

皂角米多糖微乳的制备及其与槲皮素的疏水相互作用

徐晨瑞 姚秋萍 邓盛慧

(贵州民族大学民族医药学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: [目的] 探讨制备皂角米多糖微乳的配方工艺以及微乳与槲皮素的疏水相互作用。 [方法] 通过配伍试验绘制伪三元相图, 优化皂角米多糖微乳的最佳配比。基于芴荧光探针技术考察微乳中槲皮素浓度对 I1/I3 值的影响, 探究皂角米多糖微乳中槲皮素与载体之间疏水及极性相互作用的效应。 [结果] 制备的皂角米多糖微乳为 O/W 型 (水包油型), 最佳配方为 Tween80-Span80 (质量比 3:2) 35.4%, 无水乙醇 17.7%, 液体石蜡 13.3%, 皂角米多糖溶液 (5 mg/mL) 33.6%。超声处理 10 min 后, 皂角米多糖形成的微乳有较小的粒径和绝对值较大的 ζ 电位, 稳定性更佳。在一定的槲皮素浓度范围内, 超声时间越长, 所得的皂角米多糖相对分子质量越小, 微乳的 I1/I3 值敏感性越低。 [结论] 采用皂角米多糖制备水包油型微乳工艺简便, 经超声处理得到的低相对分子质量的皂角米多糖形成的微乳会显著抑制疏水相互作用对槲皮素浓度的敏感性, 有利于实现槲皮素在胃肠道环境中的平稳、可控释放。

关键词: 皂角米多糖; 微乳; 槲皮素; 伪三元相图; 芴荧光探针

Preparation of *Gleditsia sinensis* polysaccharide microemulsion and their hydrophobic interactions with quercetin

Xu Chenrui Yao Qiuping Deng Shenghui

(School of Ethnic-Minority Medicine, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: [Objective] To investigate the formulation process of *Gleditsia sinensis* polysaccharide microemulsion and the hydrophobic interactions between the microemulsion and quercetin. [Methods] A pseudo-ternary phase diagram was drawn through compatibility experiments to optimize the formulation of the *G. sinensis* polysaccharide microemulsion. Based on the pyrene fluorescence probe technique, the effect of quercetin concentration on the I1/I3 value in the microemulsion was examined to explore the hydrophobic and polar interactions between quercetin and the carrier in the *G. sinensis* polysaccharide microemulsion system. [Results] The prepared *G. sinensis* polysaccharide microemulsion was of the oil-in-water (O/W type). The optimal formulation consisted of 35.4% Tween 80-Span 80 (mass ratio 3:2), 17.7% anhydrous ethanol, 13.3% liquid paraffin, and 33.6% *G. sinensis* polysaccharide solution (5 mg/mL). After ultrasonic treatment for 10 min, the resulting microemulsion exhibited a smaller particle size and a larger absolute ζ -potential, indicating better stability. Within a certain range of quercetin concentrations, longer ultrasonic treatment led to a lower relative molecular mass of the *G. sinensis* polysaccharide and decreased sensitivity of the I1/I3 value of the microemulsion. [Conclusion] The preparation process of the O/W microemulsion using *G. sinensis* polysaccharide is simple. The microemulsion formed from low-relative-molecular-mass *G. sinensis* polysaccharide obtained via ultrasonic treatment significantly suppresses the sensitivity of hydrophobic interactions to quercetin concentration, which is beneficial for achieving stable and controlled release of quercetin in the gastrointestinal environment.

Keywords: polysaccharide from *Gleditsia sinensis*; microemulsion; quercetin; pseudo-ternary phase diagram; pyrene fluorescence probe

基金项目: 贵州省科技计划项目 (编号: 黔科合支撑 [2021] 一般 136); 贵州省林业科学基础研究项目 (编号: 202109)

通信作者: 姚秋萍 (1977—), 女, 贵州民族大学教授, 博士。E-mail: wonderypq@aliyun.com

收稿日期: 2025-09-18 改回日期: 2026-03-31

引用格式: 徐晨瑞, 姚秋萍, 邓盛慧. 皂角米多糖微乳的制备及其与槲皮素的疏水相互作用[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 1-9.

