

基于樟树籽油和棕榈油硬脂结构脂的开发 及其在人造奶油中的应用

高盼^{1,2}, 张远鹏¹, 王澍³, 周桐¹, 殷娇娇¹, 钟武^{1,2}, 胡传荣¹

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 国家市场监管重点实验室(食用油质量与安全), 武汉 430023; 3. 武汉食品化妆品检验所, 武汉 430012)

摘要:旨在开发具有改善营养和功能特性的新型人造奶油产品,以樟树籽油(CSO)和棕榈油硬脂(PST)为基料油制备结构脂。在比较化学酯交换结构脂(CIE)和酶法酯交换结构脂(EIE)的甘油三酯及sn-2位脂肪酸组成、热力学性质(滑动熔点、固体脂肪含量)、流变学特性及晶型的基础上,选择一种结构脂用于制备人造奶油,分析了所制备的人造奶油的基本理化指标、硬度以及打发性。结果表明:酯交换明显改变了CSO和PST的甘油三酯和sn-2位脂肪酸的含量,CIE和EIE中均有中长碳链甘油三酯生成,主要是CCO、CCP、CLaO和LaPP,滑动熔点为31.8~41.5℃;CSO与PST质量比为5:5和7:3时所制备的EIE有良好的口融性;2种酯交换技术制备的结构脂均表现剪切变稀现象,均存在 β' 晶型和 β 晶型;选择CSO与PST质量比为3:7的EIE为原料制备人造奶油,所制备的人造奶油酸值(KOH)(0.47 mg/g)、过氧化值(0.62 mmol/kg)、水分含量(13.79%)符合产品相关标准要求,且具有良好的打发性和硬度。综上,樟树籽油和棕榈油硬脂经酶法酯交换制备的结构脂,能够作为改善人造奶油营养特性的原料。

关键词:樟树籽油;结构脂;酯交换;人造奶油

中图分类号:TS225.6;TQ641 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)05-0056-07

Development of structured lipids based on camphor seed oil and palm stearin and its application in margarine

GAO Pan^{1,2}, ZHANG Yuanpeng¹, WANG Shu³, ZHOU Tong¹,
YIN Jiaojiao¹, ZHONG Wu^{1,2}, HU Chuanrong¹

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Key Laboratory of Edible Oil Quality and Safety for State Market Regulation, Wuhan 430023, China;
3. Wuhan Institute for Food and Cosmetic Control, Wuhan 430012, China)

Abstract: To develop a new type of margarine product with enhanced nutritional and functional properties, camphor seed oil (CSO) and palm stearin (PST) were used as base oils, the structured lipids of CIE and EIE were prepared by chemical transesterification and enzymatic transesterification, respectively. By comparing the glyceride and sn-2 fatty acid composition, thermodynamic properties (sliding melting point, solid fat content), rheological characteristics, and crystal form of CIE and EIE, one type of structured lipid was selected to prepare margarine. The basic physicochemical indicators, hardness, and whipping property of the prepared margarine were analyzed. The results indicated that transesterification significantly altered the glyceride and sn-2 fatty acid contents of CSO and PST, with the generation of medium-long chain glycerides in CIE and EIE, mainly CCO, CCP, CLaO, and LaPP,

and a sliding melting point ranging from 31.8 °C to 41.5 °C. The EIE prepared with the mass ratio of CSO to PST 5:5 and 7:3 exhibited good mouth-melting properties. The structured lipids prepared

收稿日期:2024-04-02;修回日期:2025-03-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2200705)

作者简介:高盼(1990),女,副教授,博士,研究方向为油脂及植物蛋白(E-mail)gaopan925@163.com。

by both transesterification technologies showed shear – thinning phenomena and both β' and β crystal forms were present. EIE prepared with a mass ratio of CSO to PST 3:7 was selected as the raw material for preparing margarine. The acid value (0.47 mgKOH/g), peroxide value (0.62 mmol/kg), and moisture content (13.79%) of the prepared margarine met the relevant standard requirements, and it had good whipping property and hardness. In conclusion, the structured lipids prepared by enzymatic transesterification of CSO and PST can be used as raw materials to improve the nutritional characteristics of margarine.

Key words: camphor seed oil; structured lipids; transesterification; margarine

传统人造奶油含有高含量的饱和脂肪酸和反式脂肪酸,长期过量摄入显著危害人体心血管和代谢健康。随着消费者对健康食品需求的增加,人造奶油产品的健康改良已成为食品科学领域的一个重要研究方向,亟需寻找新的健康原料和方法制备人造奶油。樟树籽油(CSO)富含中碳链脂肪酸(MCTs),而 MCTs 具有独特的代谢途径^[1],能够快速提供能量^[2],减少脂肪积累^[3],对改善心血管健康、管理体质量^[4]等具有积极作用,因此 CSO 被认为是理想的健康油脂来源^[5],其在制备具有健康功效的人造奶油方面展现出独特的优势。然而,直接使用 CSO 制备人造奶油存在一定的局限性,其特有的风味和较低的熔点可能影响人造奶油产品的质地和储存稳定性^[6]。

