

预热处理方式对亚麻籽油体乳液稳定性的影响

郑 瑞, 崔楠楠, 周大勇, 刘惠麟

(大连工业大学 食品学院, 海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 国家海洋食品工程技术研究中心,
海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁省海洋食品科学与技术重点实验室,
辽宁 大连 116034)

摘要:旨在为亚麻籽油体乳液在食品领域的开发应用提供参考,以不同预热处理(蒸制、热烘、微波)的亚麻籽为原料,采用水提法得到油体和浆液两相,将油体与浆液按质量比4:6混合,经剪切分散后获得亚麻籽油体乳液,观测了油体乳液的外观、微观结构、粒径、水分分布、贮藏稳定性、环境稳定性(pH、盐离子浓度、温度稳定性)及氧化稳定性,以探究预热处理方式对亚麻籽油体乳液稳定性的影响。结果表明:未预热处理组油体乳液和微波预热处理组油体乳液的外观均呈乳白色,而蒸制和热烘预热处理组油体乳液的外观均呈乳黄色;与未预热处理组相比,预热处理组油体乳液的平均粒径增大,水分子流动性增强,贮藏稳定性降低,其中微波预热处理组油体乳液的变化相对较小;亚麻籽油体乳液的温度稳定性较好,但在pH为4的酸性环境和NaCl浓度大于100 mmol/L的条件下油体乳液的稳定性被破坏,预热处理降低了亚麻籽油体乳液的环境稳定性,其中微波预热处理影响最小;与其他2种预热处理和未预热处理相比,微波预热处理降低了亚麻籽油体乳液的氧化程度,提高了油体乳液的氧化稳定性。综上,微波是适合亚麻籽的预热处理方式,对油体乳液稳定性的影响最小。

关键词:预热处理;油体乳液;理化稳定性;氧化稳定性

中图分类号:TS225.1;TS201.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2025)06-0087-07

Effect of preheating treatments on the stability of flaxseed oil body emulsion

ZHENG Rui, CUI Nannan, ZHOU Dayong, LIU Huilin

(SKL of Marine Food Processing & Safety Control, National Engineering Research Center of Seafood,
Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Liaoning Province Key Laboratory for
Marine Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Dalian
Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning, China)

Abstract: In order to provide reference for the development and application of flaxseed oil body emulsion in food field, two phases of oil body and slurry were obtained by water extraction from flaxseed with different preheating treatment (steaming, roasting, microwave). The oil body and slurry were mixed in a mass ratio of 4:6, and then subjected to shear to obtain the flaxseed oil body emulsion. The appearance, microstructure, particle size, water distribution, storage stability, environmental stability (pH, salt ion concentration, temperature stability) and oxidation stability of the oil body emulsion were measured to explore the influences of preheating treatments on the stability of the flaxseed oil body emulsion were analyzed. The results showed that the appearance of non-preheated flaxseed oil body emulsion and microwave preheated flaxseed oil body emulsion were milky white, while the appearance of steaming

preheated flaxseed oil body emulsion and roasting preheated flaxseed oil body emulsion were milky yellow. Compared with the non-preheated treatment group, the average particle size of the oil body emulsion in the preheated treatment

收稿日期:2024-05-13;修回日期:2025-03-16

基金项目:大连市科技创新基金计划(2022JJ11CG008)

作者简介:郑 瑞(1998),女,硕士研究生,研究方向为亚麻籽的开发及综合利用(E-mail)misszhengrui@163.com。

通信作者:刘惠麟,讲师,博士(E-mail)ireneliuhl@163.com。

groups increased, water molecular fluidity enhanced, and storage stability decreased, with the microwave preheating treatment group showing relatively minor changes. The temperature stability of flaxseed oil body emulsion was good, but the stability was destroyed under acidic environment with pH 4 and at NaCl concentration greater than 100 mmol/L. Preheating treatment reduced the environmental stability of flaxseed oil body emulsion, and microwave preheating treatment had the least effect. Compared with other preheating treatment and non-preheating treatment, microwave preheating treatment reduced the oxidation degree of flaxseed oil body emulsion and improved its oxidation stability. In conclusion, microwave is a suitable preheating treatment for flaxseed, which has the least influence on the stability of oil body emulsion.

