



陈春艳,孙好嵩,李升,等.微波预处理对黑芝麻乳稳定性的影响[J].轻工学报,2024,39(1):22-29.
CHEN C Y,SUN H H,LI S,et al. Effect of microwave pretreatment on stability of black sesame milk[J]. Journal of Light Industry,2024,39(1):22-29. DOI:10.12187/2024.01.003

微波预处理对黑芝麻乳稳定性的影响

陈春艳¹,孙好嵩²,李升²,禹晓²,李冰心¹,钱彩虹¹,拓妮妮¹

1. 湖北生物科技职业学院,湖北 武汉 430070;

2. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001

摘要:以黑芝麻为研究对象,探究了微波预处理时间(0~12 min)对黑芝麻物性特征和全籽乳稳定性的影响。结果表明:微波预处理会诱导黑芝麻体积膨胀,外种皮呈凹凸不平状,其中微波预处理12 min时,外种皮发生破裂;微波预处理显著降低了黑芝麻的硬度、弹性、胶黏性和回弹性($P<0.05$),其中微波预处理9 min时,均达到最小值;随着微波预处理时间的延长,黑芝麻乳的平均粒径从1.21 μm 增加至1.52 μm ($P<0.05$),Zeta-电位从-26.90 mV降低至-31.91 mV($P<0.05$),并伴随着物理稳定性的明显提升,以微波预处理9 min时效果最佳,表现为Turbiscan稳定性指数(TSI)曲线斜率明显降低,以及背散射(ΔBS)曲线底部和顶部的轻微变化;微波预处理使黑芝麻乳静态体系的弹性行为增强、流动性减弱,表观黏度逐渐降低,动态黏弹性增加,其中微波预处理9 min时最为明显;微波预处理使黑芝麻乳中脂滴数量和粒径明显增加,连续相中贮藏蛋白构成的多孔片层结构减少,提示优先参与乳体系中脂滴重构。因此,适宜时长微波预处理能够改善黑芝麻物性特征和全籽乳稳定性,拓宽黑芝麻的应用场景。

关键词:微波预处理;黑芝麻;物性特征;物理稳定性;乳液体系重构

中图分类号:TS222⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2024)01-0022-08

0 引言

芝麻(*Sesamum indicum* L.)是我国传统的油料作物之一,享有“油料皇后”的美称^[1],目前主要种植于我国河南、湖北、江西、河北、安徽等地,种植面积极约占全国芝麻种植总面积的1/2,年产量约占全国总年产量的3/4^[2]。根据外种皮颜色的不同,芝麻可分为白芝麻、黑芝麻及其他杂色芝麻等。其中,种植面积最大也最为常见的是白芝麻和黑芝麻^[3]。研究^[4]发现,黑芝麻中油脂和蛋白质含量稍低于白

芝麻,但各种微量元素含量均较高。黑芝麻除了富含脂类和蛋白质外,还含有多种生物活性成分,如芝麻酚、芝麻素、芝麻酚林、芝麻醇等,兼具营养、预防疾病等健康功效^[1,5]。

热处理是芝麻等油籽加工的重要操作单元,对促进营养素释放、生物活性成分增效转化、增强产品风味、抑制脂肪酶活性等具有重要作用^[6]。其中,微波加热是一种有效的热预处理技术,不仅可提高芝麻中植物甾醇、生育酚的含量,还可提高芝麻的抗氧化活性,延长芝麻制品的保质期^[7]。

收稿日期:2023-07-24;修回日期:2023-10-04;出版日期:2024-02-15

基金项目:河南省科技攻关项目(232102110139)

作者简介:陈春艳(1980—),女,湖北省荆门市人,湖北生物科技职业学院讲师,主要研究方向为食品营养与安全。E-mail:10685116@qq.com

通信作者:禹晓(1986—),女,河南省驻马店市人,郑州轻工业大学副教授,博士,主要研究方向为油脂化学与营养。E-mail:yuxiao@zzuli.edu.cn

Y. Huang 等^[8]研究发现,与烘烤、膨化预处理相比,微波预处理能最大限度地促进芝麻中芝麻素转化为芝麻酚,提升芝麻相关产品的抗氧化活性。H. S. El-Beltagi 等^[9]研究发现,与砂炒、烘烤等热处理方式相比,经微波预处理后的芝麻油中总酚和黄酮含量最高,抗氧化活性最强。目前,黑芝麻多被加工成黑芝麻油或黑芝麻粉、黑芝麻酱、黑芝麻丸剂等全籽化产品,若将黑芝麻制备成全籽乳,将更有利于其营养素和生物活性成分的吸收,并拓宽其摄入途径^[10]。Z. Ahmadlan-Kouchaksaraei 等^[11]研究发现,与未处理组相比,随着烘焙温度逐渐升高至 145 ℃,黑芝麻乳的香气、口感和总体接受度均明显提高,但稳定性和黏度则明显降低。然而,目前国内关于微波预处理对芝麻乳稳定性的相关研究仍鲜有涉及,更多研究聚焦在以熟制芝麻为研究对象,探究适宜均质压力、复合稳定剂调配对全组分芝麻乳稳定性的改善效果^[12-13]。

基于此,本研究拟以黑芝麻为研究对象,探究微波预处理时间对黑芝麻物性特征和全籽乳稳定性的影响规律,重点研究全籽乳的流变行为和微观结构变化,以期为黑芝麻乳基健康食品的研发提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料