酯交换技术是制备结构脂的常用方法,可以改善油脂的物理化学性质和营养特性^[7],在保持油脂原有健康优势的同时^[8]调整其熔点、固体脂肪含量(SFC)和结晶行为,使之更适合作为人造奶油的基料油^[9]。酯交换技术包括化学法和酶法^[10],这 2 种方法所生产的结构脂性质存在差异。目前,酯交换技术在改善基于 CSO 和棕榈油硬脂(PST)结构脂的应用性能方面的研究仍然有限^[11],需要进一步系统性研究。

本研究以 CSO 和 PST 为基料油,采用化学法和酶法 2 种酯交换技术制备结构脂,比较 2 种结构脂的甘油三酯和 sn-2 位脂肪酸组成、热力学性质、流变学特性及晶型,分析其在人造奶油制备上的应用效果,以期开发一种既保持樟树籽油的营养优势,又改善其在人造奶油中应用性能的结构脂,为食品工业提供新的原料解决方案。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

樟树籽油(CSO),以江西省抚州市金溪县的小叶樟树籽为原料,在实验室压榨制取;棕榈油硬

脂(PST),益海嘉里金龙鱼粮油股份有限公司;lipozyme TL IM 固定化脂肪酶,诺维信公司;正己烷、氢氧化钾、异丙醇、冰乙酸、乙酸乙酯、三氯甲烷、异辛烷、草酸、甲醇、甲醇钠、可溶性淀粉、无水硫酸钠、碘化钾、酚酞指示剂、无水硫酸钠、无水碳酸钠等均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

SB25-12DTD 超声波清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;多管涡旋混合器,杭州旌斐仪器科技有限公司;TG165 台式高速离心机,长沙平凡仪器仪表有限公司;7890A 气相色谱仪,安捷伦科技有限公司;NM-2 型核磁共振分析仪,苏州纽迈电子科技有限公司;DHR-2 旋转流变仪,赛默飞世尔科技有限公司;质构仪,上海保圣实业发展有限公司;Mastersizer 3000 旋转蒸发仪、XD-2 型全自动 X-射线衍射仪,英国马尔文仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 结构脂的制备

化学法酯交换制备结构脂(CIE):分别按质量比 3:7、5:5、7:3 将 CSO 和 PST 混合,称取 50 g 混合油于三口烧瓶中,于 80℃、-0.09 MPa 下真空磁力搅拌干燥 30 min,加入 0.3% 甲醇钠反应 1 h 后停止加热,加入质量分数 10% 的柠檬酸溶液终止反应。把反应物转移到烧杯中用温水洗涤,离心,在 80℃ 下真空干燥后备用。

酶法酯交换制备结构脂(EIE):分别按质量比 3:7、5:5、7:3 将 CSO 和 PST 混合,称取 50 g 混合油,加入 10% lipozyme TL IM 固定化脂肪酶,混匀后转移至 45℃ 恒温振荡器中,于 300 r/min 下恒温反应 24 h 后,用布氏漏斗过滤除去反应液中的脂肪酶,收集滤液于 4℃ 下保存备用。

对照组(NIE):分别按质量比 3:7、5:5、7:3 将 CSO 和 PST 混合,然后将混合油涡旋振荡 10 min 后备用。

1.2.2 结构脂理化指标分析

1.2.2.1 甘油三酯组成的测定

甘油三酯组成参照 AOCS Official Method Ce5-86 的方法采用气相色谱(GC)法测定。GC 条件:火焰离子化检测器,检测器温度 360℃;MEGA-1 色谱柱(30 m×250 μm×0.1 μm);载气为氢气,流速 40 mL/min;进样口温度 350℃;进样量 20 μL;柱升温程序为初始温度 250℃,保持 1 min,以 20℃/min 升温至 280℃,以 10℃/min 升温至 340℃,以 1℃/min 升温至 350℃,保持 20 min。

1.2.2.2 sn-2 位脂肪酸组成的测定

参考艾洪增^[12]的方法并稍作修改。取 20 mg 样品、1 mL 0.1 mol/L Tris-HCl 缓冲液(pH 7.6)和 1 mg 胰脂酶涡旋振荡混匀,加入 0.25 mL 0.05% 胆酸盐和 0.1 mL 2.2% 氯化钙,涡旋振荡 1 min 后,37℃ 反应 3 min;再涡旋振荡 30 s,37℃ 反应 3 min;最后涡旋振荡 30 s,37℃ 反应 2 min。然后加入 4 mL 乙醚终止反应。离心后提取乙醚层,用无水硫酸钠过滤后氮气吹干,加入约 0.1 mL 氯仿充分溶解。硅胶板点样 45 min 后取出硅胶板,使用 2,7-二氯荧光黄显色,紫外灯下观察,确定条带并刮下,加入 3 mL 正己烷溶解,加入 1 mL 2 mol/L 氢氧化钾-甲醇溶液进行甲酯化,涡旋混匀后离心 15 min,取上层液,无水硫酸钠过滤后,氮气吹干,加入 1 mL 正己烷复溶,待 GC 分析。

