

基于油脂不饱和度的辣椒素乳状液的 稳定性及感官评价

范欣莹 苏渭 王鑫淼 陈建设 胡小雪

(浙江工商大学食品科学与生物工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: [目的] 探究油相不饱和度对辣椒素乳状液性能的影响, 以优化其在食品体系中的应用效果。[方法] 通过选取亚麻籽油(α -亚麻酸)、葵花籽油(亚油酸)和山茶油(油酸)构建乳状液体系, 系统分析了粒径分布、 ζ 电势、微观结构、体外消化稳定性及感官特性。[结果] 山茶油乳状液比表面积平均粒径最大, 亚麻籽油最小且 ζ 电势绝对值显著更高($P < 0.01$), 其致密界面结构在消化过程中维持更小粒径($P < 0.01$), 对辣椒素保护率最优; 感官评价中, 亚麻籽油乳状液辣感最强, 可能与高不饱和度相关。[结论] 辣椒素乳状液的稳定性与乳状液油相的不饱和度相关联, 高不饱和脂肪酸通过形成黏弹性界面膜增强乳液稳定性, 其中不饱和度最高的亚麻籽油乳状液颗粒尺寸最小、分布最均匀, 乳化稳定性与辣感释放效果最佳。

关键词: 辣椒素; 不饱和油脂; 乳状液; 稳定性; 辣感感官评价

Stability and sensory evaluation of capsaicin emulsion based on oil unsaturation degrees

FAN Xinying SU Wei WANG Xinmiao CHEN Jianshe HU Xiaoxue

(School of Food and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of oil phase unsaturation degree on the performance of capsaicin emulsion to optimize its application efficacy in food systems. [Methods] Flaxseed oil (α -linolenic acid), sunflower oil (linoleic acid), and camellia oil (oleic acid) are selected to construct the emulsion systems. The particle size distribution, zeta potential, microstructure, in vitro digestion stability, and sensory characteristics are systematically analyzed. [Results] The camellia oil emulsion exhibits the largest value in average particle size of specific surface area, while the flaxseed oil emulsion demonstrates the smallest particle size and significantly higher absolute zeta potential values ($P < 0.01$). Its compact interfacial structure maintains smaller particle sizes throughout the digestion process ($P < 0.01$), ensuring the optimal protection of capsaicin. According to sensory evaluation, the flaxseed oil emulsion has the strongest spicy perception, potentially attributed to its high unsaturation degree. [Conclusion] The findings demonstrated that the stability of capsaicin emulsions correlates with the unsaturation degree of the oil phase. Highly unsaturated fatty acids enhance emulsion stability by forming viscoelastic interfacial films. Flaxseed oil, with the highest unsaturation degree, produces emulsion with the smallest particle size, most uniform distribution, and best emulsion stability and pungency intensity.

Keywords: capsaicin; unsaturated oil; emulsion; stability; spicy perception sensory evaluation

辣椒素(capsaicin, CAP)是辣椒属植物的特征性呈味的生物学功能而得到广泛应用,例如缓解疼痛^[1]、促进脂肪分解^[2]以及降低胃肠道癌症(包括食管癌、胃癌和结肠

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(编号:202310353046); 省级平台校级教学项目(编号:1110XJ0520120-08)

通信作者: 胡小雪(1993—), 女, 浙江工商大学实验师, 博士在读。E-mail: huxiaoxue@zjgsu.edu.cn

收稿日期: 2024-11-26 **改回日期:** 2025-04-03

引用格式: 范欣莹, 苏渭, 王鑫淼, 等. 基于油脂不饱和度的辣椒素乳状液的稳定性及感官评价[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 42-49.

Citation: FAN Xinying, SU Wei, WANG Xinmiao, et al. Stability and sensory evaluation of capsaicin emulsion based on oil unsaturation degrees[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 42-49.

癌)的发生风险^[3]等。然而,辣椒素是一种水不溶性生物活性成分,其低水溶性限制了在人体内的吸收和利用,且其对氧化分解和异构化高度敏感,导致其在胃肠道消化过程中的生物利用率较低^[4-5]。同时,辣椒素具有高度刺激性,不合适的摄入方式和剂量会使人体产生“灼烧感”和“疼痛感”,甚至引起恶心、呕吐、腹痛和腹泻^[4],刺激口腔和胃肠道黏膜,且在胃肠道的稳定性较差,容易被胃酸和酶降解,这限制了其广泛运用。

脂质载体乳液技术已被证实是改善疏水性生物活性物质分散特性及生物可及性的有效策略,同时可用于改善包埋物的刺激性,减小某些生物活性物质对胃肠道造成的刺激或不良影响^[6-7]。现有研究多聚焦于脂质载体的极性特征与链长特征对递送体系性能的影响^[8-10],而关于脂肪酸不饱和度这一重要特性的系统研究尚显不足。脂肪酸不饱和度对递送体系的影响主要体现在两个方面:① 不饱和键较高的反应活性可能会引发脂质氧化及加成反应,直接影响乳液的物理稳定性和活性成分保存率。② 油相的不饱和度差异可能会引起其风味口感的不同,高饱和度脂肪的固体油脂相比较液体油脂可以更有效地降低辣椒素的辣感^[11],这可能是由于其高饱和度脂肪含量更高,因此形成的脂肪结晶网络将辣椒素捕获在其内部的空隙中,减缓辣椒素的释放从而降低了辣感^[12]。因此,通过精准调控油相不饱和度可能实现递送体系稳定性与感官特性的协同优化。