生黑芝麻,黑龙江仓天然生态农业有限公司。

1.2 主要仪器与设备

P70D20TL-D4 型微波炉,广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;Scientz-10 N 型真空冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Turbiscan 型多重光散射仪、Rheolaser Master 型光学微流变仪,法国 Formulaction 公司;Zetasizer Nano-ZS90 型激光粒度仪,英国 Malvern Panalytical 公司;Discovery 型旋转流变仪,美国 TA 仪器公司;Regulus 8100 型高分辨率场发射扫描电子显微镜,日本日立公司;Quorum PP3010 T 型冷冻传输装置,英国 Quorum 公司;TMS-PRO 型物性分析仪,美国 FTC 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 黑芝麻微波预处理 称取 93 g 黑芝麻,加

入 7 g 去离子水,将黑芝麻中总水分含量调至 12%~15%,置于 4 ℃ 条件下平衡 12 h;依次取 20 g 黑芝麻于 80 mm 培养皿中均匀铺平,置于 560 W 的微波功率下,分别处理 0 min、6 min、9 min 和 12 min 后,记为 MV-0 min、MV-6 min、MV-9 min 和 MV-12 min,将样品快速冷却至室温,备用。

1.3.2 黑芝麻形态观察 采用体视显微镜观察微波处理前后黑芝麻的外观形态,在 1.25 倍数下使用 2 K 高清相机输出照片。采用高分辨率场发射扫描电子显微镜观察黑芝麻的外种皮微观形态,具体步骤为:将黑芝麻用导电胶带固定于金属铜座上,置于真空喷镀仪内进行表面喷金(10 mA,60 s),分别在电压 3 kV、放大 35 倍和 500 倍条件下记录黑芝麻表面的形态特征。

1.3.3 黑芝麻物性特征测定 选取 10 粒黑芝麻,整齐平铺于质构仪探头下方指定区域,借助物性分析仪测定黑芝麻的物性特征。采用全质构分析(TPA)模式,选用圆盘型探头,通过 2 次压缩对黑芝麻进行硬度、弹性、胶黏性和回弹性测定。主要测试条件为:起始力 0.5 N,形变 30%,压缩间隔 10 s,测试速度 60 mm/min^[14]。

1.3.4 黑芝麻乳制备 参考 X. P. Qin 等^[15]的方法,并稍作修改。将微波预处理前后的黑芝麻分别置于 500 mL 烧杯中,按 $m(\text{黑芝麻/g}) : V(\text{去离子水/mL}) = 1 : 8$ 进行混合,置于 4 ℃ 条件下浸泡 8 h 后,在真空模式下,使用破壁机于 38 000 r/min 条件下剪切分散 2 min,循环 2 次,经 200 目尼龙滤布过滤后,获得黑芝麻乳,备用。

1.3.5 黑芝麻乳平均粒径和 Zeta-电位测定 将各组黑芝麻乳分别用去离子水稀释 100 倍,混匀分散后,取 1 mL 稀释样品置于样品池中,使用激光粒度仪在 25 ℃ 条件下用激光散射法测定平均粒径,用电泳光散射法测定 Zeta-电位。其中,黑芝麻乳的折射率为 1.474,水的折射率为 1.330^[16]。

1.3.6 黑芝麻乳物理稳定性测定 取微波预处理前后黑芝麻乳于样品瓶中,平稳放置于多重光散射仪内,测定其物理稳定性^[17]。测定条件为:上样量 18 mL;扫描频率 1 次/25 s;扫描时间 1800 s;测定温度 4 ℃。通过背散射(ΔBS)曲线描述黑芝麻乳的失

稳行为,根据将近红外背散射光强度作为高度的函数计算 Turbiscan 稳定性指数(*TSI*)。此外,将微波预处理前后的黑芝麻乳置于 10 mL 比色瓶中,分别记录 4 ℃ 条件下的相分离情况。

1.3.7 黑芝麻乳流变特性测定 参考 X. P. Qin 等^[15]的方法,使用流变仪测定黑芝麻乳的流变特性,测试过程中使用直径为 40 mm 的平行夹具,夹缝间隙设置为 1 mm。在 0.1~10 s⁻¹ 的剪切速率范围内测定黑芝麻乳的表观黏性,在 0.1~10 Hz 范围内测定黑芝麻乳的储能模量(*G'*)和损耗模量(*G''*)。利用光学微流变仪测定样品的微流变特性。测定条件为:上样量 20 mL;扫描频率 1 次/10 min;扫描时间 4 h;测定温度 25 ℃。

1.3.8 黑芝麻乳微观结构表征 参考 X. P. Qin 等^[15]的方法,利用冷冻传输系统和高分辨率场发射扫描电子显微镜观察黑芝麻乳的微观结构。取 2.0 μL 黑芝麻乳于液氮中冷冻,转入冷冻制备腔室,切成截面;在 -80 ℃、1.3×10⁻⁴ Pa 条件下升华 8 min;在 5 mA 条件下镀金 90 s 后,于 3 kV 下使用高分辨率场发射扫描电子显微镜进行观察。