Citation: Xu Chenrui, Yao Qiuping, Deng Shenghui. Preparation of *Gleditsia sinensis* polysaccharide microemulsion and their hydrophobic interactions with quercetin[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 1-9.

槲皮素作为一种天然的黄酮类化合物,具有强大的抗氧化活性,可清除自由基、减轻氧化应激,在心血管疾病、糖尿病、癌症及神经退行性疾病防治中展现出巨大潜力^[1-2]。然而,水溶性差、生物利用度低、化学稳定性不足等问题限制了其在临床及功能食品中的应用^[3]。为改善槲皮素的递送效率,微乳液作为一种各项同性、热力学稳定的纳米载体系统,近年来备受关注^[4]。其由表面活性剂、助表面活性剂、水相及油相组成,粒径通常介于 5~100 nm,外观呈透明或半透明状^[5]。该体系能够显著提高药物溶解度、增强其化学稳定性并降低毒副作用,在功能因子递送领域有显著应用价值^[6]。Kajbafvala 等^[7]应用伪三元图筛选微乳配方,并对负载槲皮素微乳的密度、表面张力、黏度等性质进行表征,证实了负载于微乳中的槲皮素有非常好的平衡溶解性。然而,空白微乳体系在复杂胃肠道环境中(尤其是胃酸条件下)对包封活性成分的保护能力有限,可能导致槲皮素在胃部过早降解,影响其抵达肠道后的生物活性^[8]。因此,在空白微乳体系中引入高性能的聚合物乳化剂/共乳化剂,以构建更具稳定性与 pH 响应性的复合体系,成为一项可行的解决策略^[9]。

多糖因稳定、安全、无毒、可生物降解且天然可得,成为聚合物乳化剂/共乳化剂的优选^[10]。皂角米中富含半乳甘露聚糖(GMs),因其抗氧化、降血糖、降血脂等多种生物学作用已被广泛研究^[11]。尽管其高黏度、高相对分子质量及低溶解度等特性限制了其在食品产业中的广泛应用,但 Busch 等^[12]研究发现,采用超声水解等物理改性技术能够在不破坏其结构的基础上,精准制备出具有特定相对分子质量与黏度的 GMs 产品,从而克服上述应用瓶颈。此外, Niknam 等^[13]研究发现,在乳液中引入皂角半乳甘露聚糖时,可显著改善乳液的乳化能力、乳液稳定性和发泡稳定性。由于多糖的乳液更难在胃酸中消化和破坏,其所构建的多糖基载体能够有效抵御胃酸环境,优先在肠道中崩解释放,这为实现槲皮素的精准递送与提高生物利用度提供了关键保障^[8]。Lang 等^[10]提出将葡聚糖作为辅料结合槲皮素制备成巨量聚体微乳液,可提高槲皮素负载量并改善氧化活性。但目前的研究大多集中于壳聚糖、海藻酸钠、果胶等常见多糖^[14],而对于皂角米多糖在表面活性剂微乳体系中的应用研究较少,其作为聚合物乳化剂/稳定剂的潜力未被充分发掘。此外,该领域在配方筛选方法和疏水相互作用研究方面存在局限性。一方面,微乳配方筛选多依赖伪三元相图法,但多数研究对相图及理化性质的测定不够详尽,导致配方可靠性不足^[8,15]。同时,传统阴影面积比较法存在主观性强、定量分析欠缺的问题,尤其在相边界模糊时缺乏客观计算依据。另一方面,对于由多糖、表面活性剂及药物(如槲皮素)构成的复杂体系,药物在完全包埋于胶束前的疏水性水合作用机制复杂,其在药物分子完全包埋于表面活性