基于油脂的不饱和度特性,研究拟分别选取富含 α -亚麻酸的亚麻籽油、富含亚油酸的葵花籽油以及富含油酸的山茶油,制备辣椒素乳状液体系。通过比较乳状液特性、消化稳定性和基于韦伯分数曲线的辣感感官特性,评估不同油相乳状液对辣椒素的保护效果,并通过体外消化模拟试验验证3种油相乳状液对辣椒素在消化过程中的保护作用,以期提高乳液稳定性并降低其刺激性,为辣椒素在食品药品中的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

天然辣椒碱:纯度 $\geq 95\%$ (HPLC),阿拉丁试剂(上海)有限公司;

山茶油:一级,益海嘉里食品营销有限公司;

葵花籽油:一级,佳格投资(中国)有限公司;

亚麻籽油:一级,中粮海悠(北京)有限公司;

大豆分离蛋白:食品级,济南东轩生物工程有限公司;

氢氧化钠:分析纯,西陇科学股份有限公司;

盐酸:分析纯,国药集团化学试剂公司;

人工唾液(中性):福州飞净生物科技有限公司;

胃蛋白酶(猪源):2 500 units/mg,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

胰脂肪酶:15~35 units/mg,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

胰酶(来源于猪胰腺):10~75 units/mg,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

胆汁盐:美国Sigma-Aldrich公司;

针筒式滤膜过滤器:0.45 μm ,天津津腾实验设备有限公司。

1.2 仪器与设备

分析天平:ME204E/20型,梅特勒—托利多仪器有限公司;

高速剪切机:IKA·T25型,艾卡仪器设备公司;

高压均质机:AH·BASIC型,ATS工业系统有限公司;

激光粒度分析仪:Mastersizer3000型,英国马尔文仪器有限公司;

电位仪:Zetasizer型,英国马尔文仪器有限公司;

低温恒温水浴振荡器:CYDY-A型,杭州川恒实验仪器有限公司;

高效液相色谱仪:LC-20AD型,岛津实验器材有限公司;

共聚焦显微镜:LEICATCS SP8型,德国徕卡仪器有限公司;

全自动表面张力仪:K100型,德国Kruss公司。

1.3 试验方法

1.3.1 油脂不饱和度测定 采用碘值法量化油脂不饱和度,碘值测定按GB/T 5532—2022《动植物油脂 碘值的测定》执行。

1.3.2 表面张力测量 采用全自动表面张力仪(Wilhelmy SFT平板法)测定。测试前,将铂金平板探头浸入无水乙醇溶液中进行彻底清洁,随后使用点火器进行灼烧处理,待探头温度冷却至室温后方可进行测试。平板法测试过程中,使用PL02探头部分润湿于口径为70 mm SV 20样品杯中,设定润湿长度为40.2 mm。试验参数:测量时间120 s;数据采集频率1 Hz;在测试过程中,如连续5个数据点的偏差小于0.01,系统将自动提前结束测量。为确保数据的准确性和可靠性,每个样品重复测量3次。按式(1)计算表面张力。

$$\sigma = \frac{F}{L \cos \theta}, \quad (1)$$

式中:

σ ——表面张力, mN/m;

F ——液体表面张力产生的拉力, mN;

L ——液体与固体接触的润湿长度, mm;

θ ——被测液体与平板的接触角, °。

1.3.3 乳状液制备 参照 De Aguiar 等^[13]、Flores-Andrade 等^[14]的方法, 制备辣椒素乳状液。分别将辣椒素溶解于山茶油、亚麻籽油和葵花籽油中, 配制成 40 mg/kg 的油相溶液, 并使用超声波清洗器进行超声处理 20 min, 确保辣椒素完全溶解; 水相由大豆分离蛋白(质量分数 1.5%)分散于 10 mmol/L 磷酸盐缓冲液中配制。随后, 油相和水相以 $V_{\text{油相}}:V_{\text{水相}}=1:9$ 的配比混合, 将混合液使用高速剪切装置(1 000 r/min)剪切 3 min, 得到粗乳液。最后采用高压均质设备(压力 100 MPa)对粗乳液进行 6 次循环均质处理, 获得稳定的辣椒素乳状液体系。

1.3.4 辣椒素乳状液表征 参照 Flores-Andrade 等^[14]、杨晋杰等^[15]的方法, 分别测定乳状液的粒径大小、 ζ 电势、流变特性等物理性质, 对比并综合评价不同油相制备得到的乳状液。

(1) 粒径测定: 采用激光粒度分析仪通过激光衍射来测定乳液的表观平均粒径和粒径分布。试验过程中, 选择超纯水作为分散介质, 待系统完成光和背景测量后, 将乳状液样品缓慢添加到与激光粒度仪相连的分散单元中, 直至系统遮蔽率为 10%~15%。为确保样品均匀, 样品在加入分散介质前需用洁净玻璃棒轻轻搅动。测定过程中, 设置油脂折射率为 1.46, 水折射率为 1.33, 通过配套软件进行数据采集与分析。