1.4 数据统计分析

结果以(平均值±标准差)表示(*n*=3)。使用

SPSS 21.0 软件进行统计学分析,利用 Tukey 检验对数据进行比较,显著性水平设定为 *P*<0.05,采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 微波预处理对黑芝麻形态的影响

微波预处理对黑芝麻外观形态的影响如图 1 所示。由图 1 可知,随着微波预处理时间的延长,黑芝麻的宽度逐渐变小,而长度和厚度则明显增加,其中以微波预处理 9~12 min 最为明显。这表明微波热预处理会诱导黑芝麻体积膨胀。微波预处理对黑芝麻外种皮微观结构的影响如图 2 所示。由图 2 可知,未经微波预处理的黑芝麻其外种皮表面光滑平整,随着微波预处理时间的延长,外种皮表面逐渐变得凹凸不平,主要表现为外种皮表面细胞结构被破坏。当微波预处理时间为 12 min 时,黑芝麻外种皮出现明显的裂纹。笔者在微波预处理亚麻籽研究中,也观察到了类似现象^[18]。这可能是由于籽粒经水分调质后,渗入胚子叶细胞内部水分的快速气化导致胞内压力骤增,从而使籽粒外种皮发生破裂^[8]。

2.2 微波预处理对黑芝麻物性特征的影响

物性特征可为黑芝麻制品(如芝麻丸、芝麻饼

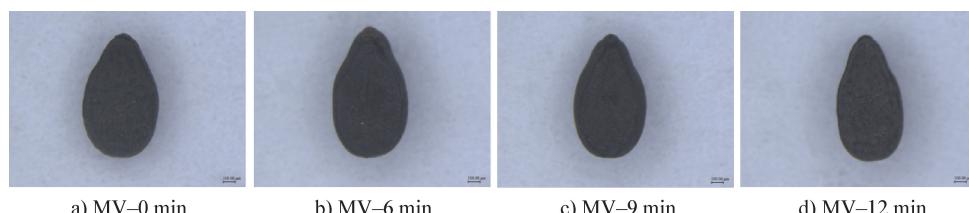


图 1 微波预处理对黑芝麻外观形态的影响

Fig. 1 Effect of microwave treatment on the appearance of black sesame seed

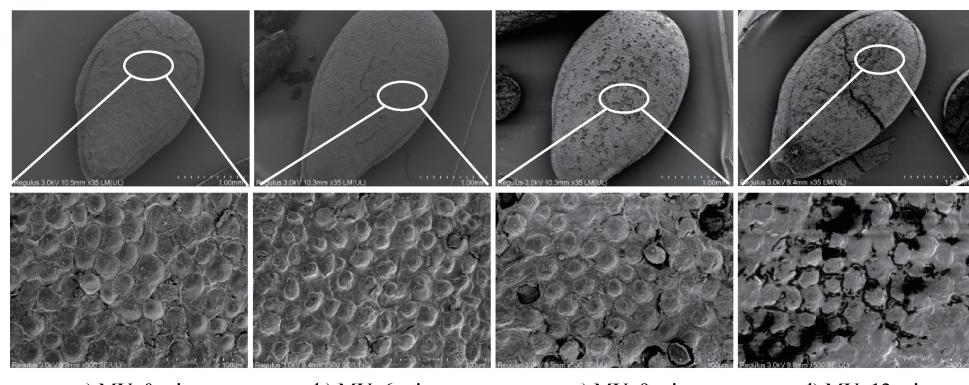


图 2 微波预处理对黑芝麻外种皮微观结构的影响

Fig. 2 Effect of microwave pretreatment on the microstructure of seed coat for black sesame seed

等)食用时的感官力学指标,以及黑芝麻乳的加工适用性提供较好的仪器测定客观性^[19]。微波预处理对黑芝麻物性特征的影响见表 1。由表 1 可知,不同微波预处理时间使得黑芝麻的硬度、弹性、回弹性等物性特征产生了明显差异。其中,未处理组黑芝麻的硬度最大,为 23.19 N。随着微波预处理时间的延长,黑芝麻硬度呈先减小后增大的趋势,但始终低于未处理组。其中,微波预处理 9 min 的黑芝麻硬度最小,较未处理组降低了 76.78% ($P<0.05$)。未处理组黑芝麻的弹性、胶黏性和回弹性分别为 0.31 mm、9.24 N 和 0.36 R,经微波预处理后黑芝麻的弹性、胶黏性和回弹性均有所降低,在微波预处理 9 min 时达到最小值,分别降低了 64.51%、82.35% 和 38.89% ($P<0.05$)。总之,微波预处理可明显降低黑芝麻的硬度、弹性、胶黏性和回弹性,进而提升黑芝麻作为全籽、全籽粉、全籽酱和全籽乳食用时的加工适用性,同时,可在一定程度上改善黑芝麻的咀嚼特性,能适应更广泛年龄段人群的需求。

2.3 微波预处理对黑芝麻乳理化特性和物理稳定性的影响

微波预处理对黑芝麻乳理化特性和物理稳定性的影响如图 3 所示。由图 3a) 可知,未处理组黑芝麻乳的平均粒径为 1.21 μm 。经微波预处理后,黑芝麻乳的平均粒径逐渐增加,在微波预处理 12 min 时达到最大值 1.52 μm ,较未处理组增加了 26.00% ($P<0.05$)。此外,未处理组黑芝麻乳的 Zeta-电位为 -26.90 mV,微波预处理使黑芝麻乳的 Zeta-电位逐渐降低,在微波预处理 12 min 时达到最小值 -31.91 mV,较未处理组降低了 16.20% ($P<0.05$)。事实上,微波预处理能够诱导黑芝麻胚子叶细胞内油脂体的原位塌陷,包括油脂体界面膜的破坏,中性