剂微团前的作用尚未得到充分阐明,制约了高性能微乳体系的设计和应用^[16-17]。

试验拟探讨皂角米多糖微乳的制备及其与槲皮素的相互作用机制。首先,通过伪三元相图确定皂角米多糖微乳组分比例,并提出一种直接用 Origin 软件计算伪三元相图阴影面积的新方法。随后,通过对皂角米多糖进行不同长时间的超声改性,系统研究多糖相对分子质量对微乳粒径、 ζ 电位及稳定性的影响规律,从而确定稳定性最佳的超声时间。最后,结合荧光探针技术,深入探究不同超声处理下多糖改性对微乳体系疏水微区极性的调控机制及其与槲皮素之间的疏水相互作用,旨在为构建兼具高载药量、pH 响应释药特性及靶向递送功能的多糖基微乳运载体系提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

皂角米:贵州碧诺美农产品开发有限公司;

聚山梨酯 80(Tween80)、失水山梨糖醇单油酸酯(Span80)、液体石蜡、无水乙醇、丙二醇、丙三醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

苏丹红 III、亚甲基蓝:分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;

玉米油、葵花仁油、橄榄油:佛山市海天调味食品有限公司;

槲皮素:纯度 97%,上海麦克林试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

集热式恒温加热磁力搅拌器:DF-101S 型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

电子天平:YP1002N 型,上海天美天平仪器有限公司;

荧光光谱仪:Cary Eclipse 型,美国安捷伦公司;

纳米粒度仪:ZEN3600 型,英国 Malvern 公司;

离心机:Multifuge X1 Pro 型,赛默飞世尔科技有限公司。

1.3 空白微乳制备方法

采用加水滴定法^[18],以微乳澄清透明度作为筛选指标,于 25℃持续搅拌过程中逐滴加入超纯水。对于高水相区体系,密切观察并记录其由澄清转变为混浊的相变点;对于高油相区体系,记录从混浊变澄清继而再次混浊的双相变点。将所得相变点数据标注于伪三元相图中。当体系呈现稀薄状态,且达到澄清透明或半透明时,判定微乳形成^[19]。

1.3.1 油相的筛选 固定表面活性剂为 Tween80-Span80(质量比 3:2),助表面活性剂为无水乙醇,表面活性剂与助表面活性剂质量比(K_m)为 2:1,水相为超纯水,油相分别选取葵花仁油、橄榄油、花生油、液体石蜡制备空白微

乳,观察相变点,绘制伪三元相图^[20]。

1.3.2 表面活性剂比例的筛选 固定助表面活性剂为无水乙醇, $K_m=2:1$,水相为超纯水,油相为液体石蜡,复配表面活性剂 Tween80-Span80 质量比分别为 4:1,2:1,3:2,1:1,制备空白微乳,观察相变点,绘制伪三元相图。

1.3.3 K_m 值的筛选 固定表面活性剂为 Tween80-Span80 (质量比 3:2),助表面活性剂为无水乙醇,水相为超纯水,油相为液体石蜡, K_m 值分别为 3:1,2:1,1:1,制备空白微乳,观察相变点,绘制伪三元相图。

1.3.4 助表面活性剂的筛选 固定表面活性剂为 Tween80-Span80 (质量比 3:2),油相为液体石蜡, $K_m=2:1$,水相为超纯水,助表面活性剂分别为丙二醇、丙三醇、无水乙醇,制备空白微乳,观察相变点,绘制伪三元相图。

1.4 皂角米多糖微乳制备方法

在最优空白微乳配方基础上,以 5 mg/mL 的皂角米多糖溶液替代超纯水作为水相,采用滴加水相法进行制备,并进一步对助表面活性剂进行筛选。制备方法同空白微乳。

1.5 皂角米多糖微乳质量评价

1.5.1 皂角米多糖微乳类型鉴定 根据水溶性染料亚甲基蓝(蓝色)易在水相中扩散,油溶性染料苏丹红Ⅲ(红色)易在油相中扩散的特点,鉴定微乳类型,若亚甲基蓝的扩散速度快于苏丹红Ⅲ,即皂角米多糖微乳属于水包油(O/W)型,反之则为油包水(W/O)型^[21]。

1.5.2 皂角米多糖微乳粒径、 ζ 电位 皂角米多糖分别经超声处理 0,10,60 min(超声功率 450 W,温度 25℃),得到 3 个不同相对分子质量(973,540,181)的样品,记为 UP0、UP10、UP60,测定皂角米多糖微乳粒径和 ζ 电位^[22]。