GC 条件:CP-Sil88 熔融石英毛细管柱(100 m×0.25 mm×0.2 μm);检测器温度 250℃;不分流进样,进样量 1 μL;载气为氦气;燃烧气为氮气、氢气和空气,流速分别为 30、30、300 mL/min;进样口温度 250℃,总流量 29.42 mL/min;柱压 169 kPa,柱内流速 1.8 mL/min;柱升温程序为初始温度 45℃,保持 4 min,以 13℃/min 升至 175℃,保持 27 min,以 4℃/min 升至 215℃,保持 35 min。

以脂肪酸甲酯标准品对脂肪酸进行定性,用峰面积归一化法定量。

1.2.2.3 滑动熔点的测定

将毛细管浸入油样中,使管内油脂高度达到 10 mm,取出装样毛细管放在冰上迅速固化,然后置于 4℃ 冰箱中存放 16 h。取出装样毛细管固定于温度计上,使靠近管子底部的脂肪柱与水银温度计金属头部的下端对齐。将温度计固定在传温液中,使毛细管底端距水面约 30 mm,调节水浴的起始温度至试样预计熔点以下 8~10℃ 时,用搅拌器缓慢搅拌,使温度计周围温度均匀。水浴加热速率为 0.5℃/min,记录毛细管中脂肪柱开始上升时的温度,即为滑动熔

点,结果取 2 次测定结果的平均值。测定结果要求 2 次实验误差小于 0.5℃。

1.2.2.4 SFC 的测定

通过 NM-2 型核磁共振分析仪测定 SFC。称取 1.5 g 油样于核磁共振试管中,在 60℃ 保持 30 min 熔化样品并消除结晶记忆,然后在 0℃ 下保持 60 min,最后依次分别在 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55℃ 恒温保持 30 min 后测定 SFC。采用干式恒温器用于快速降温 and 提供精确的温度控制。以甘油三酯标准品对每个温度进行校正。

1.2.2.5 黏度的测定

采用 DHR-2 旋转流变仪测定样品的黏度。测定条件:平行板直径 40 mm,间距 0.07 mm,测试温度 25℃,剪切速率 0.1~100 s⁻¹。

1.2.2.6 晶型分析

采用 XD-2 型全自动 X-射线衍射仪测定样品晶型。测定条件:Cu 靶($\lambda=1.54184 \text{ \AA}$),工作电压 36 kV,电流 20 mA,步长 0.02°,扫描角度(2 θ) 5°~30°,扫描速度 2 (°)/min,测试温度 25℃。

1.2.3 人造奶油的制备

取结构脂在 65℃ 下搅拌至完全融化,向其中加入 0.3% 乳化剂大豆卵磷脂,搅拌至完全融化。按照体积比 83:17 向其中缓慢滴入 65℃ 质量分数 2% 的盐水,搅拌乳化 30 min,放入 -80℃ 冰箱搅拌捏合 4 min,放入 25℃ 恒温箱熟化 24 h,得人造奶油。

1.2.4 人造奶油理化指标分析

1.2.4.1 基本理化指标

酸值测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》;过氧化值测定参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》;水分含量测定参照 GB 5009.3—2023《食品安全国家标准 食品中水分的测定》。

1.2.4.2 硬度和打发性测定

硬度:样品先于 60℃ 下完全熔化后置于 4℃ 冰箱中结晶,再于室温下放置 24 h 后采用质构仪检测样品在 15~30℃ 的硬度。测定条件:TA44 探头,测试速度 2 mm/s,进样深度 10 mm,触发力 4.0 g。

打发性:取 200 g 样品在 5~30℃ 下放置 24 h,再置于 700 r/min 搅拌机中连续搅打,每隔 5 min 测定打发油样的质量。打发性以相同体积的打发油样与水的质量比值表示。比值越小,打发性越好。

1.2.5 数据统计分析

未有特殊说明实验平行测定 3 次,结果以“平均值±标准差”表示。采用 SPSS 19.0 软件对数据

进行单因素方差分析(ANOVA),采用不同字母来表示差异显著性($p < 0.05$),使用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 结构脂理化指标

2.1.1 甘油三酯组成及相对含量

甘油三酯的具体类型及其不饱和程度对油脂的理化特性具有显著影响。一般来说,甘油三酯的类型按其不饱和程度划分为三饱和(S_3)、双饱和-单不饱和(S_2U)、单饱和-双不饱和(U_2S)、三不饱和(U_3)甘油三酯。原料油和结构脂的甘油三酯组成见表 1。