脂质的溢出、融合,等等;经高速剪切乳化后塌陷的油脂体将发生重组,贮藏蛋白经原位变构后将与油脂体界面膜组分一起参与油脂体重组^[8]。上述黑芝麻乳平均粒径和 Zeta-电位的改变进一步证实了微波预处理能够原位改变黑芝麻中油脂体和贮藏蛋白的组成结构,一方面削弱油体蛋白-膜磷脂复合物对脂滴的包被能力,另一方面因外源性贮藏蛋白在重组油脂体界面的嵌入,导致界面电荷密度改变^[17]。

TSI 是评价乳液物理稳定性的重要参数之一, TSI 曲线斜率越小,则表明乳液物理稳定性越好,反之,则物理稳定性越差^[20]。由图 3b) 可知,未处理组黑芝麻乳的 TSI 曲线斜率最大,表明随着测试时间的延长,该黑芝麻乳稳定性降低。经微波预处理后,黑芝麻乳的 TSI 逐渐减小,基本稳定在 1.0 以下。其中,微波预处理 9 min 的黑芝麻乳 TSI 曲线斜率最小,表明该黑芝麻乳稳定性最好。相较而言,微波预处理 12 min 的黑芝麻乳 TSI 最小,但曲线斜率趋近于线性,表明随着测试时间进一步延长,黑芝麻乳的物理失稳行为将更加明显,但仍明显优于未处理组。因此,微波预处理显著提高了黑芝麻乳的物理稳定性,这可能与乳液体系重构有关。

从图 3c) 可知,未处理组黑芝麻乳的 ΔBS 曲线顶部波动较大,表明脂滴上浮是该黑芝麻乳失稳的主要原因。相较而言,微波预处理 6 min 和 12 min 的黑芝麻乳 ΔBS 曲线底部略有波动,这可能是乳液出现了轻度絮凝现象所致^[17]。微波预处理 9 min 的黑芝麻乳 ΔBS 曲线较为平稳,未表现出明显的脂滴上浮、絮凝物沉降等,这一结论与 TSI 结果基本相符。

由图 3d) 可知,未处理组的黑芝麻乳在 4 °C 避光条件下静置 3 d 就已出现明显的分层,而微波预处理 6 min 和 9 min 的黑芝麻乳均保持较稳定的状态。随着静置时间延长至 10 d,微波预处理 6 ~ 12 min 的黑芝麻乳开始出现分层现象,其中,微波预处理 6 min 和 12 min 的黑芝麻乳出现轻微分层现象。上述结果表明,微波预处理对黑芝麻乳平均粒径和 Zeta-电位的负向调节不足以削弱黑芝麻乳的物理稳定性^[13]。

2.4 微波预处理对黑芝麻乳流变特性的影响

微波预处理对黑芝麻乳流变特性的影响如图 4

表 1 微波预处理对黑芝麻物性特征的影响

Table 1 Effect of microwave pretreatment on the physical properties of black sesame seed

样品	硬度/N	弹性/mm	胶黏性/N	回弹性/R
MV-0 min	23.91±5.34 ^a	0.31±0.01 ^b	9.24±3.71 ^a	0.36±0.10 ^a
MV-6 min	9.77±2.03 ^b	0.18±0.02 ^a	3.30±1.19 ^b	0.28±0.07 ^a
MV-9 min	5.55±2.47 ^c	0.11±0.04 ^c	1.63±1.06 ^c	0.22±0.11 ^b
MV-12 min	10.29±3.87 ^b	0.18±0.02 ^a	3.30±1.61 ^b	0.32±0.06 ^b