Key words: preheating treatment; oil body emulsion; physicochemical stability; oxidation stability

亚麻是世界上最重要的油料经济作物之一,其籽粒含油量高达 37.0% ~ 46.0%^[1]。亚麻籽油富含 α -亚麻酸,被誉为“来自高原的深海鱼油”^[2]。除 ω -3 多不饱和脂肪酸(ω -3 PUFA)外,亚麻籽还含有木酚素、优质蛋白和膳食纤维等功能性成分^[3],有助于改善人体健康^[4]。因此,近年来亚麻籽在植物蛋白饮料、功能食品中的应用前景广受关注。然而,生亚麻籽中含有毒性物质生氰糖苷,其在人体内会水解生成氢氰酸(HCN),导致细胞缺氧型中毒^[5]。亚麻籽中生氰糖苷含量因亚麻籽品种、产地和环境等因素影响而有较大差异,在食品加工过程中可能存在一定的安全隐患。为确保食品安全,通常在亚麻籽加工前进行脱毒处理,常见的脱毒方式有化学脱毒、酶脱毒以及热脱毒。在食品工业中,常用煮沸、蒸制、热烘、微波等预热处理方式进行脱毒。

研究表明,油料中的油脂以油体的形式储存在种子中,油体是由蛋白质、磷脂和三酰基甘油酯(TAG)构成的微球形亚细胞器,其疏水核心部分主要由三酰基甘油酯构成,外围由单层磷脂和镶嵌其上的油体结合蛋白构成的膜结构所包裹^[6]。目前,油体主要以乳液的形式应用于食品领域。油体乳液是将提取的油体分散在水相体系中形成的水包油型乳液。与以蛋白质、油相及水相制成的水包油型乳液相比,油体乳液具有营养丰富、分散性及稳定性好等优势,且油体通常采用水提法制备,在油体乳液制备过程中无需使用有机试剂,具有绿色无污染的特点,因而其能够直接在食品中应用。

稳定性是影响油体乳液应用的重要因素,目前相关研究主要报道了米糠、大豆等油体乳液的稳定性^[7-8],而鲜见亚麻籽油体乳液稳定性的报道,且亚麻籽不同预热处理方式对亚麻籽油体乳液稳定性的影响尚未知晓。鉴于此,本研究采用蒸制、热烘、微波 3 种预热处理方式对亚麻籽进行脱毒并制备油体

乳液,探究预热处理方式对亚麻籽油体乳液微观结构、粒径、水分分布、贮藏稳定性、环境稳定性(pH、盐离子浓度、温度稳定性)及氧化稳定性的影响,以期对亚麻籽油体乳液在植物乳等食品领域的开发应用提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

去皮亚麻籽,由青岛德辉海洋生物技术有限公司提供,于实验室 4℃冷库中保存备用。氯仿、甲醇等试剂均为分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

Zetasizer 3000HSA 激光粒度仪,英国 Malvern 仪器公司;CF16RN 型高速冷冻离心机,日本日立集团;Ti-S 荧光倒置显微镜,日本 Nikon 公司;MesoQMR23-060H 核磁共振成像分析仪,上海纽迈电子科技有限公司;Infinite200 NANO 型酶标定量测定仪,美国 Tecan 公司;MICCRA D-4 高速分散机,广州迈卡徕克工业技术有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 亚麻籽预热处理

蒸制:取 20 g 亚麻籽于蒸锅中,在 100℃加热 10 min,然后取出自然冷却。

热烘:取 20 g 亚麻籽于烘箱中,在 120℃加热 20 min,然后取出自然冷却。

微波:取 20 g 亚麻籽于微波炉中,在 560 W 加热 3 min,然后取出自然冷却。

1.2.2 亚麻籽油体乳液的制备

按照 Fabre 等^[9]的方法,以亚麻籽为原料,采用水提法得到亚麻籽油体及提油体后剩余的浆液。将油体与浆液按质量比 4:6 混合,使总体积保持为 5 mL,使用高速分散机在 10 000 r/min 下剪切 3 min,得到亚麻籽油体乳液。

1.2.3 亚麻籽油体乳液理化特性分析

1.2.3.1 形态观测

取少量油体乳液样品制片,采用倒置显微镜($20\times$)观察油体乳液的形态。

1.2.3.2 粒径测定

按照 Zhu 等^[10]的方法,使用激光粒度仪测定油体乳液的平均直径,所有测量均在 0.5 mg/mL 的恒定质量浓度下进行。

1.2.3.3 水分分布测定

使用核磁共振成像分析仪获得油体乳液的横向弛豫曲线(τ_2)以分析其水分分布情况。测定参数:采用 Carr – Purcell – Meiom – Gill (CPMG) 序列, 90° 脉冲($27\text{ }\mu\text{s}$)和 180° 脉冲($54\text{ }\mu\text{s}$), π 值 $1\text{ }000\text{ ms}$, 回波数 $18\text{ }000$, 扫描次数 8 。