(2) ζ 电势测定: 采用电位仪测定乳状液的 ζ 电势值。试验在温度为 28 °C 的环境条件下进行。每次测量前, 将乳液样品用超纯水稀释 100 倍以避免多重散射效应, 并通过轻摇样品瓶确保样品均匀。将稀释后的乳液样品注入毛细血管器皿内, 调节仪器两侧凹液面至平齐, 放入仪器平衡 120 s 后开始测量, 每个样品平行测量 3 次以确保测量的准确性。

(3) 微观结构观察: 称取 1 mg 尼罗红染色剂, 溶解于 1 mL 二甲亚砜(DMSO)中, 配制成质量浓度为 1 mg/mL 的母液。随后取 50 μ L 母液加入 950 μ L 无水乙醇中进行稀释, 得到 0.05 mg/mL 染色剂溶液。将待测乳状液样品转移至 1 mL 的离心管中, 加入 50 μ L 的尼罗红染色剂溶液, 随后将离心管密封, 使用锡纸包裹避光, 将离心管缓慢摇晃约 5 min, 以确保染料与样品充分结合。待染色完成后, 使用胶头滴管吸取样品转移至载玻片上, 覆盖盖玻片封片。采用激光共聚焦法测定乳状液样品的微观结构

(激发波长为 561 nm)。试验中使用 100 倍油镜, 设置 1 024 像素 $\times$ 1 024 像素的扫描密度、100 Hz 的扫描频率进行图像采集。整个试验过程中, 环境温度(25 $\pm$ 1) °C, 相对湿度 40%~60%, 避免样品在观察过程中发生氧化或其他物理化学性变化。

1.3.5 辣椒素乳状液体外消化模拟 参照 Xu 等^[16]的方法, 构建体外消化模型, 用于评估辣椒素乳状液在消化过程中的稳定性, 试验分口腔、胃肠道和终止消化 3 个阶段进行。

(1) 口腔消化阶段: 取新鲜制备的辣椒素乳状液与人工唾液(由 0.1 g/mL 溶菌酶和 50 mmol 磷酸盐缓冲液配制而成)混合, 置于 37 °C、100 r/min 的水浴摇床中进行 2 min 的口腔模拟消化。

(2) 胃肠消化阶段: 取口腔消化完成的样品, 通过滴加盐酸将 pH 调节为 2.0, 加入最终质量浓度为 1.3 mg/mL 的猪胃蛋白酶, 在相同条件下继续进行 30 min 的胃模拟消化。随后, 通过滴加 NaOH 将混合物的 pH 调至 5.8, 分别加入最终质量浓度为 0.175 mg/mL 的胰酶、最终质量浓度为 1.1 mg/mL 的胆盐、最终质量浓度为 0.03 mg/mL 的脂肪酶及适量超纯水, 用 NaOH 调节 pH 至 6.8, 在相同条件下进行 2 h 的肠道消化模拟。

(3) 终止消化: 加入最终质量浓度为 0.174 mg/mL 的苯甲磺酰氟(PMSF)停止消化。

试验过程中, 定时取样测定乳液在不同消化阶段的粒径变化, 以评估乳液体系的消化稳定性。

1.3.6 辣椒素乳状液体外消化模拟 参照姜展等^[17]的方法, 测定经消化各个阶段后乳液中辣椒素含量。取 0.4 mL 乳液, 经葡聚糖凝胶微柱进行分离处理, 以蒸馏水为洗脱液, 收集洗脱液前 6 mL 并转入 10 mL 容量瓶中, 用甲醇定容至刻度线, 摇匀后用 0.45 μ m 微孔滤膜过滤, 将过滤后的溶液按以下色谱条件进样测定, 计算含量, 得乳液中被包封的辣椒碱的浓度。参照陈雨露等^[18]的方法, 计算辣椒素的包封率, 评价乳液对辣椒素的包封能力。

色谱条件: 色谱柱 Ultimate Plus-C₁₈ 4.6 mm $\times$ 150 mm, 5 μ m; 流动相 0.1% 磷酸水—甲醇; 流量 1.0 mL/min; 柱温 30 °C; 检测波长 280 nm; 进样量 10 μ L。

1.3.7 辣感感官评价

(1) 受试者招募: 试验共招募 16 名健康青年志愿者(男性 8 名, 女性 8 名), 均在完全自愿的情况下, 充分了解试验程序并在试验前签署知情同意书。志愿者均为非吸烟者和非素食主义者, 没有已知的口腔或其他健康问题, 并且试验前至少 1 个月内未接受任何手术和药物治疗。

此外,所有志愿者在过去6个月内均没有进行减肥/增重计划或其他特殊膳食经历。

(2) 辣感感官差别强度曲线建立:基于三点选配法^[17]测定山茶油、葵花籽油、亚麻籽油3种载体体系中的辣椒素的察觉阈值(w_0)。参照Hu等^[19]的方法配制辣椒素溶液,各油相的质量分数参数详见表1,其对照样品分别为等体积的纯油。