由表 1 可以看出,PST 中主要甘油三酯为 PPO

(38.55%)、PPP(35.25%)和 POO(14.44%)。CSO 中主要甘油三酯为 CCLa (82.71%)、CLaLa (13.14%)和 CCC(4.15%)。与 NIE 相比,CIE 和 EIE 的甘油三酯含量发生了显著变化,特别是 EIE 的 CCLa、PPO 和 PPP 含量明显减少,导致其他中长碳链甘油三酯(MLCT)如 CCO、CCP、CLaO 和 LaPP 等含量明显增加。这些 MLCT 具有减肥、减少脂肪积聚、降脂、降糖和调节肠道菌群等功能特性。以上结果表明,酶法酯交换技术在制备具有 MLCT 的结构脂方面具有显著优势。不同基料油比例下结构脂的甘油三酯含量不同,这归因于化学法酯交换技术的随机酯交换特性以及酶法酯交换技术中酶的催化特性。

表 1 原料油和结构脂的甘油三酯组成及相对含量
Table 1 Triglyceride composition and relative content in raw oils and structured lipids %

甘油三酯	CSO	PST	NIE			CIE			EIE		
			3:7	5:5	7:3	3:7	5:5	7:3	3:7	5:5	7:3
CCC	4.15 ^a	0.00 ^g	1.72 ^e	2.66 ^e	2.91 ^b	0.00 ^g	1.65 ^f	1.78 ^d	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g
CCLa	82.71 ^a	0.00 ^k	26.82 ^d	41.65 ^e	54.14 ^b	20.33 ^g	24.67 ^f	26.44 ^e	9.47 ^j	12.75 ⁱ	16.45 ^h
CLaLa	13.14 ^a	0.00 ^k	3.98 ^g	5.44 ^d	6.54 ^b	3.28 ^j	3.89 ^h	3.78 ⁱ	5.46 ^e	4.26 ^f	4.57 ^e
CCO	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	3.32 ^f	3.67 ^e	4.21 ^d	4.69 ^e	6.83 ^b	8.89 ^a
CCP	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	3.16 ^f	4.15 ^e	4.76 ^d	7.72 ^e	8.23 ^b	8.43 ^a
CLaO	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	6.35 ^f	7.21 ^e	9.56 ^d	12.84 ^e	17.90 ^b	21.02 ^a
CPO	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	3.45 ^e	2.54 ^e	2.12 ^f	2.94 ^d	5.72 ^b	6.23 ^a
LaPP	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g	5.34 ^f	5.79 ^d	7.54 ^a	5.76 ^e	7.18 ^b	6.31 ^c
PLO	0.00 ⁱ	5.88 ^a	4.24 ^e	4.14 ^f	3.84 ^g	5.35 ^b	5.20 ^c	4.30 ^d	1.27 ^h	0.00 ⁱ	0.00 ⁱ
PPL	0.00 ^k	2.53 ^d	2.12 ^f	1.46 ^h	1.25 ^j	2.18 ^e	1.57 ^g	1.45 ⁱ	4.62 ^a	3.12 ^b	2.72 ^c
OOO	0.00 ^g	0.45 ^a	0.31 ^c	0.28 ^d	0.22 ^f	0.33 ^b	0.28 ^d	0.26 ^e	0.00 ^g	0.00 ^g	0.00 ^g
POO	0.00 ^k	14.44 ^a	8.00 ^d	6.67 ^f	5.21 ^h	8.46 ^b	7.32 ^e	4.31 ⁱ	8.34 ^e	5.52 ^g	3.62 ^j
PPO	0.00 ^k	38.55 ^a	30.84 ^b	22.54 ^e	13.46 ^h	20.27 ^d	16.42 ^f	13.41 ⁱ	19.53 ^e	15.20 ^g	10.43 ^j
PPP	0.00 ^k	35.25 ^a	20.76 ^b	14.18 ^f	11.54 ^h	16.08 ^e	13.72 ^g	14.30 ^d	14.28 ^e	11.12 ⁱ	9.37 ^j
POS	0.00 ^k	1.08 ^d	0.53 ^h	0.35 ⁱ	0.29 ^j	0.88 ^e	0.81 ^f	0.75 ^g	1.57 ^a	1.33 ^b	1.18 ^c
PPS	0.00 ^k	1.83 ^a	0.69 ^h	0.64 ⁱ	0.61 ^j	1.23 ^e	1.12 ^d	1.03 ^e	1.52 ^b	0.85 ^f	0.78 ^g
S ₃	100.00	37.08	53.97	64.57	75.73	49.42	54.99	59.63	44.21	44.39	45.91
S ₂ U	0.00	42.16	33.49	24.34	15.00	36.45	32.22	31.50	46.19	50.10	50.47
U ₂ S	0.00	20.32	12.24	10.81	9.05	13.81	12.52	8.61	9.61	5.52	3.62
U ₃	0.00	0.45	0.31	0.28	0.22	0.33	0.28	0.26	0.00	0.00	0.00

