.68±0.32 ^c	2.95
3G	96.88±0.04 ^a	0.52	98.50±0.19 ^a	5.77

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同磷脂酶脱胶对浓香菜籽油质量的影响

2.2.1 质量指标分析

磷脂酶脱胶浓香菜籽油质量是否符合相关标准要求,是酶法脱胶技术在浓香菜籽油上应用的重要前提。3 种磷脂酶脱胶油和传统法水化脱胶油的质量指标结果表明(见表 2),该批次浓香菜籽油经 3 种磷脂酶脱胶后,在含磷量、酸价、过氧化值、色值、冷冻试验和加热试验等方面均符合新国标压榨二级菜籽油要求^[25]。

在含磷量上,3 种酶制剂均可以将含磷量控制在 20 mg/kg 以内,其中 Purifine® PLC 和 Purifine® 3G 酶脱胶油含磷量较高,传统水化脱胶油含磷量居中,Purifine® PLA1 酶脱胶油含磷量最低,为 0.05 mg/kg。实际生产中,浓香菜籽毛油经传统水化脱胶后含磷量往往可降至 30 mg/kg 以下,也存在部分含磷量超过 30 mg/kg 的情况^[4-5,9-10]。因此,针对非水化磷脂含量较低的浓香菜籽毛油,采用 Purifine® 3G 和 Purifine® PLC 酶进行脱胶也可将含磷量控制到较低水平,符合新国标要求。

在酸价上,Purifine® PLC 和 Purifine® 3G 脱胶

油的酸价与传统水化脱胶油无显著差异,Purifine® PLA1 酶脱胶油的酸价虽然符合新国标要求,但较其他 3 种方法明显高出 0.59 mg/g($P<0.01$)。Purifine® PLC 酶水解磷脂后不会产生游离脂肪酸,因此不会导致酸价上升;但 Purifine® PLA1 酶水解产物之一即为游离脂肪酸,因此 Purifine® PLA1 酶脱胶油的酸价较其他脱胶方法有显著上升^[8,21]。叶展等的研究表明,磷脂酶 C 脱胶油的酸价较水化脱胶油无显著变化^[10]。万楚筠等的研究结果也表明,经 Lecitase ultra 脱胶后,脱胶油的酸价显著上升,其上升幅度为 0.28~1.04 mg/g,9 组样品中 6 组样品酸价低于 3.00 mg/g,3 组超过 3.00 mg/g^[9]。该结果也预警了一个问题,即当浓香菜籽毛油的酸价较高时,再采用 Purifine® PLA1 酶脱胶,存在脱胶油酸价不符合要求的风险。因此,建议结合毛油的质量酌情使用 Purifine® PLA1 酶。

在过氧化值、色值、冷冻试验和加热试验方面,3 种磷脂酶脱胶油与传统水化脱胶油几乎一致,均符合新国标压榨二级菜籽油要求。

表 2 不同磷脂酶脱胶对浓香菜籽油质量指标的影响

Table 2 Effect of different phospholipases degumming on the quality of fragrant rapeseed oil

样品	磷/(mg/kg)	酸价/(mg/g)	过氧化值/(g/hg)	色值(R/Y)	冷冻试验	加热试验(280 °C)
W	11.93±0.31 ^b	1.71±0.03 ^b	0.08 ^a	5.2/32	澄清透明	无微量析出物,油脂颜色变化差异不显著
DA	0.05±0.00 ^c	2.28±0.06 ^a	0.08 ^a	5.2/30		
DC	17.34±3.24 ^a	1.73±0.06 ^b	0.07 ^a	5.4/30		
3G	15.77±2.06 ^a	1.76±0.07 ^b	0.07 ^a	5.2/31		
新国标压榨二级菜籽油 ^[25]	—	3.0	0.25	—	澄清透明	允许微量析出物和油色变深

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2.2 储藏期间质量稳定性分析 食用油在储藏期内质量的稳定性也是备受关注的问题。作者主要围绕酸价和过氧化值两个指标,对3种磷脂酶脱胶油和传统水化脱胶油在储藏期间变化情况进行了比较,以探究磷脂酶对脱胶油质量稳定性的影响(见图1)。结果表明,3种磷脂酶脱胶油与传统水化脱胶油在储藏期间的酸价和过氧化值均呈缓慢升高的趋势,该结果也与其他文献的报道相一致^[26];同时,在同一时期内4种脱胶油的两指标差异不大。因此,3种磷脂酶对脱胶油的质量稳定性没有负面影响。