以各油相 w_0 为基准质量分数,建立1.5倍、2.0倍、2.5倍、3.0倍及3.5倍的测试质量分数梯度。当受试者能稳定辨别相邻浓度间1个最小可觉差时,该临界点即为 w_1 。以 w_1 为新基准,按相同梯度建立高阶浓度梯度,依次类推直至获得6个显著差异阈值点($w_1 \sim w_6$)。制备辣度的7个差别强度的样品均为现配现用,且在感官试验进行之前,均贮存在0~10℃的条件下,拿出使用前均超声20 min。所有测试溶液遵循现配现用原则,配制后立即分装至50 mL离心管,于0~10℃避光保存。临用前超声处理20 min以确保体系均质性。

以各油相体系察觉阈值(w_0)和6个差别阈值浓度($w_1 \sim w_6$)为自变量(X 轴),对应辣度感官差别强度为因变量(Y 轴),建立辣感差别强度曲线。基于Weber-Fechner定律对辣感感官差别曲线进行拟合分析,其数学模型如式(2)所示。通过模型参数优化,量化辣椒素浓度与口腔刺激感知的剂量一效应关系。

$$\Psi = k \ln(w/w_0) + b, \quad (2)$$

式中:

Ψ ——感知强度(以最小可觉差表示);

w ——辣椒素质量分数,mg/kg;

w_0 ——辣椒素的感知阈值,mg/kg;

k ——比例常数,表示感知强度与辣椒素质量分数之间的关系;

b ——偏移常数。

1.4 数据处理

试验结果用 $\text{mean} \pm \text{SD}$ 表示,采用SPSS软件进行统计检验,使用Origin 2024进行绘图,当 $P < 0.05$ 时认为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 乳状液油相的不饱和度

碘值与油脂中双键数量呈正相关。经测定,亚麻籽油、葵花籽油、山茶油碘值分别为 (189.24 ± 6.89) 、 (123.71 ± 6.12) 、 (87.00 ± 3.65) g $\text{I}_2/100$ g。3种油相的不饱和度具有显著性差异($P < 0.05$),且从高到低为亚麻籽油>葵花籽油>山茶油。该结果与各油脂脂肪酸组成特征相符,其中亚麻籽油富含 α -亚麻酸($\text{C}_{18:3n3}$),葵花籽油以亚油酸($\text{C}_{18:2n6}$)为主,而山茶油主要含油酸($\text{C}_{18:1n9}$)。

2.2 乳状液油相的表面张力

油相表面张力对乳状液的形成与稳定性具有决定性作用。如图1所示,3种油相表面张力差异具有高度显著性($P < 0.01$),从高到低依次为山茶油、葵花籽油、亚麻籽油。这种差异与油相不饱和度呈显著负相关,说明不饱和度的提高可有效降低油相表面张力。从分子作用机制分析,不饱和键的引入显著改变了油相分子间的相互作用模式。一方面,碳链中双键的存在增强了分子间的范德华力和 π - π 共轭效应;另一方面,不饱和结构通过诱导极化作用增强了油-水界面处的氢键结合能与静电相互作用。这种复合分子作用机制的协同效应,导致界面层分子排列密度增加,从而降低了表面自由能^[20]。研究结果证实,通过调控油相不饱和度改变分子间作用力网络,可实现对乳状液稳定性的有效调控。

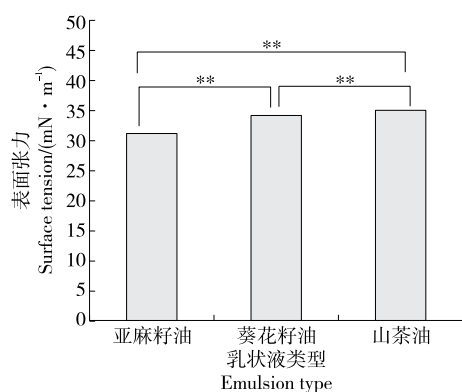
2.3 油相乳状液粒度、Zeta电位及其微观结构

乳状液的液滴颗粒尺寸是影响其性能的关键参数之一,不仅决定了乳液的胶体稳定性和界面特性,还显著影响其表观性能。大豆分离蛋白已被证实具有良好的乳化性能^[21],因此以其为乳化剂开展试验。图2展示了采用山茶油、葵花籽油和亚麻籽油制备的辣椒素乳状液样品的平均粒径,试验结果表明,3种油相制备的乳状液具有良好的分散性和均匀的液滴分布,均可用于制备具有纳米尺度分散性能的辣椒素乳状液。具体而言,山茶油、葵花籽油、亚麻籽油形成的乳状液的比表面积平均粒径分别为 (0.342 ± 0.001) 、 (0.321 ± 0.010) 、 (0.284 ± 0.001) μm ,其中山茶油乳状液的粒径最大,亚麻籽油乳状液的粒径

表1 油体系辣椒素溶液样品察觉阈值测试质量分数

Table 1 Detection threshold test concentrations for oil system capsaicin solution samples