注:标准差省略。C. C10:0;La. C12:0;O. C18:1;P. C16:0;L. C18:2;S. C18:0。同行不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: The standard deviation is not included in the table. C. Capric acid; La. Lauric acid; O. Oleic acid; P. Palmitic acid; L. Linoleic acid; S. Stearic acid. Different letters in the same line indicate significant difference ($p < 0.05$). The same below

2.1.2 sn-2 位脂肪酸组成及相对含量

原料油和结构脂的 sn-2 位脂肪酸组成及相对含量见表 2。

由表 2 可知,CIE 和 EIE 的 sn-2 位脂肪酸含量相比 NIE 有显著差异,说明酯交换处理显著

改变了混合油的脂肪酸分布。随着 CSO 含量的增加,CIE 和 EIE 的 sn-2 位 SFA 含量增加,MUFA 和 PUFA 含量减少,但均与 NIE 有显著差异,说明在不同原料油比例下发生了不同程度的酯交换。

表 2 原料油和结构脂的 sn-2 位脂肪酸组成及相对含量

脂肪酸	CSO	PST	NIE			CIE			EIE			%
			3:7	5:5	7:3	3:7	5:5	7:3	3:7	5:5	7:3	
C10:0	57.51 ^a	0.00 ^k	15.21 ⁱ	28.50 ^e	41.14 ^b	17.82 ^h	18.02 ^g	24.93 ^d	14.57 ^j	18.86 ^f	21.50 ^c	
C12:0	39.93 ^a	0.17 ^k	10.53 ⁱ	18.08 ^e	30.56 ^b	8.14 ^j	13.22 ^g	17.21 ^d	11.76 ^h	13.62 ^f	16.85 ^c	
C14:0	0.34 ^h	1.33 ^a	1.14 ^b	0.84 ^d	0.46 ^f	0.00 ⁱ	0.88 ^c	0.38 ^g	0.84 ^d	0.79 ^e	0.80 ^c	
C16:0	0.85 ^k	41.79 ^a	30.56 ^c	21.10 ^h	11.35 ^j	32.49 ^b	30.04 ^d	23.78 ^f	24.09 ^e	22.75 ^g	20.77 ⁱ	
C18:0	0.00 ^k	4.18 ^a	3.45 ^c	2.03 ^h	1.24 ^j	3.20 ^d	1.73 ⁱ	2.67 ^e	3.51 ^b	2.66 ^f	2.54 ^g	
C18:1	1.06 ^k	47.25 ^a	34.54 ^d	26.26 ⁱ	13.44 ^j	34.02 ^c	32.47 ^g	28.73 ^h	40.29 ^b	36.57 ^e	33.41 ^f	
C18:2	0.22 ^k	5.18 ^a	4.48 ^d	3.11 ^h	1.72 ^j	4.10 ^c	3.43 ^g	2.12 ⁱ	4.62 ^b	4.52 ^c	3.86 ^f	
C18:3	0.10 ^{fg}	0.11 ^f	0.10 ^{fg}	0.09 ^g	0.10 ^{fg}	0.24 ^c	0.21 ^d	0.19 ^c	0.32 ^a	0.24 ^c	0.27 ^b	
SFA	98.62 ^a	47.47 ^k	60.88 ^b	70.55 ^e	84.75 ^b	61.65 ^g	63.89 ^e	68.96 ^d	54.77 ^j	58.68 ⁱ	62.46 ^f	
MUFA	1.06 ^k	47.25 ^a	34.54 ^d	26.26 ⁱ	13.44 ^j	34.02 ^c	32.47 ^g	28.73 ^h	40.29 ^b	36.57 ^e	33.41 ^f	
PUFA	0.32 ^k	5.29 ^a	4.58 ^d	3.20 ^h	1.82 ^j	4.34 ^c	3.64 ^g	2.31 ⁱ	4.94 ^b	4.76 ^c	4.13 ^f	

注:SFA. 饱和脂肪酸;MUFA. 单不饱和脂肪酸;PUFA. 多不饱和脂肪酸
Note: SFA. Saturated fatty acids; MUFA. Monounsaturated fatty acids; PUFA. Polyunsaturated fatty acids

2.1.3 滑动熔点

甘油三酯的酰基基团改变会直接影响体系的物理化学性质,从而间接影响体系的热力学等特性。不同结构脂的滑动熔点见图 1。

经测定,CSO 滑动熔点为 19.8℃,PST 滑动熔点为 51.6℃。由图 1 可知,不同结构脂的滑动熔点范围在 31.8~41.5℃。随着 CSO 含量升高,所有结构脂的滑动熔点均降低。相较 NIE,CIE 与 EIE 滑动熔点均有所下降。总体上看,EIE 的滑动熔点最低,且在 CSO 与 PST 质量比为 7:3 时滑动熔点最低,仅为 31.8℃。