1.2.3.4 贮藏稳定性分析

将亚麻籽油体乳液装入带刻度的透明样品瓶中,于室温下贮藏 28 d ,在不同时间点(0 、 1 、 7 、 14 、 28 d)观察油体乳液析出水相的高度(H_1)以及油体乳液的总高度(H_0),按式(1)计算乳析指数(Y)。

$$Y = H_1/H_0 \times 100\% \quad (1)$$

1.2.3.5 环境稳定性分析

pH 稳定性:用 HCl 和 NaOH 溶液将亚麻籽油体乳液调整至不同的 pH(2 、 4 、 6 、 8 、 10)后,观察分析其外观、粒径和形态。

盐离子浓度稳定性:用 NaCl 溶液将亚麻籽油体乳液调整至不同的盐离子浓度(0 、 50 、 100 、 150 、 200 mmol/L)后,观察分析其外观、粒径和形态。

温度稳定性:将亚麻籽油体乳液分别在 4 、 25 、 37 、 65 、 90°C 的环境中静置 1 h ,然后冷却至室温,观察分析其外观、粒径和形态。

1.2.3.6 氧化稳定性分析

将亚麻籽油体乳液在 50°C 条件下贮藏 8 d ,定期取样检测其过氧化值(POV)和硫代巴比妥酸值(TBARS)。

POV 的测定:参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中的指示剂滴定法测定。

TBARS 的测定:采用 John 等^[11]的方法,稍作修改。将 0.1 g 样品与 1 mL 氯仿 – 乙醇(体积比 $1:1$)溶液混合,加入 2.5 mL 硫代巴比妥酸(TBA)溶剂,充分混匀后于沸水浴中加热 10 min ,冷却至室温,于 $2\text{ }500\text{ r/min}$ 离心 10 min ,吸取部分上清液于 96 孔板中,使用酶标仪于 532 nm 下测定吸光度。根据丙二醛标准曲线计算样品的 TBARS。

1.2.4 数据处理

所有试验均重复进行 3 次,采用 Microsoft Excel 2016 软件对试验数据进行整理,采用 Origin 9.1 软件绘图。采用 SPSS 24.0 软件的 ANOVA 法对试验数据差异性进行分析。

2 结果与分析

2.1 预热处理对亚麻籽油体乳液稳定性的影响

试验发现,未预热处理亚麻籽油体乳液和微波预热处理亚麻籽油体乳液的外观均呈乳白色,而蒸制和热烘预热处理亚麻籽油体乳液的外观均呈乳黄色。图 1 为不同预热处理亚麻籽油体乳液的倒置显微镜图像。

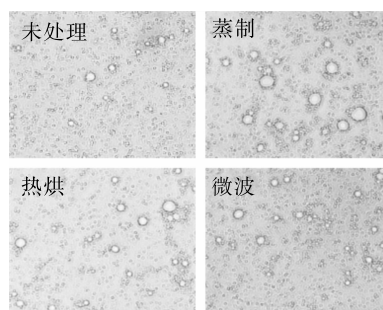


图 1 不同预热处理亚麻籽油体乳液的倒置显微镜图像
Fig.1 Inverted microscope image of flaxseed oil body emulsions under different preheating treatments

由图 1 可知:未预热处理组油体乳液具有较好的分散性;微波预热处理组油体乳液油滴与油滴之间的间距较小,分布较均匀;蒸制及热烘预热处理组油体乳液油滴之间发生聚合。这可能是加热方式及加热时间不同引起的,微波加热的特点是热传递过程更迅速,可短时间内完成处理,因而其油体乳液的油水界面结构相对稳定,液滴之间的抗团聚能力较强^[12],而蒸制及热烘预热处理可能因加热时间较长和热传递较慢使油体乳液易发生聚集而失稳。综上,微波预热处理组油体乳液结构更稳定。