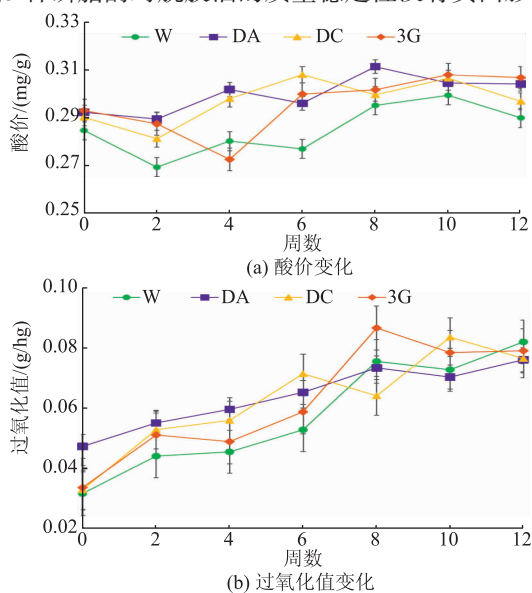


图1 不同磷脂酶脱胶对浓香菜籽油储藏质量稳定性的影响

Fig. 1 Effects of different phospholipases degumming on the stability of fragrant rapeseed oil quality during storage

表3 不同磷脂酶脱胶对浓香菜籽油风味的影响

Table 3 Effects of different phospholipases degumming on the flavor of fragrant rapeseed oil

室温存放时间	组别	评价组人数	答对人数	答对人数临界值($P<0.05$)	有无差异
静置 1 d	W 与 DA	24	8	13	无
	W 与 3G	24	10	13	无
	W 与 DC	24	7	13	无
静置 14 d	W 与 DA	24	15	13	有
	W 与 3G	24	14	13	有
	W 与 DC	24	15	13	有

2.3.2 喜好度分析 喜好度评价实验结果表明(见表4),3种磷脂酶脱胶浓香菜籽油的风味均优于传统水化脱胶浓香菜籽油,排序结果为 $DC>3G>DA>W$ 。该结果也表明,酶法脱胶技术不会对浓香菜籽油的风味产生不良影响。

2.3 不同磷脂酶脱胶对浓香菜籽油风味的影响

风味是浓香菜籽油的关键指标,《菜籽油感官评价团标》已经于2021年5月正式立项。磷脂酶脱胶对浓香菜籽油的风味是否存在不良影响,也决定了该技术是否适合推广应用。因此,作者围绕不同磷脂酶脱胶对浓香菜籽油风味的影响开展了研究。

2.3.1 风味的三点检验感官评价 将3种磷脂酶脱胶油分别与传统水化脱胶油进行三点检验实验,以分析不同磷脂酶对脱胶浓香菜籽油风味的影响。结果表明(见表3),新制备的3种磷脂酶脱胶油与传统水化脱胶油风味之间无显著差异,但在室温条件下存放14d后,3种磷脂酶脱胶油样品的风味与传统水化脱胶油之间呈现显著差异($P<0.05$)。苏晓霞等发现不同工段的菜籽油挥发性成分组成存在显著差异,即使是简单的传统水化脱胶前后的毛油与脱胶油,其与风味密切相关的吡嗪类化合物、硫甙降解产物、杂环类化合物及氧化挥发物(醛类、醇类、酮类、烯类等)种类及含量均发生显著变化^[19]。该结果可能与传统水化脱胶工艺采用NaCl溶液有关。NaCl溶液是常见的电解质溶液,经过离心分离后,油脂中依旧存有少量NaCl溶液,电解质与浓香菜籽毛油经短接触,可能不会对风味产生明显影响,但经过长时间作用,便可能对风味物质产生影响,从而导致浓香菜籽油风味产生差异。因此,传统水化脱胶浓香菜籽油风味与以添加纯水或者低浓度柠檬酸溶液为主的磷脂酶脱胶浓香菜籽油呈现出差异。

表4 不同磷脂酶脱胶与传统水化脱胶浓香菜籽油风味喜好度排序

Table 4 Flavor preference sort of fragrant rapeseed oil degummed by different phospholipases and traditional hydration

喜好度	W	DA	DC	3G
得分	2.25	2.33	2.79	2.63
排序	4	3	1	2

3 结语

酶法脱胶较传统法脱胶在油脂得率、产品质量和风味方面均具有显著优势。在油脂得率方面,酶法脱胶工艺显著优于传统水化脱胶工艺。在产品质量方面,不同种类的磷脂酶在磷脂脱除和脱胶油酸价上呈现出差异,Purifine® PLC 酶及其升级版混合酶脱胶浓香菜籽油产品质量及储藏期稳定性与传统水化脱胶浓香菜籽油无显著差异,均符合相关标