1.5.3 皂角米多糖微乳外观性状评价 分别于室温(25℃)、15 000 r/min 离心 15 min,避光静置 1,5,10,30 d 后,对皂角米多糖微乳外观进行性状评价^[23-24]。

1.6 微乳中皂角米多糖与槲皮素的疏水相互作用

芘是一种介质微极性荧光探针,属于稠环芳烃类,其第 1 谱带强度(I1)与第 3 谱带强度(I3)之比反映了所处环境的极性,I1/I3 值降低标志着芘探针进入了疏水性更强的微区^[25]。选用芘作为荧光探针,在适宜的试剂浓度和环境温度下,比较不同超声处理时间下多糖的 I1/I3 值,评估疏水相互作用的增减机理及其对槲皮素浓度的响应情况。

1.6.1 芘试剂浓度的筛选 将 0.1011 g 芘溶于 50 mL 丙酮中,制得浓度为 0.01 mol/L 的芘溶液,用丙酮稀释得到 1.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-6} mol/L 两个浓度,分别与 0.2 g 负载槲皮素的皂角米多糖微乳(槲皮素含量分别为 0.000,0.028,0.056,0.113,0.225,0.451,0.901,1.802 mg/g)混匀,在 50℃水浴下避光静置 30 min,采用荧光光谱仪(激发波长为 339 nm,激发狭缝为 20 nm,发射狭缝为 2.5 nm)检测,

以荧光强度为纵坐标,波长为横坐标绘制谱图^[23]。

1.6.2 环境温度的确定 选用浓度为 1.0×10^{-5} mol/L 的芘试剂,与 0.2 g 负载槲皮素的皂角米多糖微乳(槲皮素含量分别为 0.000,0.028,0.056,0.113,0.225,0.451,0.901,1.802 mg/g)混匀,分别在室温、50℃和 60℃避光水浴 30 min,采用荧光光谱仪检测,以荧光强度为纵坐标,波长为横坐标绘制谱图^[23]。

1.6.3 超声处理时间对发射荧光光谱的影响 选用浓度为 1.0×10^{-5} mol/L 的芘试剂,分别与 0.2 g UP0、UP10、UP60 制成的微乳(槲皮素含量分别为 0.000,0.028,0.056,0.113,0.225,0.451,0.901,1.802 mg/g)混匀,50℃避光水浴 30 min,采用荧光光谱仪测定,以荧光强度为纵坐标,波长为横坐标绘制谱图^[26]。

1.7 数据分析

试验均重复 3 次,结果以“平均值±标准差”表示,借助 MATLAB R2024b 软件,Origin 2023 软件分析绘图。

2 结果与分析

2.1 空白微乳的制备

采用加水滴定法,在观察澄清点过程中发现,微乳形成有时会泛蓝光,与 Liu 等^[23]的观察一致。根据瑞利公式,散射光强度与入射光波长的 4 次方成反比,蓝、紫光的波长较短,其散射作用强;又因人类视觉系统对蓝光更敏感^[27],故而在观察微乳体系时,易察觉其呈现蓝色透亮的现象。

2.1.1 油相的筛选 水油比逐渐增加时,若亲水相的质量低于油相,则亲水相溶解在水相中,并在水相中形成小胶束。这些小胶束开始溶解油相,以进一步扩展胶束分子并逐渐降低油相的质量,从而形成 O/W 型微乳,因此,观察到微乳由澄清变混浊再变澄清的相变点,阴影面积也随之变大。由图 1 可知,油相为液体石蜡时,其阴影面积最大,且液体石蜡作为安全用油,可选作为口服药物或功能性组分的微乳液载体的油相^[28],故确定液体石蜡为油相。

2.1.2 表面活性剂比例的筛选 由图 2 可知,随着 Tween80-Span80 质量比的逐渐减小,阴影面积并无明显变化,因此不能凭肉眼观察直接确定 Tween80 与 Span80 的质量比。