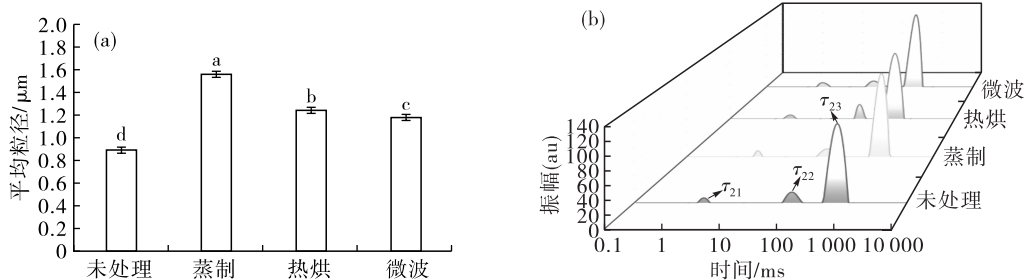
2.2 预热处理对亚麻籽油体乳液粒径和水分分布的影响

粒径大小和水分分布是评估油体乳液稳定性的关键指标,较小的颗粒尺寸和较短的 τ_{22} 和 τ_{23} 弛豫时间有利于油体乳液稳定性的提高。预热处理对亚麻籽油体乳液粒径和水分分布的影响如图 2 所示。

由图 2a 可知,未预热处理组油体乳液的平均粒径为 $0.87\text{ }\mu\text{m}$,预热处理组油体乳液的平均粒径均较未预热处理组大,且微波预热处理组油体乳液的平均粒径最小,蒸制预热处理组油体乳液的平均粒径最大,这与图 1 的结果一致。图 2b 中 τ_{22} 峰为油体乳液中的油质子和不易移动水, τ_{23} 峰为自由水,

τ_{21} 峰为结合水。由图 2b 可知,与未预热处理组相比,预热处理组油体乳液的 τ_{22} 和 τ_{23} 向更长的弛豫时间移动,其中,微波预热处理组移动最慢,蒸制预热处理组移动最快。这表明预热处理后油体乳液中

自由水的自由度升高,水分子在乳液中的流动性增大,乳液的稳定性降低。综上,微波预热处理对油体乳液粒径及水分分布的影响最小,因而具有更好的稳定性。



注:不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

图 2 预热处理对亚麻籽油体乳液粒径及水分分布的影响

Fig. 2 Influence of preheating treatments on particle size and water distribution of flaxseed oil body emulsion

2.3 预热处理对亚麻籽油体乳液贮藏稳定性的影响

预热处理对亚麻籽油体乳液贮藏稳定性的影响如图 3 所示。

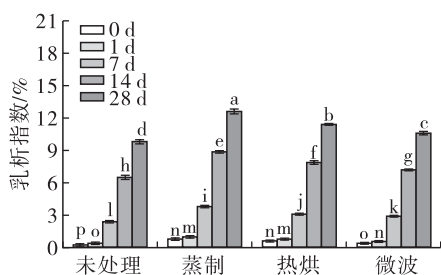


图 3 预热处理对亚麻籽油体乳液贮藏稳定性的影响

Fig. 3 Effect of preheating treatments on storage stability of flaxseed oil body emulsion

由图 3 可知,随着贮藏时间的延长,所有样品的乳析指数不断增大,14 d 时样品的乳析指数出现大幅增长。与未预热处理组相比,3 种预热处理组亚麻籽油乳液乳析指数的增幅较大,其中微波预热处理组增幅最小,蒸制预热处理组增幅最大。这可能是由于原料经预热处理后油体乳液中油滴尺寸增大,发生聚集,破坏了油水界面膜的稳定性,使油体乳液出现相分离现象,从而降低了油体乳液的贮藏稳定性。与其他 2 种预热处理方式相比,微波预热处理组油体乳液乳析指数的增幅最小,因而其具有更好的贮藏稳定性。