准要求;Purifine® PLA1 酶脱胶浓香菜籽油含磷量显著低于传统水化脱胶浓香菜籽油,但酸价显著高于传统水化脱胶浓香菜籽油,其他指标无显著差异。在产品风味方面,静置 14 d 后的酶法脱胶浓香菜籽油与传统水化脱胶浓香菜籽油存在显著差异,且喜好度排序结果均优于传统水化脱胶浓香菜籽油。后续可进一步探讨酶法脱胶技术在浓香菜籽油加工中的应用,提升我国油脂绿色生产加工的技术水平。

参考文献:

- [1] 王瑞元. 中国菜籽油的生产和消费情况[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 1-2.
- [2] 王瑞元. 2019 年我国粮油生产及进出口情况[J]. 中国油脂, 2020, 45(7): 1-4.
- [3] 罗质, 姜敏杰, 何东平, 等. 菜籽油加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2019.
- [4] 叶展, 冉玉兵, 胡传荣, 等. 菜籽油磷脂酶 C 脱胶工艺优化及效果分析[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(11): 87-92.
- [5] 刘瑞利, 张传许, 沈益烈, 等. 磷脂酶在浓香菜籽油脱胶中的应用研究[J]. 黄冈师范学院学报, 2016, 36(3): 47-49, 54.
- [6] 余榛榛, 常明, 刘睿杰, 等. 单增李斯特氏菌磷脂酶 C (lm-plcB) 基因的克隆表达及其在油脂脱胶中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 44-49.
- [7] 毛涛, 李维琳, 喻子牛, 等. 磷脂酶 A2 用于菜籽油脱胶[J]. 中国油脂, 2007(11): 20-22.
- [8] 汪增乾, 包李林, 熊巍林, 等. 四级浓香菜籽油酶法脱胶工艺条件优化[J]. 中国油脂, 2019, 44(7): 28-31.
- [9] 万楚筠, 黄洪洪, 夏伏建, 等. 酶处理对菜籽油脱胶及品质的影响[J]. 食品科学, 2007(5): 194-198.
- [10] 叶展, 冉玉斌, 何东平, 等. 菜籽油磷脂酶 C 脱胶与水化脱胶条件优化及效果对比研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(14): 260-265, 270.
- [11] 毛晓慧. 炒籽过程中浓香菜籽油产香机制的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.
- [12] JING B Y, GUO R, WANG M Z, et al. Influence of seed roasting on the quality of glucosinolate content and flavor in virgin rapeseed oil[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2020, 126: 1-8.
- [13] MAO X H, ZHAO X Z, HUYAN Z Y, et al. Relationship of glucosinolate thermal degradation and roasted rapeseed oil volatile odor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(40): 11187-11197.
- [14] 初柏君, 扈柏文, 李晓龙, 等. 不同品种菜籽原料与浓香菜籽油风味品质的相关性[EB/OL]. (2021-12-15)[2022-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211202.2150.030.html>.
- [15] 扈柏文, 武州, 于森, 等. 不同炒制工艺对低芥酸浓香菜籽油风味变化的研究[EB/OL]. (2021-09-03)[2022-05-06]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210427>.
- [16] 孙国昊, 刘玉兰, 连四超, 等. 油菜籽品种对浓香菜籽油风味及综合品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 190-197.
- [17] JIA X, WANG L F, ZHENG C, et al. Key odorant differences in fragrant *Brassica napus* and *Brassica juncea* oils revealed by gas chromatography-olfactometry, odor activity values, and aroma recombination[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(50): 14950-14960.
- [18] 蒋林利. 菜籽油加工与储藏过程中挥发性风味物质变化规律研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.
- [19] 苏晓霞, 郭斐, 黄一珍, 等. 精炼过程对菜籽油风味成分的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(3): 41-47.
- [20] 李杉杉, 程倩, 谢亮, 等. 大豆毛油酶法脱胶效果的研究[EB/OL]. (2021-10-08)[2022-05-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1099.ts.20211005.1138.005.html>.
- [21] NIKOLAEVA T, RIETKERK T, SEIN A, et al. Impact of water degumming and enzymatic degumming on gum mesostructure formation in crude soybean oil[J]. *Food Chemistry*, 2020, 311: 1-9.
- [22] 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.
- [23] FILKIN S Y, LIPKIN A V, FEDOROV A N. Phospholipase superfamily: structure, functions, and biotechnological applications [J]. *Biochemistry (Moscow)*, 2020, 85(1): 177-195.
- [24] DIJKSTEE A J. Enzymatic degumming[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2010, 112(11): 1178-1189.
- [25] 国家市场监督管理总局, 国家标准管理委员会. 菜籽油: GB/T 1536-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [26] 冯燕玲, 周建新, 高瑀珑. 储藏环境对菜籽油酸值和过氧化值的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(2): 23-26.