注:同列不同小写字母代表在 $P<0.05$ 水平上具有显著性差异。

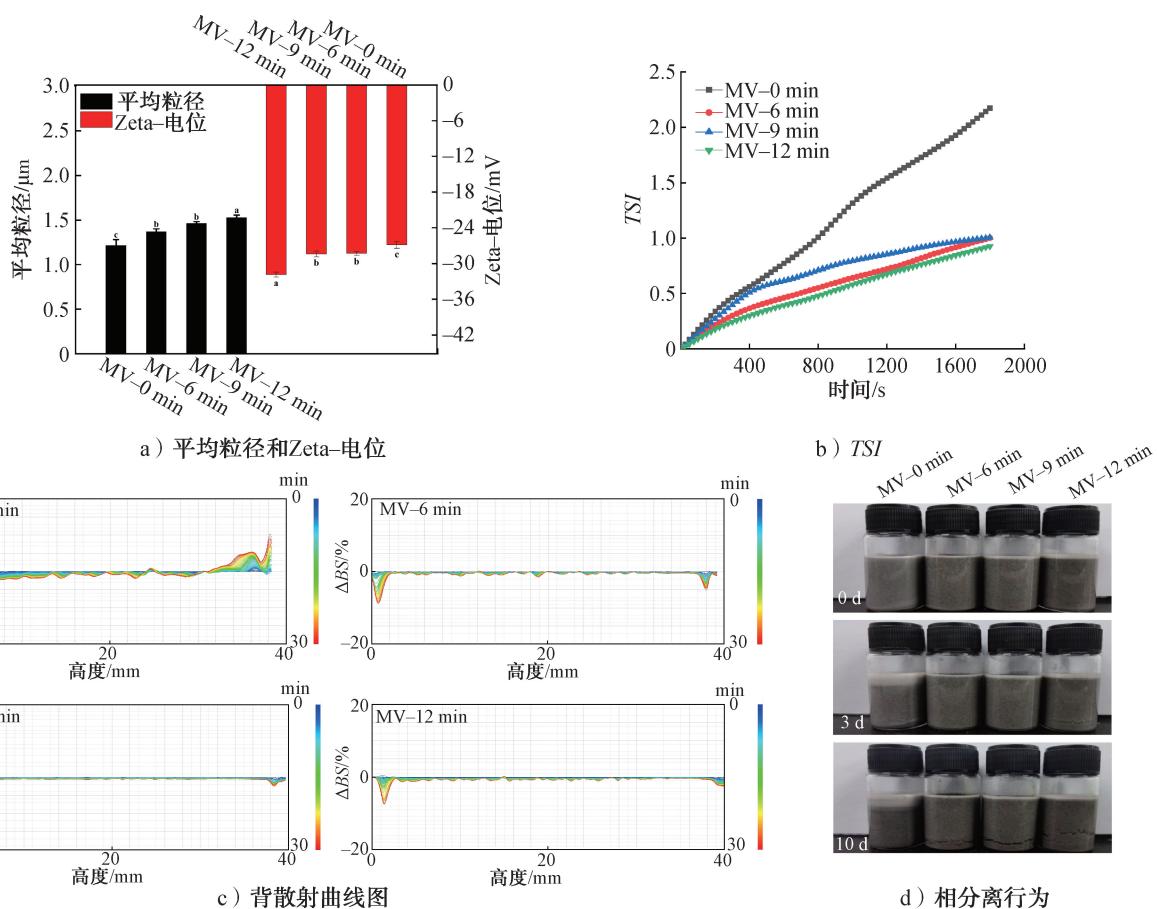


图 3 微波预处理对黑芝麻乳理化特性和物理稳定性的影响

Fig. 3 Effect of microwave pretreatment on the physicochemical properties and physical stability of black sesame milk

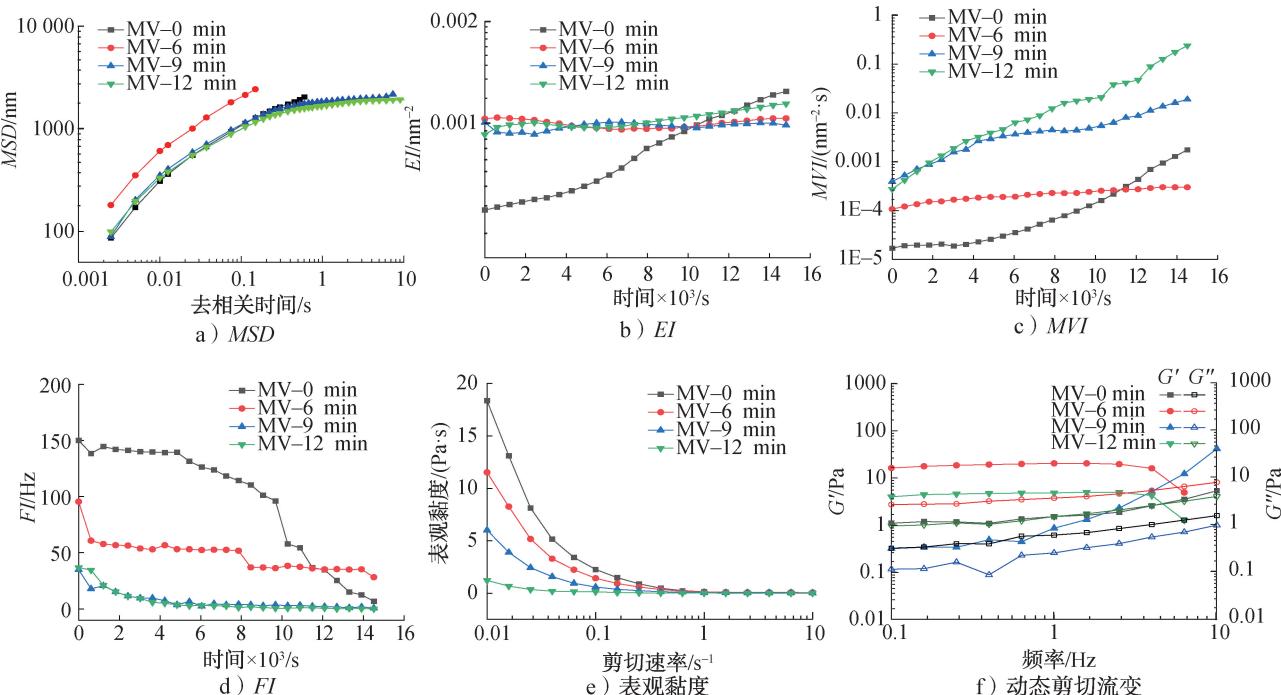


图 4 微波预处理对黑芝麻乳流变特性的影响

Fig. 4 Effect of microwave pretreatment on the rheological properties of black sesame milk