样品	对照样品	样品质量分数/(mg·kg ⁻¹)				
		样品1	样品2	样品3	样品4	样品5
含辣椒素山茶油	山茶油	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070
含辣椒素葵花籽油	葵花籽油	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070
含辣椒素亚麻籽油	亚麻籽油	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070

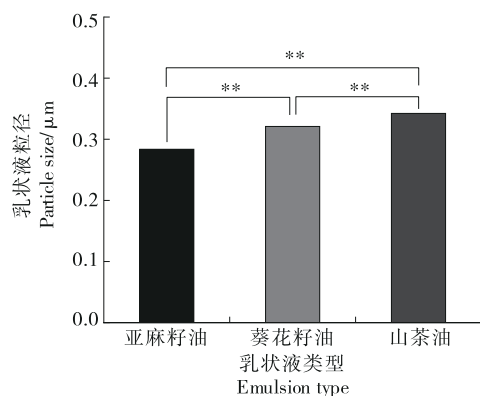


**表示差异高度显著 ($P < 0.01$)

图1 3种新鲜制备乳液的表面张力

Figure 1 Surface tension of three freshly prepared emulsions

最小,3组乳液的粒径两两之间均存在显著性差异 ($P < 0.01$)。相关研究^[22]表明,多不饱和脂肪酸的含量及其不饱和度与乳液的颗粒尺度呈显著正相关。脂肪酸分子中的不饱和双键可显著影响乳化过程,其不仅增强了分子的柔韧性,还使得分子呈现出显著的双亲性,即一端亲水性强,另一端亲油性强,基于这种分子特性,不饱和脂肪酸能够在水-油界面形成稳定的作用,有效降低体系的界面张力,抑制乳滴的聚并和分层现象,从而降低液滴的平均粒径并促进乳状液的形成和稳定^[21-22]。同时,有研究^[23]表明:一些蛋白质会与高不饱和度油脂之间存在更强的亲和力,通过静电作用、氢键等分子间相互作用产生静电斥力,从而有效遏制乳滴间的聚并,显著增强乳状液的稳定性。因此,脂肪酸不饱和度最高的亚麻籽油形成的乳状液,不仅表现出更小乳液颗粒尺寸、更均匀的分布特征,还展现出最佳的乳化稳定性。这一发现充分证明了油脂不饱和度对乳液性能的决定性影响。

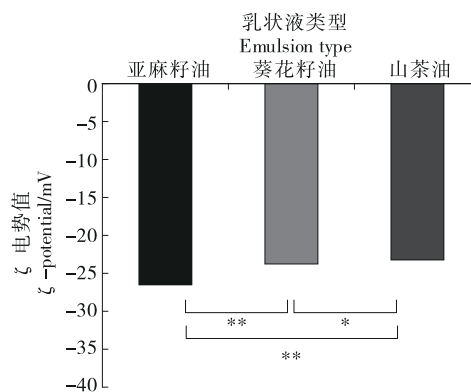


**表示差异高度显著 ($P < 0.01$)

图2 3种新鲜制备乳液的粒径分布

Figure 2 Particle size distribution of three freshly prepared emulsions

3种乳状液的 ζ 电势测定结果如图3所示,亚麻籽油乳状液的电位绝对值显著高于葵花籽油乳状液与山茶油乳状液 ($P < 0.01$),表明亚麻籽油具有更优的界面电荷特性。由图4可知,3种乳状液乳滴均呈球形,相对于葵花籽油以及山茶油乳状液,亚麻籽油乳状液的粒径更小且分布更为均匀,这进一步证实高不饱和度油相(如亚麻籽油)更适合制备辣椒素乳状液,其制备的乳状液粒径最小,乳化性能佳,加工适应性更优。高不饱和度油脂通常具有较低的界面张力,使得油水界面更容易变形,这有利于乳化剂在界面上的吸附和排列,从而形成更小且分布更为均匀的乳滴。该结论与上文的 ζ 电势测定结果相互印证,共同支持了高不饱和度油相在乳化体系中优越的性能特性。



**表示差异高度显著 ($P < 0.01$); *表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 3种新鲜制备乳液的 ζ 电势

Figure 3 Zeta potential of three freshly prepared emulsions

2.4 不同乳状液在体外模拟消化过程中的稳定性评价

2.4.1 不同乳状液在各消化阶段的粒径变化 图5为3种乳状液样品在体外模拟消化过程中的平均粒径变化。整体看来,山茶油、葵花籽油和亚麻籽油3种乳状液样品在不同消化阶段平均粒径整体呈先增后降趋势:在口腔消化阶段,乳状液粒径与新鲜制备乳液相比无显著变化 ($P > 0.05$),随后进入胃消化阶段,3种乳状液的粒径均显著增加至最大值,而肠消化阶段平均粒径再次减小。这一现象可以通过以下机制进行解释:在模拟胃消化阶段,胃蛋白酶对乳液中表面蛋白的分解导致液滴表面电荷减少,相互斥力降低,从而引发液滴聚集,形成较大的液滴^[24]。同时,胃消化过程中乳剂的分布不均及分散性较差也可能是粒径增大的原因。当乳液进入肠消化阶段后,胰酶、胰脂肪酶开始酶解液滴内的脂肪。肠消化过程中加入的胆盐不仅提高了脂肪酶的活力,加速了油相的水解,释放出游离脂肪酸,同时其表面活性降低了液滴的