2.4 预热处理对亚麻籽油体乳液环境稳定性的影响

2.4.1 对 pH 稳定性的影响

油体乳液在食品加工的不同环节可能会遇到不同的酸碱环境,影响其稳定性^[13]。探究了预热处理对不同 pH 条件下亚麻籽油体乳液稳定性的影响,结果如图 4 所示。

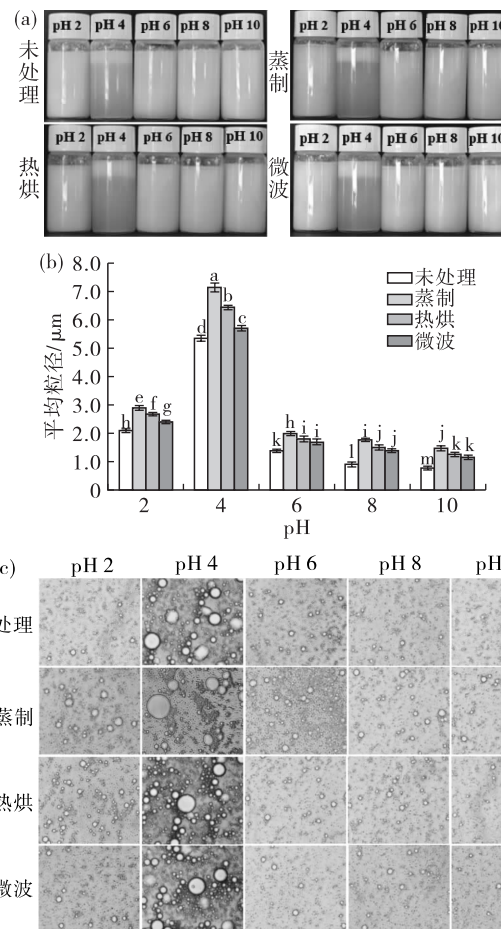


图 4 预热处理对不同 pH 条件下亚麻籽油体乳液外观、粒径和形态的影响

Fig. 4 Effect of preheating treatments on the appearance, particle size and morphology of flaxseed oil body emulsion under different pH conditions

由图 4 可知,所有样品在 pH 4 时发生乳析现象,粒径显著增大,液滴之间发生聚集。在 pH 2、6、8、10 时,所有样品均没有出现明显的乳析现象。与未预热

处理组相比,在相同 pH 下预热处理组油体乳液的外观(色泽及乳析程度)无明显变化,但平均粒径增大,其中微波预热处理组平均粒径增幅最小,蒸制预热处理组平均粒径增幅最大。与未预热处理组相比,预热处理组油体乳液在不同 pH 条件下发生不同程度的聚集,其中微波预热处理组油体乳液聚集程度不明显,蒸制预热处理组油体乳液聚集程度最大。综上,亚麻籽油体乳液蛋白质的等电点为 pH 4 左右。当 pH 在等电点附近时,油滴之间的疏水相互作用和范德华力大于油滴总电荷所产生的排斥力,从而导致油体乳液迅速失稳^[14]。因此,pH 为 4 的酸性环境不适用于亚麻籽油体乳液的食品加工。综上,与未预热处理组相比,预热处理组油体乳液在不同 pH 条件下的稳定性降低。

2.4.2 对离子稳定性的影响

盐离子浓度会影响乳液的稳定性^[15],进而影响其在食品中的实际应用。探究了预热处理对不同盐离子浓度下亚麻籽油体乳液稳定性的影响,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,所有样品在盐离子浓度 50 ~ 200 mmol/L 条件下均发生乳析现象,且盐离子浓度越高,乳析现象越明显(盐离子浓度为 50 mmol/L 时发生轻微乳析现象,盐离子浓度超过 100 mmol/L 时乳析现象严重),平均粒径增加越多。与未预热处理组相比,在相同盐离子浓度下预热处理组油体乳液的外观(色泽和乳析程度)没有明显差异,但平均粒径均增大,其中微波预热处理组油体乳液平均粒径增幅最小,蒸制预热处理组油体乳液平均粒径增幅最大。Hou 等^[16]报道随着 NaCl 浓度的增加,大豆、花生和葵花籽油体乳液的粒径增加;Zhou 等^[17]报道花生油体乳液在较低的盐离子浓度下具有较强的稳定性,随着盐离子浓度增大,平均粒径增大,以上研究结果均与本研究结果一致。本研究中,随着盐离子浓度升高,所有样品的聚集程度逐渐增大。与未预热处理组相比,微波预热处理组油体乳液聚集程度增加不显著,而蒸制预热处理组油体乳液聚集程度增加最大。亚麻籽油体乳液对盐离子较敏感,这可能是因为高浓度的盐离子能够屏蔽液滴之间的静电排斥作用,导致油体乳液中的液滴发生聚集^[18],从而降低了油体乳液的稳定性,且盐离子浓度越大,其屏蔽液滴间的静电排斥作用越强,油体乳液稳定性下降越显著^[19]。综上,与未预热处理组相比,预热处理组油体乳液在不同盐离子浓度下的稳定性降低,其中微波预热处理组降低幅度较小。