所示。由图 4a) 可知,未处理组的黑芝麻乳和微波预处理 6 min 的黑芝麻乳的原子均方根位移(*MSD*)曲线均为线性曲线,表明这两种黑芝麻乳为牛顿流体。其中,未处理组黑芝麻乳的 *MSD* 曲线分布较疏散,表明体系中胶束粒子的布朗运动范围不固定^[21]。微波预处理 6 min 的黑芝麻乳其 *MSD* 曲线斜率有所降低,表明脂滴在连续相中的位移受到限制,且 *MSD* 曲线越长,则表明黑芝麻乳中胶束粒子运动的去相关时间越长^[15]。相较而言,微波预处理 9 min 和 12 min 黑芝麻乳的 *MSD* 曲线均出现明显平台区,此处曲线斜率几乎为 0,表明这两种黑芝麻乳在弹性平台区运动的平均面积较小,粒子的位移受到限制,表现出更多的弹性特征,为黏弹性流体^[22]。

弹性因子(*EI*)对应于 *MSD* 平台值的倒数。*EI* 的增大表明乳液形成了致密的结构。此外,高 *EI* 现象一般归因于液滴间的阻力,表明乳液中的颗粒可自由运动的空间减小,乳液体系更稳定^[20]。由图 4b) 可知,未处理组黑芝麻乳的初始 *EI* 最小,随着测定时间的延长,*EI* 大幅升高。相较而言,微波预处理 6 min 和 9 min 黑芝麻乳的初始 *EI* 明显升高,且随着测定时间的延长,*EI* 趋于稳定。进一步延长微波预处理时间至 12 min 时,黑芝麻乳的初始 *EI* 无明显变化,但随着测定时间的延长,*EI* 呈逐渐增大的趋势。初始 *EI* 的增大,表明微波预处理使黑芝麻乳体系更稳定,随着测定时间的延长,*EI* 逐渐增大,则表明该黑芝麻乳形成了致密的结构,乳液稳定性进一步提高^[23]。

宏观黏度指数(*MVI*)对应于 *MSD* 平台值线性斜率的倒数,*MVI* 越高,液滴运动速度越慢^[24]。由图 4c) 可知,在整个测定期间,未处理组黑芝麻乳的 *MVI* 呈增加的趋势。经微波预处理 6 min 后,黑芝麻乳的初始 *MVI* 升高,但随着测定时间的延长,*MVI* 基本保持不变。当微波预处理时间延长至 9 min 和 12 min 时,黑芝麻乳的初始 *MVI* 进一步升高,且随着测定时间的延长,*MVI* 大幅升高,表明黑芝麻乳体系的黏度增加,对于脂滴运动的限制进一步增强。

流动因子(*FI*)的变化能反映乳液中微观粒子运动的快慢,高 *FI*(约 10 Hz) 现象表明样品为液态性质,低 *FI*(约 10⁻² Hz) 现象表明样品为固态性质,*FI* 越大,粒子运动越快,流动性越强^[18]。由图 4d) 可知,

未处理组黑芝麻乳的初始 *FI* 为 150 Hz,随着微波预处理时间的延长,黑芝麻乳的初始 *FI* 降低,在微波预处理 9 min 时,初始 *FI* 最低,为 22.41 Hz。进一步延长微波预处理时间至 12 min 时,黑芝麻乳的 *FI* 在测定时间达到 40 min 后下降至 10 Hz 以下,在测定时间达到 60 min 后变为低 *FI*,降至 10⁻² Hz 后基本保持不变。这一结果表明,随着微波预处理时间的延长,黑芝麻乳表现出较高的黏性液体性质,这与 *MVI* 结果一致。

由图 4e) 可知,未处理组黑芝麻乳的初始表观黏度为 18.36 Pa·s,随着剪切速率的增加(0.01~10 s⁻¹),表观黏度均急剧下降,即表现为剪切稀化行为。微波预处理明显降低了黑芝麻乳的初始表观黏度,在微波预处理 12 min 时,表观黏度降低了 93.00% (*P*<0.05),且随着剪切速率的增加,该值逐渐趋近于 0。Z. Ahmadlan-Kouchaksarael 等^[11] 研究发现,经烘烤预处理的黑芝麻乳表观黏度随剪切速率的增加而降低,与本实验结果类似。

由图 4f) 可知,在低频率(0.01~1.0 Hz)范围内,未处理组和经微波预处理的黑芝麻乳的 *G'* 均高于 *G''*,即表现出典型的凝胶样特性。经微波预处理 9 min 时,黑芝麻乳的 *G'* 在 0.01~10 Hz 的频率范围内显著上升,导致 *G'* 和 *G''* 之间的差值增大,此时黑芝麻乳的弹性效应增大,黏性效应减小,具有较好的稳定性。进一步延长微波预处理时间至 12 min 时,黑芝麻乳的 *G''* 增量明显,使得 *G'* 与 *G''* 之间的差值减小,此时黑芝麻乳的黏性效应增大,弹性效应减小,提示其稳定性可能被一定程度地削弱^[25]。