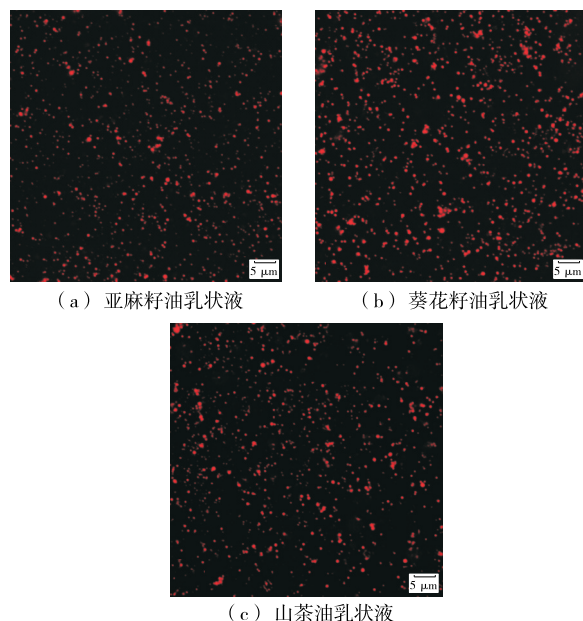


图4 激光共聚焦图谱

Figure 4 Spectra of confocal laser scanning microscope

表面张力,使部分乳化剂与脂肪酶竞争甚至被取代,增加脂肪酶与油相的接触面积^[25],从而使乳液粒径下降。游离脂肪酸的产生,使油滴内部甘油三酯含量减少,同时消耗了乳液液滴表面的蛋白质成分,值得注意的是,在整个消化过程中,亚麻籽油乳状液的平均粒径始终显著小于葵花籽油乳状液和山茶油乳状液的($P<0.01$),表明其在消化过程中形成的液滴更少聚集,更为稳定,这可能与亚麻籽油较高的不饱和度有关^[25]。脂肪酸的不饱和度能够显著影响乳状液的稳定性,更高的不饱和度有助于形成稳定性更好的乳状液,从而在消化过程中为辣椒素提供更好的保护效果。这与前文的试验数据一致,进一步验证了亚麻籽油乳状液在乳化性能和稳定性方面的优势。

2.4.2 不同乳状液在各消化阶段对辣椒素的包封率 辣椒素在新鲜乳液和经不同消化阶段的乳状液中的包封率变化,如图6所示。从整体来看,山茶油、葵花籽油和亚麻籽油3种乳液在消化初始阶段,辣椒素包封率均低于新鲜制备乳液,且随着消化进程的推进而逐渐降低;这是由于消化过程中酶对蛋白质和油脂的分解消化作用破坏了乳滴对辣椒素的包埋,从而导致部分辣椒素被释放。乳状液包封率在95%以上通常可以认为是比较优良的水平,所有试验乳状液在体外模拟消化的各个阶段对辣椒素的包封率均始终保持在96%以上,显示出良好的保护效果,证明这些乳状液均为理想的包封剂。

2.5 辣椒素油溶液辣感感官评价

通过建立辣感差别强度曲线,系统评价3种油体系中

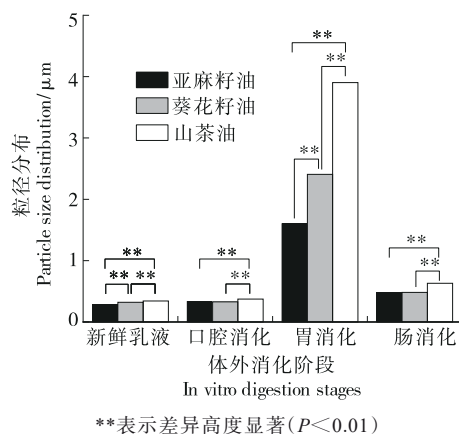


图5 3种乳液在体外消化各阶段粒径变化

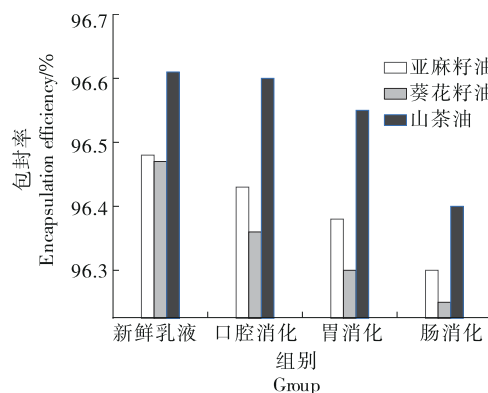
Figure 5 Changes in particle size of three emulsions at each stage of *in vitro* digestion

图6 3种乳液在体外消化各阶段的包封率

Figure 6 Encapsulation rates of three emulsions at each stage of *in vitro* digestion