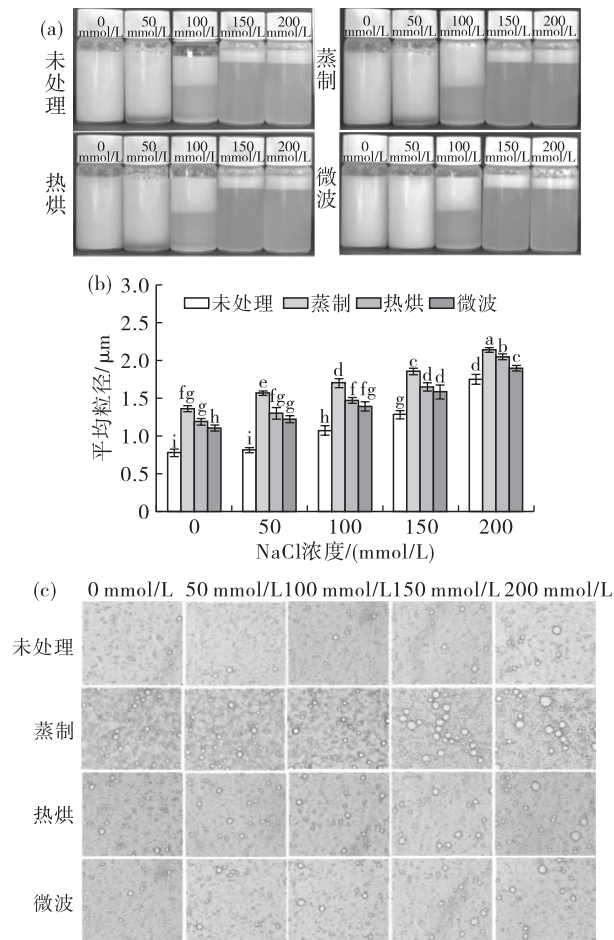


图 5 预热处理对不同盐离子浓度条件下亚麻籽油体乳液外观、粒径和形态的影响

Fig. 5 Effect of preheating treatments on the appearance, particle size and morphology of flaxseed oil body emulsion under different salt ion concentrations

2.4.3 对温度稳定性的影响

预热处理对不同温度条件下亚麻籽油体乳液稳定性的影响如图 6 所示。

由图 6 可知,所有样品经不同温度条件处理后均没有出现乳析现象。与未预热处理组相比,相同温度下预热处理组油体乳液的平均粒径均增大,其中微波预热处理组增幅最小,蒸制预热处理组增幅最大。所有样品在不同温度条件下结构仍较完整,未发生聚集现象,说明冷、热处理并未使亚麻籽油体乳液中的蛋白质变性,其仍与油体紧密结合,维持了油体乳液的稳定性。Iwanaga 等^[20]报道热处理(30 ~ 90 ℃)并没有加剧表面疏水作用从而引起油体乳液失稳;Chen 等^[8]探究了大豆油体乳液的温度稳定性,发现大豆油体乳液在热处理后保持稳定,以上研究结果均与本研究结果一致。综上,亚麻籽油体乳液具有良好的温度稳定性。与未预热处理组相比,预热处理组油体乳液在不同温度下的稳定性降