将伪三元相图转为二维笛卡尔坐标系(见图 3),根据三分系统相图的特点,X轴为油相含量不变,Y轴为水相含量的 $\sqrt{3}/2$ 倍(约为 0.866)进行积分并比较大小。积分结果显示,Tween80-Span80 质量比为 3:2 时积分面积最大,更易与油相结合成稳定的体系,故确定 Tween80-Span80 质量比为 3:2。

2.1.3 助表面活性剂的筛选 由图 4 可知,丙三醇为助表面活性剂,其阴影面积明显小于丙二醇和无水乙醇。这

可能是支链羟基增加了醇的空间位阻,使其插入界面膜的阻力增大,而丙二醇和无水乙醇的阴影面积相差较小,需在皂角米多糖微乳的制备中进行复筛。

2.1.4 K_m 值的筛选 由图 5 可知,随着 K_m 的增大,阴影面积区先增大后变小,说明 K_m 值有极大值。当 K_m 为最佳配比时,助表面活性剂正好完全嵌套至表面活性剂中,形成

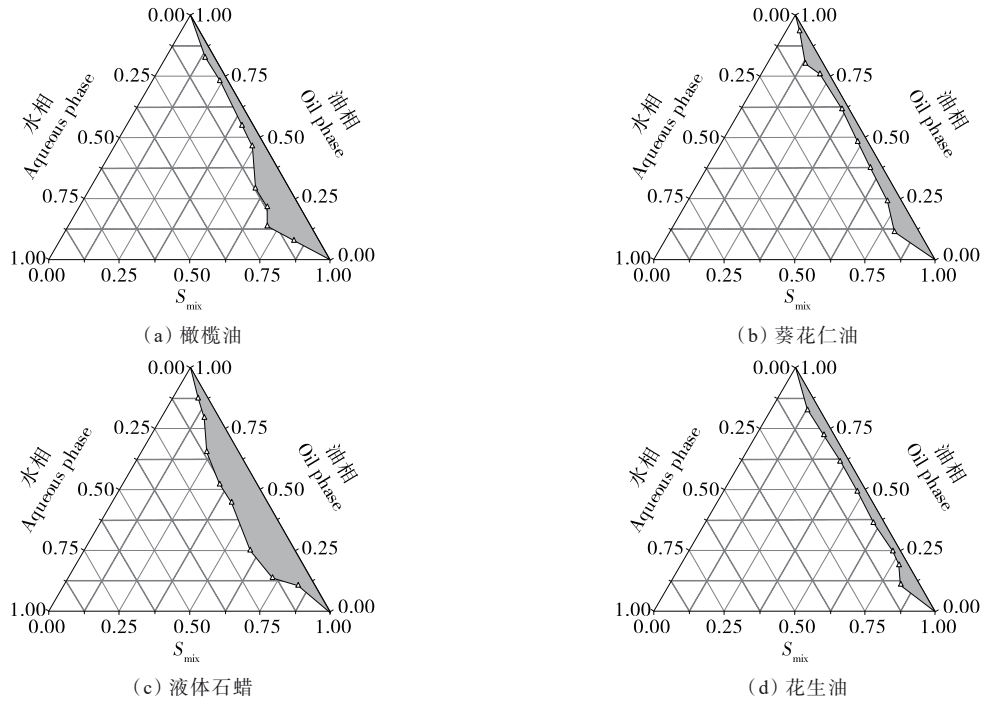


图 1 油相对伪三元相图的影响

Figure 1 Effect of oil phase on pseudo-ternary phase diagram

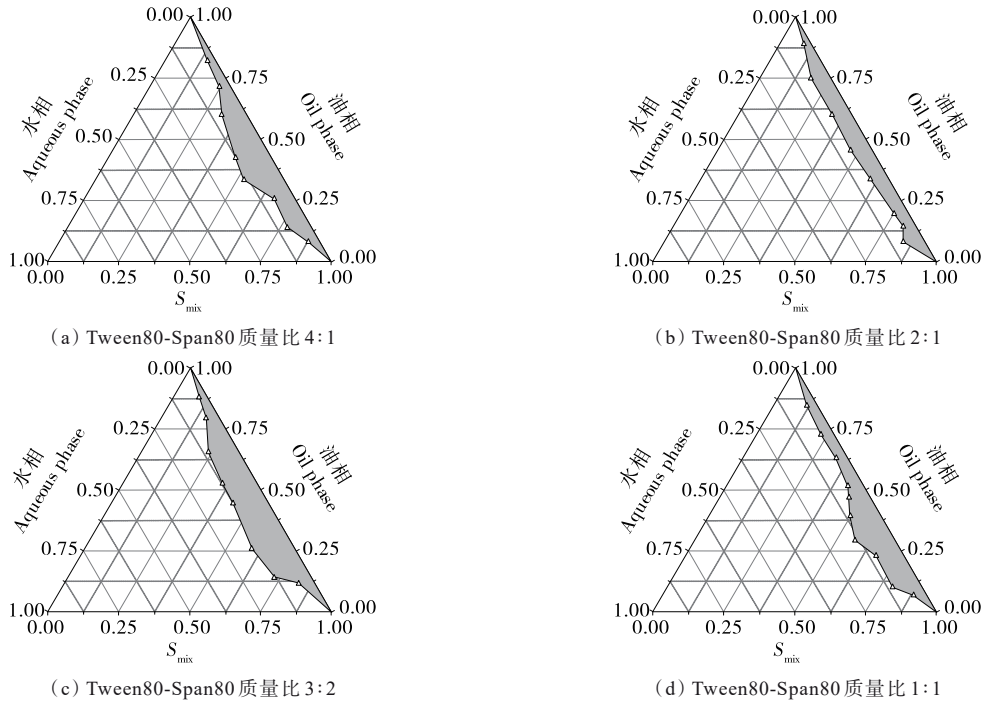