辣椒素的感官特征及其物理化学机制。选取山茶油、葵花籽油和亚麻籽油作为油相,构建辣椒素乳状液体系,并通过感官评价和物理分析方法对其辣感特性进行了全面评估。结果(图7)表明,基于韦伯—费希纳定律^[26-27]的感官评价模型,山茶油、葵花籽油和亚麻籽油3种油体系中辣椒素的察觉阈值与感官强度呈良好的线性关系($R^2>0.9$)。由3种油体系中辣椒素的觉察阈值和6个基于最小可觉差的感官差别强度,可计算得到辣椒素在3种油体系中的韦伯分数^[28]。添加辣椒素的亚麻籽油、葵花籽油、山茶油中的韦伯分数分别为0.970 4, 1.452 2, 1.012 0,其中亚麻籽油体系中的韦伯分数最小,表明其辣感表现最为强烈。

研究^[26-27]发现,连续油相的食品体系能够有效降低疏水性辛辣物质在口腔中的刺激感。这与脂肪在口腔中的物理屏障作用密切相关。脂肪通过抑制化学刺激与三叉神经受体间的相互作用,显著减弱了辣椒素引起的口

腔灼伤感^[27,29-30]。这种现象与脂肪对辛辣物质的高溶解度相一致,表明油相体系可作为一种有效的感官调控媒介。在 3 种体系中,添加辣椒素的亚麻籽油表现出最强的辣感。这主要归因于其特殊的脂肪酸组成,亚麻籽油中高含量的不饱和脂肪酸赋予其分子结构更高的灵活性和溶解能力,这种特性显著增强了辣椒素的溶解性和释放速率,从而加强了其与口腔中受体的结合强度。此外,亚麻籽油独特的风味特征与辣椒素的化学感知特性产生了良好的互补作用,进一步增强了整体的感官体验。

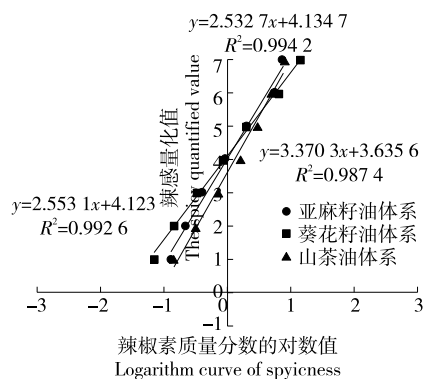


图 7 辣感差别强度—浓度对数曲线

Figure 7 Logarithmic curves of spicy perception difference intensity-concentration

3 结论

该研究基于油脂不饱和度构建了辣椒素的乳状液体系,系统评估了其乳状液特性、口腔辣感感官评价及消化稳定性。结果表明,油相不饱和度越高,乳状液表现出更优异的乳化稳定性和消化稳定性,同时能够引发最强烈的辣感。不饱和脂肪酸中双键结构不仅增强了分子的柔韧性,其独特的两亲性分子结构还能够在水油界面形成稳定的膜层,从而有效地降低界面张力,抑制乳剂的合并与分层,减小乳滴粒径,促进乳状液的形成和稳定。值得注意的是,亚麻籽油因较高的不饱和脂肪酸含量,展现出更优异的溶解性能,这使得体系中辣椒素能够更快速地释放并与口腔中的受体结合,产生更强的辣感。后续将聚焦于优化乳状液配方、拓展油相类型、解析界面特性及辣椒素释放机制,以提升其科学性与应用价值。

参考文献

- [1] O'NEILL J, BROCK C, OLESEN A E, et al. Unravelling the mystery of capsaicin: a tool to understand and treat pain[J]. *Pharmacological Reviews*, 2012, 64(4): 939-971.
- [2] WU D, DUAN R, TANG L, et al. *In-vitro* binding analysis and inhibitory effect of capsaicin on lipase[J]. *LWT-Food Science*

and Technology, 2022, 154: 112674.

- [3] XIANG Y W, XU X L, ZHANG T, et al. Beneficial effects of dietary capsaicin in gastrointestinal health and disease[J]. *Experimental Cell Research*, 2022, 417(2): 113227.
- [4] HAYMAN M, KAM P C A. Capsaicin: a review of its pharmacology and clinical applications[J]. *Current Anaesthesia & Critical Care*, 2008, 19(5/6): 338-343.
- [5] 张桦, 杜杰, 王洪霞, 等. 明胶基高内相乳液在辣椒素负载中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(16): 34-41, 49.
- ZHANG J, DU J, WANG H X, et al. Application of gelatin-based high internal phase emulsions (HIPEs) in capsaicin loading[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(16): 34-41, 49.
- [6] WILSON R J, LI Y, YANG G Z, et al. Nanoemulsions for drug delivery[J]. *Particuology*, 2022, 64: 85-97.
- [7] 王爱华. 乳状液的结构、种类及在递送脂溶性生物活性物质方面的应用[J]. *中南农业科技*, 2022, 43(3): 149-156, 160.
- WANG A H. Structure, types, and applications of emulsions in the delivery of lipophilic bioactive compounds[J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2022, 43(3): 149-156, 160.
- [8] CALLIGARIS S, COMUZZO P, BOT F, et al. Nanoemulsions as delivery systems of hydrophobic silybin from silymarin extract: Effect of oil type on silybin solubility, *in vitro* bioaccessibility and stability[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(1): 77-84.
- [9] SALVIA-TRUJILLO L, SUN Q, UM B H, et al. *In vitro* and *in vivo* study of fucoxanthin bioavailability from nanoemulsion-based delivery systems: impact of lipid carrier type[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 17: 293-304.
- [10] HEDRÉN E, DIAZ V, SVANBERG U. Estimation of carotenoid accessibility from carrots determined by an *in vitro* digestion method[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2002, 56(5): 425-430.
- [11] ZOU S, ZHANG Y R, WANG Q J, et al. Effect of palm stearin on the physicochemical characterization and capsaicinoid digestion of Sichuan hotpot oil[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131167.
- [12] BLAKE A I, CO E D, MARANGONI A G. Structure and physical properties of plant wax crystal networks and their relationship to oil binding capacity[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2014, 91(6): 885-903.
- [13] DE AGUIAR A C, DE PAULA J T, MUNDO J L M, et al. Influence of type of natural emulsifier and microfluidization conditions on Capsicum oleoresin nanoemulsions properties and stability[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44