低,其中微波预热处理组降低幅度最小。

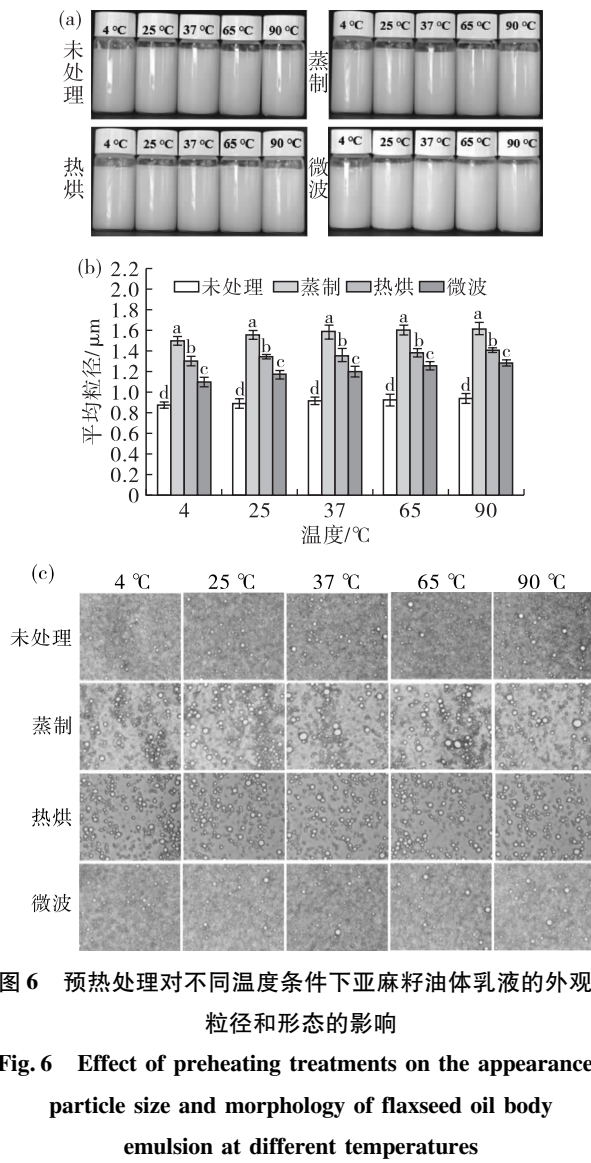


图6 预热处理对不同温度条件下亚麻籽油体乳液的外观、粒径和形态的影响

Fig.6 Effect of preheating treatments on the appearance, particle size and morphology of flaxseed oil body emulsion at different temperatures

2.5 预热处理对亚麻籽油体乳液氧化稳定性的影响

亚麻籽油体乳液富含 PUFA,在食品加工过程中易发生氧化劣变,降低产品品质^[21-22]。预热处理对亚麻籽油体乳液氧化稳定性的影响如图 7 所示。

由图 7 可知,亚麻籽油体乳液的初始 POV 较低,这可能是与油体天然的稳定结构以及其内部存在维生素 E 等抗氧化成分有关^[23]。随着加速贮藏时间的延长,所有样品的 POV 及 TBARS 均增大。与未预热处理组相比,贮藏过程中微波预热处理组油体乳液的 POV 与 TBARS 总体上均显著降低,说明微波预处理组油体乳液脂质氧化程度最小,而蒸制及热烘预热处理组油体乳液的 POV 与 TBARS 总体上均显著升高,说明这 2 组油体乳液的脂质氧化程度较高。综上,微波预热处理降低了亚麻籽油体乳液的脂质氧化程度,提高了油体乳液的氧化稳定性。

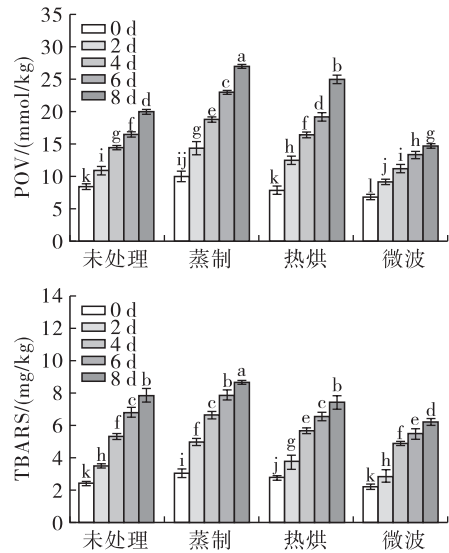


图7 预热处理对亚麻籽油体乳液氧化稳定性的影响
Fig.7 Effect of preheating treatments on oxidation stability of flaxseed oil body emulsion

3 结 论

蒸制、热烘、微波 3 种亚麻籽预热处理会使亚麻籽油体乳液发生不同程度的聚集,增大其平均粒径及水分的自由度,其中微波预热处理的影响较小。3 种预热处理会降低亚麻籽油体乳液的贮藏稳定性和环境稳定性,其中微波预热处理的影响最小。另外,微波预热处理提高了亚麻籽油体乳液的氧化稳定性,而热烘和蒸制预热处理则降低了亚麻麻籽油体乳液的氧化稳定性。因此,微波是适合亚麻籽的预热处理方式,对油体乳液的稳定性影响最小。

参考文献:

[1] MUEED A, SHIBLI S, JAHANGIR M, et al. A comprehensive review of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.): Health – affecting compounds, mechanism of toxicity, detoxification, anticancer and potential risk[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 20, 63(32): 11081 – 11104.

[2] YU X, NIE C, ZHAO P, et al. Influences of microwave exposure to flaxseed on the physicochemical stability of oil bodies: Implication of interface remodeling[J/OL]. Food Chem, 20, 368: 130802 [2024 – 05 – 13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130802>.