2.5 微波预处理对黑芝麻乳微观结构的影响

微波预处理对黑芝麻乳微观结构的影响如图 5 所示。由图 5 可知,未处理组的黑芝麻乳中油脂体粒径较小,呈球状且界面粗糙,在连续相中分布稀疏且不均匀,并附着在贮藏蛋白多孔片层结构中。这一结果显示,在未处理组的黑芝麻乳体系中,仅有少量贮藏蛋白吸附在天然油脂体界面,对脂滴层层包裹。相较而言,微波预处理 6 min 的黑芝麻乳油脂体粒径明显增大,并发生不规则形变,表面出现褶皱,连续相中多孔片层结构逐渐减少。当微波预处理时间延长至 9 min 和 12 min 时,黑芝麻乳中油脂体粒径进一步变大,界面膜发生严重褶皱变形且致

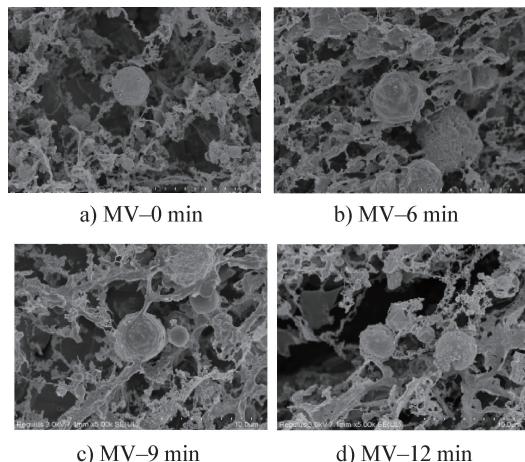


图 5 微波预处理对黑芝麻乳微观结构的影响

Fig. 5 Effect of microwave pretreatment on the microstructure of black sesame milk

密性降低,部分中性脂质以出芽和再乳化形式溢出形成小液滴。上述结果表明,原本存在于连续相中的贮藏蛋白也参与包裹重组脂滴,这可能与微波预处理会诱导油脂体膜组分改变及贮藏蛋白发生分子结构和空间构象改变有关^[17]。

3 结论

本文研究了微波预处理对黑芝麻物性特征和全籽乳液稳定性的影响,得到如下结论:微波预处理可使黑芝麻体积膨胀,显著降低黑芝麻的硬度、弹性、胶黏性和回弹性,且微波预处理 9 min 时这些指标均达到最小值;微波预处理可使黑芝麻乳平均粒径显著增加,Zeta-电位显著降低,但乳液的物理稳定性明显提升,以微波预处理 9 min 时效果最佳;微波预处理 9 min 可使黑芝麻乳中脂滴运动速率减慢,弹性行为增强,流动性降低,表观黏度逐渐降低,动态黏弹性增加;微波预处理诱导了黑芝麻乳体系中脂滴和连续相的结构重构,表现为贮藏蛋白构成的多孔片层结构逐渐减少,与油脂体膜组分共同参与塌陷油脂体的界面重组。因此,适宜时长的微波预处理能够基于油脂体和连续自稳定体系的构建及流变行为的改变来提升黑芝麻乳的稳定性,有望为黑芝麻乳基健康食品研发提供理论和技术参考。

参考文献:

- [1] BHALODIYA D, DHADUK H K L, KUMAR S, et al.

Line×tester analysis for seed yield, protein and oil content and SSR based diversity in sesame (*Sesamum indicum* L.) [J]. Ecological Genetics and Genomics, 2019, 13: 100048.

- [2] AWAN U A, XIA S, MENG L, et al. Isolation, characterization, culturing, and formulation of a new *Beauveria bassiana* fungus against *Diaphorina citritic* [J]. Biological Control, 2021, 158: 104586.
- [3] KERMANI S G, SAEIDI G, SABZALIAN M R, et al. Drought stress influenced sesamin and sesamolin content and polyphenolic components in sesame (*Sesamum indicum* L.) populations with contrasting seed coat colors [J]. Food Chemistry, 2019, 289: 360–368.
- [4] 刘玉兰,陈刘杨,汪学德,等.芝麻品种和制油工艺对芝麻油品质的影响[J].中国油脂,2010,35(2):6-10.
- [5] KANCHARLA K P, ARUMUGAM N. Variation of oil, sesamin, and sesamolin content in the germplasm of the ancient oilseed crop *Sesamum indicum* L[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(5): 475–483.
- [6] HAMA J R. Comparison of fatty acid profile changes between unroasted and roasted brown sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds oil[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(5): 957–967.
- [7] 赵宇航.微波预处理对芝麻籽结构及芝麻油的氧化稳定性、生物活性成分和香气品质的影响[D].郑州:河南工业大学,2023.
- [8] HUANG Y, LIU C S, GE Z F, et al. Influence of different thermal treatment methods on the processing qualities of sesame seeds and cold-pressed oil [J]. Food Chemistry, 2022, 404: 134683.
- [9] EL-BELTAGI H S, MARAEI R W, EL-ANSARY A E, et al. Characterizing the bioactive ingredients in sesame oil affected by multiple roasting methods [J]. Foods, 2022, 11(15): 2261.
- [10] NAZIRI E, KOUPANTSIS T, MANTZOURIDOU F T, et al. Influence of thermal treatment on the stability of vegetable "milk" obtained by ultrafiltration of aqueous oil body extracts from various sources [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(7): 1600362.
- [11] AHMADLAN-KOUCHAKSARAEI Z, VARIDI M, VARIDI M J, et al. Influence of processing conditions on the physicochemical and sensory properties of sesame milk: A novel nutritional beverage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(1): 299–305.
- [12] 许克平,王佳俐,刘成梅,等.全组分芝麻乳的制备工艺及贮藏稳定性[J].食品工业科技,2022,43(15): 175–183.
- [13] AHMADIAN-KOUCHAKSARAEI Z, VARIDI M, VARIDI M J, et al. Study of stability characteristics of sesame milk: Effect of pasteurization temperature, additives, and homogenisation pressure [J]. Quality Assurance and Safety