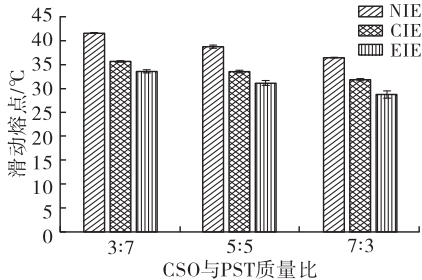


图 1 不同结构脂的滑动熔点

Fig.1 Sliding melting points of different structured lipids

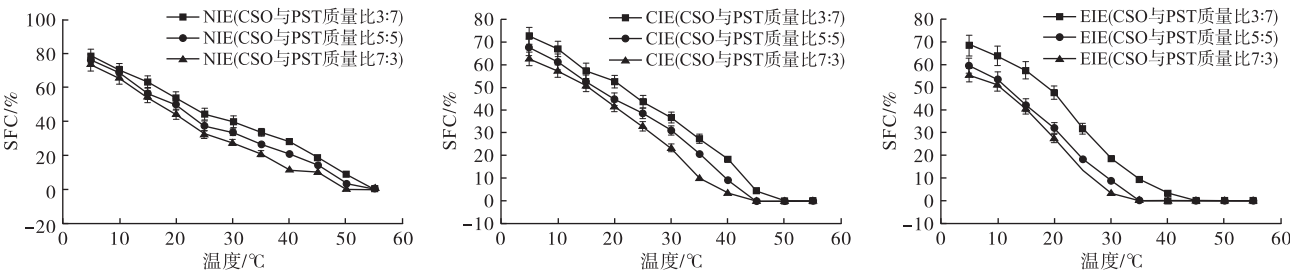


图 2 不同结构脂在不同温度下的 SFC

Fig.2 SFC of different structured lipids at different temperatures

2.1.5 黏度

食品专用油脂应具有独特的流变特性,这在很

2.1.4 SFC

SFC 是评价油脂理化性质的重要指标之一,不同温度下油脂的 SFC 决定了油脂产品的延展性、稳定性和口融性等。不同结构脂在不同温度下的 SFC 见图 2。

由图 2 可知,NIE、CIE 和 EIE 的 SFC 均随着温度升高而降低。CIE 在 5~30℃时 SFC 下降平缓,30~50℃时开始小幅加速下降,50℃时 SFC 均为 0。相比 NIE、CIE,EIE 的起始 SFC 最低,CSO 与 PST 质量比为 3:7、5:5、7:3 的 EIE 的起始 SFC 分别为 68.52%、59.23%、55.19%,EIE 的 SFC 在 5~15℃时下降较为平缓,然后大幅加速下降,35℃后下降逐渐平缓,45℃时均降到 0。这与 2.1.3 中 EIE 的滑动熔点最低、CIE 其次的结果相印证。35℃下油脂的 SFC 需小于 3%才能避免蜡质感。相比 NIE 和 CIE,只有 EIE 在 CSO 与 PST 质量比为 5:5 和 7:3 时其在 35℃下的 SFC 为 0,小于 3%,可在口腔中完全融化。由此可见,酶法酯交换反应可改善结构脂的口融性。

大程度上决定了食品的质地。不同结构脂的黏度随剪切速率的变化曲线见图 3。

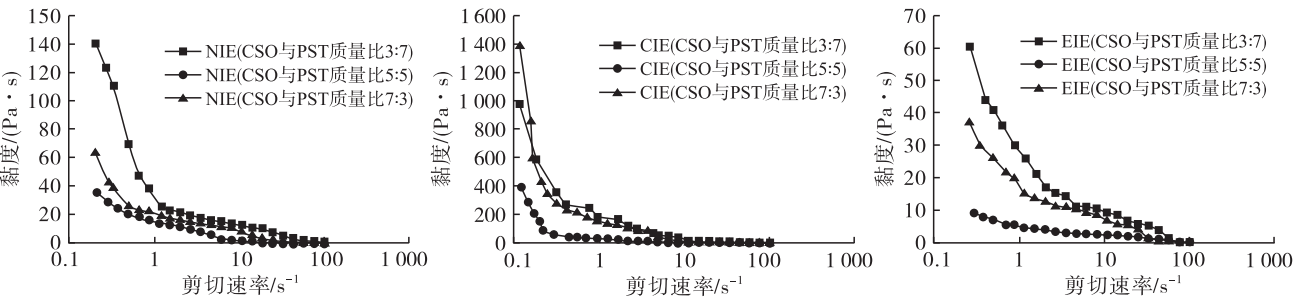


图 3 不同结构脂黏度随剪切速率变化曲线

Fig. 3 Variation curves of viscosity of different structured lipids with shear rate

由图 3 可知:剪切速率为 0.1 ~ 1 s⁻¹ 时,随着剪切速率的增加,NIE、CIE、EIE 的黏度均迅速降低,具有非牛顿流体性质;剪切速率为 1 ~ 100 s⁻¹ 时,NIE、CIE、EIE 的黏度变化很小,表现为牛顿流体特性。总体而言,CIE 的黏度最大,EIE 的最小,较低的起始黏度有助于样品在生产过程中快速混合和均匀分布,缩短混合时间,提高生产效率。CSO 与 PST 质量比为 3:7 的 EIE 随剪切速率的增加,其黏度下