[3] OOMAH B D. Flaxseed as a functional food source[J]. J Sci Food Agric, 2001, 81(9): 889 – 894.

[4] 黄雪艳,杨国龙,王雅娟,等. 乳化剂类型对水包油型亚麻籽油乳液物化稳定性的影响[J]. 中国油脂,2025,50(2):34 – 41.

[5] YAMASHITA T, SANO T, HASHIMOTO T, et al. Development of a method to remove cyanogen glycosides from flaxseed meal[J]. Int J Food Sci Technol, 2007, 42(1): 70 – 75.

- [6] HE F, HUANG F, WILSON K A, et al. Protein storage vacuole acidification as a control of storage protein mobilization in soybeans[J]. J Exp Bot, 2007, 58(5): 1059 – 1070.
- [7] 吕雯雯,高倩茹,郝佳,等. 米糠油体的酶法提取工艺优化[J]. 中国油脂,2022,47(8):25 – 30,56.
- [8] CHEN B C, MCCLEMENTS D J, GRAY D A, et al. Physical and oxidative stability of pre – emulsified oil bodies extracted from soybeans[J]. Food Chem,2012,132(3):1514 – 1520.
- [9] FABRE J F, LACROUX E, CERNY M, et al. Barriers to the release of flaxseed oil bodies and ways of overcoming them[J/OL]. Oilseeds Fats Crops Lipids, 2015, 22(6): D607 [2024 – 05 – 13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125401>.
- [10] ZHU Y, MCCLEMENTS D J, ZHOU W, et al. Influence of ionic strength and thermal pretreatment on the freeze – thaw stability of Pickering emulsion gels[J/OL]. Food Chem, 2020, 303: 125401 [2024 – 05 – 13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125401>.
- [11] JOHN L, CORNFORTH D, CARPENTER C E, et al. Color and thiobarbituric acid values of cooked top sirloin steaks packaged in modified atmospheres of 80% oxygen, or 0.4% carbon monoxide, or vacuum[J]. Meat Sci, 2005, 69(3): 441 – 449.
- [12] CHEN Q H, ZHENG J, XU Y T, et al. Surface modification improves fabrication of Pickering high internal phase emulsions stabilized by cellulose nanocrystals[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 75: 125 – 130.
- [13] MCCLEMENTS D J. Protein – stabilized emulsions[J]. Curr Opin Colloid Interface Sci, 2004, 9(5): 305 – 313.
- [14] WHITE D A, FISK I D, MITCHELL J R, et al. Sunflower – seed oil body emulsions: Rheology and stability assessment of a natural emulsion[J]. Food Hydrocolloid, 2008, 22(7): 1224 – 1232.
- [15] MCCLEMENTS D J. Food emulsions: Principles, practices, and techniques[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [16] HOU J, FENG X, JIANG M, et al. Effect of NaCl on oxidative stability and protein properties of oil bodies from different oil crops[J/OL]. LWT – Food Sci Technol, 2019, 113: 108263 [2024 – 05 – 13]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108263>.
- [17] 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.
- [18] GUZEY D, MCCLEMENTS D J. Impact of electrostatic interactions on formation and stability of emulsions containing oil droplets coated by *beta* – lactoglobulin – pectin complexes[J]. J Agric Food Chem, 2007, 55(2): 475 – 485.
- [19] DEMETRIADES K, COUPLAND J N, MCCLEMENTS D J. Physical properties of whey protein stabilized emulsions as related to pH and NaCl[J]. J Food Sci, 1997, 62(2): 342 – 347.
- [20] IWANAGA D, GRAY D A, FISK I D, et al. Extraction and characterization of oil bodies from soy beans: A natural source of pre – emulsified soybean oil[J]. J Agric Food Chem, 2007, 55(21): 8711 – 8716.
- [21] ZHAO G, ETHELTON T D, MARTIN K R, et al. Dietary α – linolenic acid inhibits proinflammatory cytokine production by peripheral blood mononuclear cells in hypercholesterolemic subjects[J]. Am J Clin Nutr, 2007, 85(2): 385 – 391.
- [22] TONON R V, GROSSO C R F, HUBINGER M D. Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying[J]. Food Res Int, 2011, 44(1): 282 – 289.
- [23] FISK I D, WHITE D A, LAD M, et al. Oxidative stability of sunflower oil bodies[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2008, 110(10): 962 – 968.