图 2 表面活性剂对伪三元相图的影响

Figure 2 Effect of surfactants on pseudo-ternary phase diagram

的微乳结构中的增溶最大,但随着 K_m 的继续增加,助乳化剂量相对减少则无法形成较大的增溶空间。因此,在表面活性剂为Tween80-Span80(质量比3:2),助表面活性剂为无水乙醇,水相为超纯水,油相为液体石蜡的条件下, K_m 为2:1时的阴影面积更大,故选 K_m 为2:1。

2.2 皂角米多糖微乳的制备

由图6可知,与超纯水相比,皂角米多糖的伪三元相图阴影面积变化更明显,可能是油相与水相密度不同,受重力作用更易破坏其稳定性,且水相因含有皂角米多糖,

乳液的流动性降低^[29],不易产生破乳现象。以丙二醇和无水乙醇作为助表面活性剂时,阴影面积覆盖差别不明显,这是由于醇具有双亲性,部分被吸附入表面活性剂的极性端,并与表面活性剂单分子膜发生相互作用,促进了微乳的形成和稳定,且短链醇(2~3个碳)对油相的溶解能力强,但差别较小,故增加了微乳对油相的增溶,并增大了微乳区。但相较于无水乙醇,丙二醇的流动性差,较为黏稠,微乳液放置一段时间后有明显白色絮状物产生,且微乳稳定性差,与刘欣等^[30]观察到的现象一致,故选用无