- (4): e13660.
- [14] FLORES-ANDRADE E, ALLENDE-BALTAZAR Z, SANDOVAL-GONZÁLEZ P E, et al. Carotenoid nanoemulsions stabilized by natural emulsifiers: whey protein, gum Arabic, and soy lecithin[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 290: 110208.
- [15] 杨晋杰, 邵国强, 王胜男, 等. 黄原胶对大豆分离蛋白乳状液聚集稳定性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(7): 20-25.
- YANG J J, SHAO G Q, WANG S Q, et al. Effect of xanthan gum on the aggregation stability of soy protein isolate emulsions[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(7): 20-25.
- [16] XU W L, YANG Y, XUE S J, et al. Effect of *in vitro* digestion on water-in-oil-in-water emulsions containing anthocyanins from grape skin powder[J]. Molecules, 2018, 23(11): 2 808.
- [17] 姜展, 刘新, 张桂平, 等. 复方辣椒碱纳米乳中辣椒碱包封率的测定方法研究[J]. 重庆医科大学学报, 2011, 36(2): 195-197.
- JIANG Z, LIU X, ZHANG G P, et al. Determination of encapsulation efficiency of capsaicin in compound capsaicin nanoemulsion[J]. Journal of Chongqing Medical University, 2011, 36(2): 195-197.
- [18] 陈雨露, 吕沛峰, 袁芳. 新型番茄红素微胶囊的制备及稳定性评价[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 134-140.
- CHEN Y L, LU P F, YUAN F. Preparation and stability evaluation of novel lycopene microcapsules[J]. Food Science, 2021, 42(19): 134-140.
- [19] HU X X, AYED C, CHEN J S, et al. The role of capsaicin stimulation on the physicochemical properties of saliva and aroma release in model aqueous and oil systems[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132824.
- [20] CORNACCHIA L, ROOS Y H. Stability of β -carotene in protein-stabilized oil-in-water delivery systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(13): 7 013-7 020.
- [21] ZHENG J Y, SUN D, LI X X, et al. The effect of fatty acid chain length and saturation on the emulsification properties of pork myofibrillar proteins[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110242.
- [22] LOBO M S, KISLALIOGLU M S. Effect of unsaturation of C18 fatty acids at liquid paraffin-water interfaces[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 1999, 20(1/2): 783-794.
- [23] XIONG Y T, CHEN Y, YI X Z, et al. Effect of four plant oils on the stability of high internal phase Pickering emulsions stabilized by ovalbumin-tannic acid complex[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 1 633-1 641.
- [24] 许朵霞, 曹雁平, 袁芳, 等. β -胡萝卜素乳状液体外模拟消化吸收研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(6): 36-40.
- XU D X, CAO Y P, YUAN F, et al. Studies on the *in-vitro* digestion of β -carotene emulsion[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(6): 36-40.
- [25] GLEIZE B, TOURNIAIRE F, DEPEZAY L, et al. Effect of type of TAG fatty acids on lutein and zeaxanthin bioavailability [J]. The British Journal of Nutrition, 2013, 110(1): 1-10.
- [26] LAWLESS H T, HARTONO C, HERNANDEZ S. Thresholds and suprathreshold intensity functions for capsaicin in oil and aqueous based carriers[J]. Journal of Sensory Studies, 2000, 15 (4): 437-477.
- [27] GAISER J, HAYES J E. Fat, protein, and temperature each contribute to reductions in capsaicin oral burn[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(8): 5 091-5 100.
- [28] NORWICH K H, WONG W. Unification of psychophysical phenomena: the complete form of Fechner's law[J]. Perception & Psychophysics, 1997, 59(6): 929-940.
- [29] LYNCH J, LIU Y H, MELA D J, et al. A time: intensity study of the effect of oil mouthcoatings on taste perception[J]. Chemical Senses, 1993, 18(2): 121-129.
- [30] EIB S, SCHNEIDER D J, HENSEL O, et al. Evaluation of trigeminal pungency perception of allyl isothiocyanate - A time intensity (TI) study[J]. Food Quality and Preference, 2021, 87: 104039.