- ty of Crops & Foods, 2015, 7(5):677–686.
- [14] 王希,杨帆,杜宣利,等.软化条件对大豆软化效果影响的研究[J].中国油脂,2015,40(12):7–11.
- [15] QIN X P, YANG F, SUN H H, et al. The physicochemical stability and *in vivo* gastrointestinal digestion of flaxseed milk: Implication of microwave on flaxseed [J]. Food Chemistry, 2023, 424:136362.
- [16] MARBELLO O D, VALBUENA S, RACEDO F J. Study of the nonlinear optical response and thermal stability of edible oils using the Z-scan technique [J]. Talanta, 2020, 206:120226.
- [17] YU X, NIE C Z, ZHAO P, et al. Influences of microwave exposure to flaxseed on the physicochemical stability of oil bodies: Implication of interface remodeling [J]. Food Chemistry, 2022, 368:130802.
- [18] YU X, HUANG S S, YANG F, et al. Effect of microwave exposure to flaxseed on the composition, structure and techno-functionality of gum polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125:107447.
- [19] KALINIEWICZ Z, JADWISIENCZAK K, ZUK Z, et al. Selected physical and mechanical properties of hemp seeds[J]. Bioresources, 2021, 16(1):1411–1423.
- [20] 赵电波,秦晓鹏,詹海杰,等.基于内源性磷脂-乳清分离蛋白交互作用的磷虾油乳液稳定性研究[J].食品工业科技,2021,42(24):68–76.
- [21] LI X, WANG X, XU D X, et al. Enhancing physicochemical properties of emulsions by hetero aggregation of oppositely charged lactoferrin coated lutein droplets and whey protein isolate coated DHA droplets[J]. Food Chemistry, 2018, 239:75–85.
- [22] 刘兴丽,魏莹莹,张艳艳,等.脱酰胺马铃薯蛋白乳液的制备及其微流变特性[J].食品科学,2023,44(2):94–100.
- [23] 李昕,王旭,李玮克,等.热处理对乳铁蛋白- β -胡萝卜素/大豆多糖-DHA 乳状液微流变特性的影响[J].食品工业科技,2017,38(18):1–7.
- [24] YUE M, HUANG M Y, ZHU Z S, et al. Effect of ultrasound assisted emulsification in the production of Pickering emulsion formulated with chitosan self-assembled particles: Stability, macro, and micro rheological properties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154:112595.
- [25] NIK A M, ALEXANDER M, POYSA V, et al. Effect of soy protein subunit composition on the rheological properties of soymilk during acidification [J]. Food Biophysics, 2011, 6(1):26–36.

Effect of microwave pretreatment on stability of black sesame milk

CHEN Chunyan¹, SUN Haohe², LI Sheng², YU Xiao², LI Bingxin¹, QIAN Caihong¹, TUO Nini¹

1. Hubei Vocational College of Bio-Technology, Wuhan 430070, China;

2. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

Abstract: The effects of microwave pretreatment time (0~12 min) on the physical properties of black sesame seed and whole seed milk stability were investigated. The results showed that microwave pretreatment induced the volume expansion of black sesame seed, and uneven outer seed coat, which was further ruptured when the microwave pretreatment further reached 12 min. The hardness, elasticity, adhesion and resilience values of black sesame seed were significantly reduced upon microwave pretreatment ($P<0.05$), achieving the minimum values when the microwave pretreatment extended for 9 min. With the gradual prolongation of microwave pretreatment time, the average particle size of black sesame milk increased from 1.21 μm to 1.52 μm ($P<0.05$), and the zeta potential values decreased from -26.90 mV to -31.91 mV ($P<0.05$), accompanied by the obvious improvement of physical stability. In particular the black sesame milk exhibited an optimal physical stability when microwave pretreatment increased for 9 min as manifested by the obvious decrease in the curve slope of the Turbiscan Stability Index (TSI) values, and a slight change in the bottom and top of the ΔBS curves. Microwave pretreatment, particularly for 9 min, enhanced the elasticity behavior and weakened the fluidity of black sesame seed milk in the static system, decreased the apparent viscosity, and increased the viscoelasticity in dynamic system. Microwave pretreatment caused an obvious increase in the particle size of emulsion droplets, and a decrease in the lamellar porous storage proteins in bulk aqueous phase of black sesame seed milk, suggesting the preferential participation in the reproduction of emulsion droplets. Therefore, suitable microwave pretreatment could remodel the physical properties of black sesame seed and physical stability of whole seed milk, thereby broadening their application scenarios.

Key words: microwave pretreatment; black sesame seed; physical property; physical stability; milk system remodeling