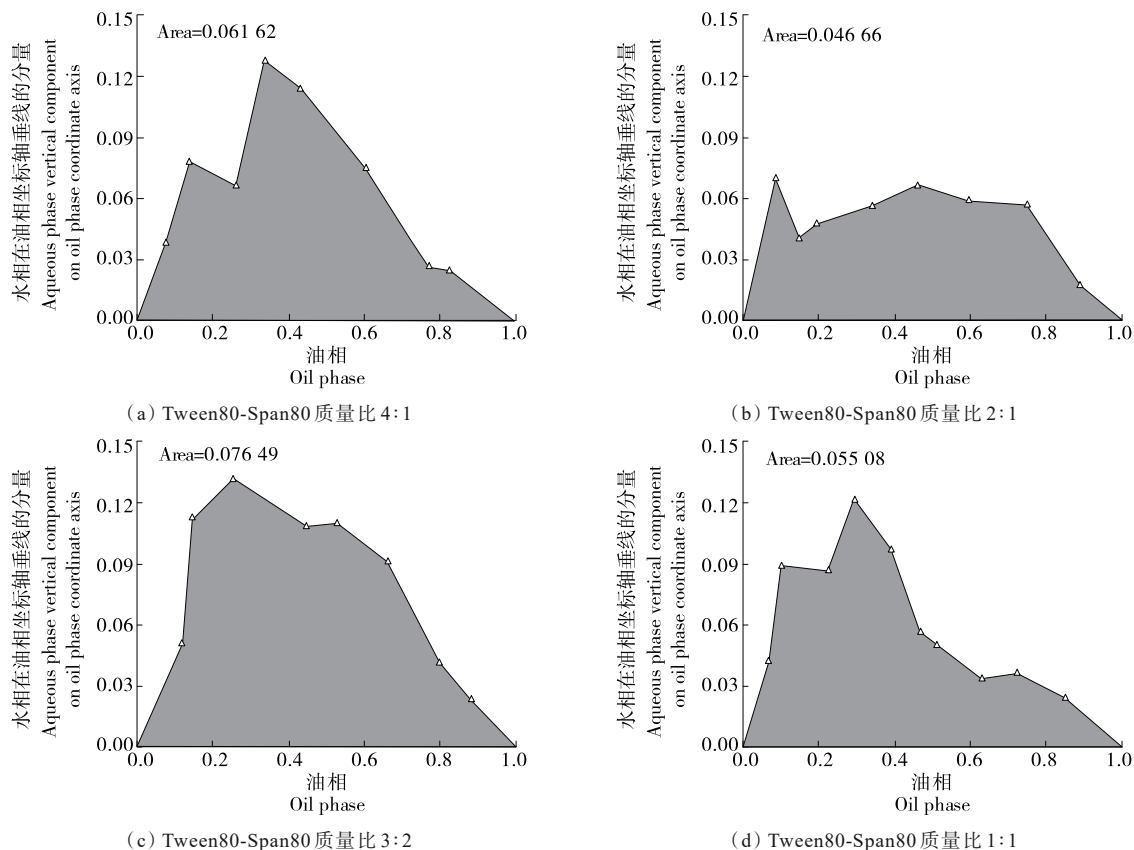


图3 表面活性剂对积分面积的影响

Figure 3 Effect of surfactants on the results of integral area

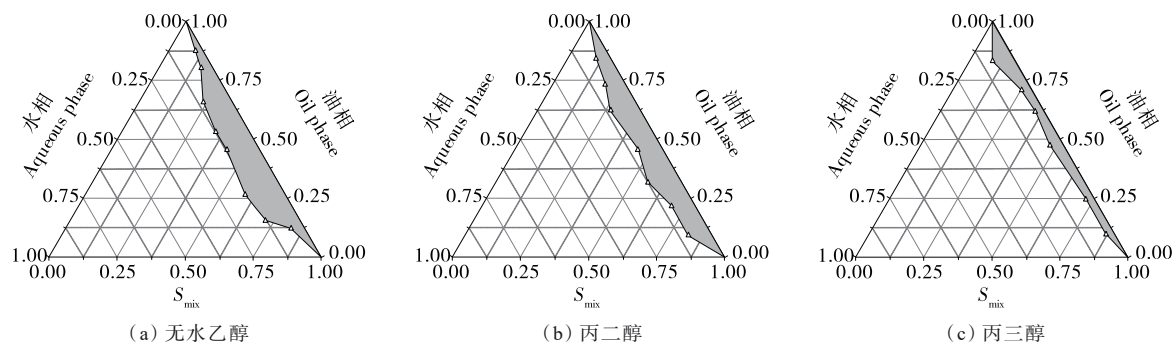


图4 助表面活性剂种类对空白微乳伪三元相图的影响

Figure 4 Effect of cosurfactant type on pseudo-ternary phase diagram of blank microemulsion