降最明显,证明其在剪切作用下能够迅速达到所需的流动状态,具有较好的黏度特性。

2.1.6 晶型

晶型对人造奶油和起酥油品质有非常重要的影响,油脂中主要的晶型包括 α、β' 和 β 晶型。其中,β' 晶型具有精细的网状结构,能够大量束缚水相液滴和液油,是人造奶油和起酥油所需要的晶型。不同结构脂的 X - 射线衍射 (XRD) 图见图 4。

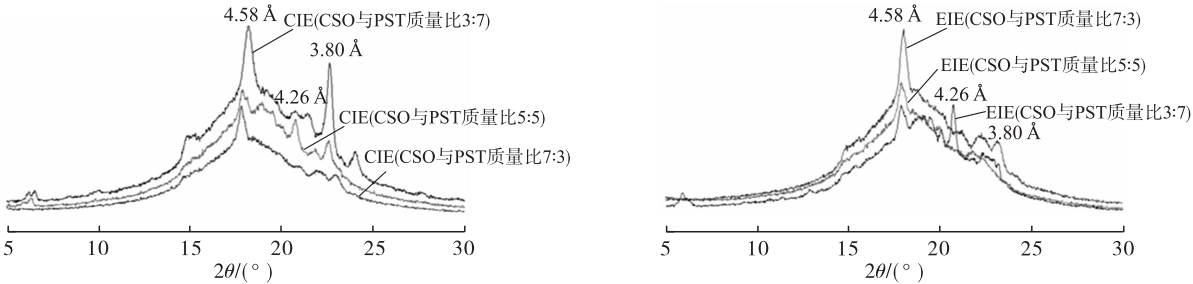


图 4 不同结构脂的 XRD 图

Fig. 4 XRD patterns of different structured lipids

如图 4 所示,CIE 和 EIE 在 4.2 Å 和 3.8 Å 附近有 2 个衍射峰,为 β' 晶型,在 4.6 Å 附近有 1 个强衍射峰,为 β 晶型。随着 CSO 比例上升,CIE 的 β 晶型和 β' 晶型含量均减少,而 EIE 的 β 晶型和 β' 晶型含量总体上逐渐增大。总体上看,与 CSO 与 PST 质量比 7:3 和 5:5 时相比,CSO 与 PST 质量比为 3:7 时 CIE 和 EIE 的 β' 晶型含量较高,且 β' 晶型含量多于 β 晶型,适合制备人造奶油。

综合考虑,选择 CSO 与 PST 质量比为 3:7 的 EIE 为原料,制备人造奶油,以进行后续实验。

2.2 人造奶油的理化指标

2.2.1 基本理化指标

人造奶油的基本理化指标见表 3。

表 3 人造奶油的基本理化指标

Table 3 Basic physicochemical indicators of margarine		
酸值(KOH)/(mg/g)	过氧化值/(mmol/kg)	水分含量/%
0.47 ± 0.02	0.62 ± 0.01	13.79 ± 1.59

由表 3 可知,以 CSO 与 PST 质量比为 3:7 的

EIE 为原料,制备的人造奶油的酸值 (KOH) 为 0.47 mg/g,过氧化值为 0.62 mmol/kg,水分含量为 13.79%,符合 LS/T 3217—1987《人造奶油 (人造黄油)》的要求〔酸值 (KOH) ≤ 1.0 mg/g,过氧化值 ≤ 5 mmol/kg,水分含量 ≤ 18% (A 型)〕。

2.2.2 硬度和打发性

人造奶油拥有良好的搅打性质对获得理想细腻结构的奶油至关重要。人造奶油的搅打性质会受其理化性质的影响,如硬度会影响搅打裹气性^[13]。在打发过程中,硬度较高的油脂能够形成更稳定的晶体网络结构,可更好地包裹空气,形成稳定的气泡,提高打发率;但油脂硬度过高,可能会导致黏度过高,反而降低打发率。人造奶油的硬度和打发性随温度变化关系见图 5。

由图 5 可知,人造奶油在 15 °C 时硬度较高,达到 689.15 g,这有助于在低温环境下保持奶油的形状。随着温度升高,人造奶油硬度迅速下降,在 25 °C 时基本稳定,这种特性使得产品在室温下易于

涂抹和使用。由图 5 可知,搅打温度越高,人造奶油的打发性越好,更多的空气被混入了人造奶油中使体积增加。人造奶油的硬度和打发性随温度的变化,使其能够适应不同的储存、运输和使用条件。在低温下保持稳定,在室温下易于使用,在高温下保持一定的轻盈度。通过控制温度和搅打条件,可以调整人造奶油的质地和口感,满足不同消费者的需求。

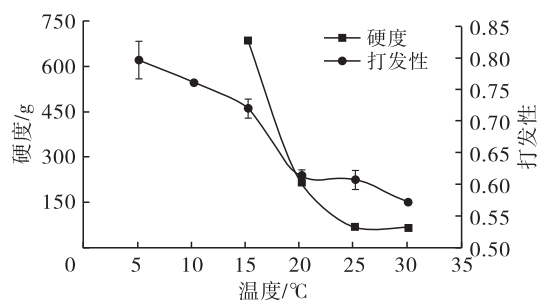


图 5 人造奶油的硬度和打发性

Fig. 5 Hardness and whipping property of margarine

3 结论

本研究以樟树籽油和棕榈油硬脂为基料油,分别通过酶法和化学法 2 种酯交换技术制备结构脂,通过对结构脂甘油三酯组成、sn-2 位脂肪酸组成、热力学性质、流变学特性及晶型的分析,选择以质量比为 3:7 的樟树籽油和棕榈油硬脂为原料,采用酶法催化酯交换技术制备结构脂,以此为原料制备的人造奶油基本理化指标符合相关标准要求,并具有良好的打发性和硬度。综上,通过酶催化酯交换技术开发的基于樟树籽油和棕榈油硬脂的结构脂,可作为健康型人造奶油的原料。未来可进一步探究不同原料比例和酯交换条件对结构脂性质的影响,并探索这些结构脂在各种食品系统中的应用效果。

参考文献:

[1] 李兴艳,刘爽,尚永彪. 中碳链脂肪酸甘油三酯的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(12): 366-370.

(上接第 42 页)

[25] FUCHS M, TURCHIULI C, BOHIN M, et al. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration[J]. J Food Eng, 2006, 75(1): 27-35.

[26] 殷琦,郑志,姜绍通,等. 维生素 E-大豆蛋白微胶囊的制备及特性研究[J/OL]. 中国油脂, 1-11[2024-03-21]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230083>.

[27] 柳新荣,王炜清,刘元法,等. 奶茶粉末油脂乳化液性能分析[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(3): 96-102.

[28] ADAMCZAK M, PARA G, SIMON C, et al. Natural oil nanoemulsions as cores for layer-by-layer encapsulation[J]. J Microencapsul, 2013, 30(5): 479-489.

[2] 杨金堂. 中链脂肪酸对高温环境下猪饲养和疾病防治的应用与机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.

[3] 张月红,刘英华,王觐,等. 中长链脂肪酸食用油降低超重高甘油三酯患者血脂和低密度脂蛋白胆固醇水平的研究[J]. 中国食品学报, 2010, 10(2): 20-27.

[4] DEVKOTA S, WANG Y, MUSCH M W, et al. Dietary fat-induced taurocholic acid production promotes pathobiont and colitis in IL-10^{-/-} mice[J]. Gastroenterology, 2012, 142: 104-108.

[5] 冯绍贵,李彦宸,董春怡,等. 樟树籽仁油的结构和特性分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(1): 22-26.

[6] DA SILVA R C, SOARES D F, LOURENÇO M B, et al. Structured lipids obtained by chemical interesterification of olive oil and palm stearin[J]. LWT - Food Sci Technol, 2010, 43(5): 752-758.

[7] BOLINI H M A, MEDEIROS A C, PEREIRA C T M, et al. Consumer acceptance studies of margarine to guide product development in the food industry[J/OL]. Foods, 2023, 13(1): 116[2025-02-23]. <https://doi.org/10.3390/foods13010116>.

[8] 魏翠平,王瑛瑶,栾霞. 人造奶油研究现状及其制备技术[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(6): 32-35.

[9] 李君,崔怀田,刘瑞琦,等. 脂肪替代物在低脂人造黄油中的应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 173-180, 189.

[10] 丁双,杨江科,闫云君. 酶法改良大豆油制备质构脂质的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 173-176.

[11] PUNVICHAI T, WACHIRATREEYAKUL T, CHANASRIPHUM A, et al. Developing a soft margarine with modified fatty acid profile having low trans fatty acids[J]. Int J Food Sci Technol, 2023, 58(11): 5896-5903.

[12] 艾洪增. Sn-2 位棕榈酸结构甘油三酯酶法制备及其理化与消化吸收特性研究[D]. 广州: 暨南大学, 2023.

[13] 石叹叹,张虹,毕艳兰,等. 老化时间对搅打植脂奶油品质的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(5): 58-62.

[29] 刘启航. 奶粉乳清蛋白类型对乳液/微胶囊形成及营养素吸收特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.

[30] 金旭冉. 姜精微胶囊的制备工艺、特性及应用研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2024.

[31] JIANG L, WANG Z, WANG Z, et al. Process optimization and physicochemical properties of fish oil microcapsules prepared by jet cavitation[J]. Chinese Soc Agric Eng, 2019, 35(15): 312-320.

[32] 赵品贞,陶冠军,刘睿杰,等. 亲水作用色谱串联质谱结合反相色谱串联质谱的油料磷脂轮廓分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 85-91.

[33] 李飞雨,袁兴铃,邹涵,等. 复凝聚法制备鱼油微胶囊工艺研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(2): 46-50.