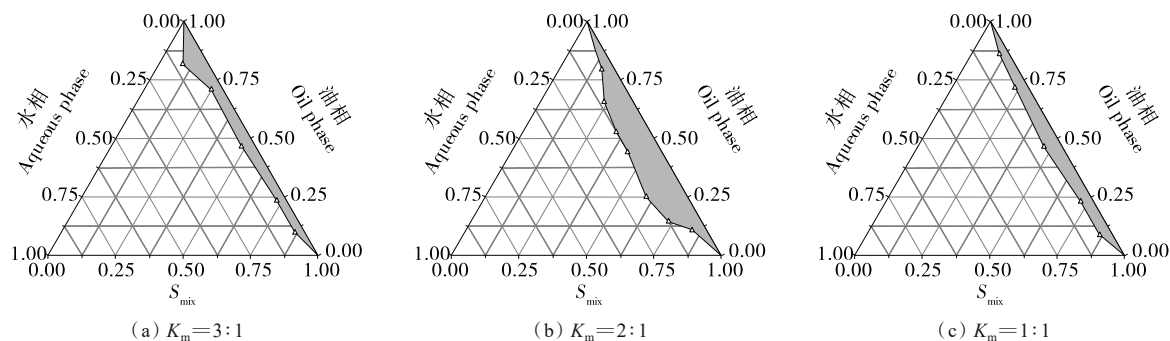
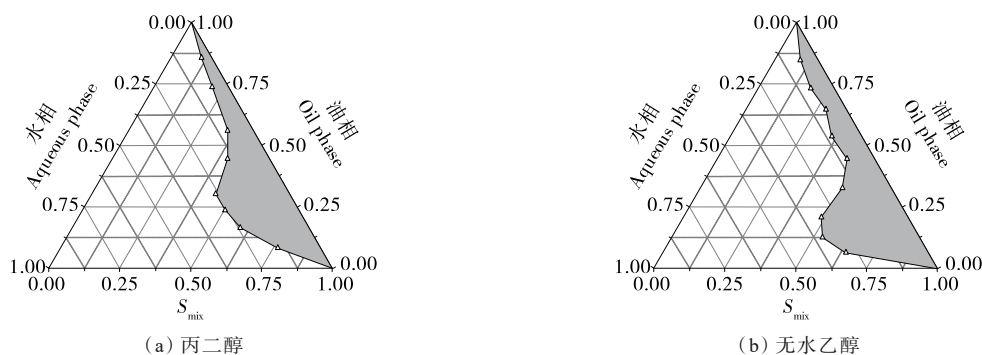
图5 K_m 值对空白微乳伪三元相图的影响Figure 5 Effect of K_m value on pseudo-ternary phase diagram of blank microemulsion

图6 助表面活性剂种类对皂角米多糖微乳伪三元相图的影响

Figure 6 Effect of cosurfactant type on pseudo-ternary phase diagram of polysaccharide microemulsion of *Gleditsia sinensis*

水乙醇作为皂角米多糖微乳的助表面活性剂。综上,皂角米多糖微乳的最终配方为(质量比):Tween80-Span80(质量比 3:2)为 35.4%,无水乙醇为 17.7%,液体石蜡为 13.3%,皂角米多糖溶液(5 mg/mL)为 33.6%。

2.3 皂角米多糖微乳的质量评价

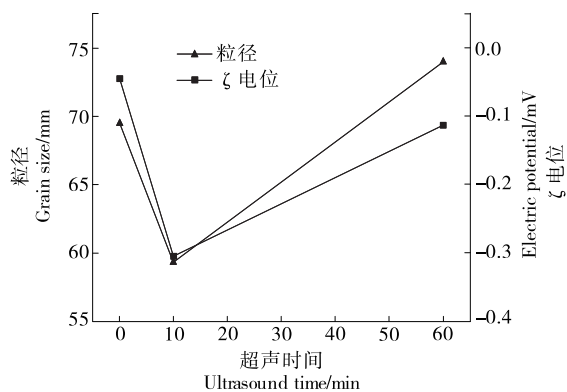
2.3.1 皂角米多糖微乳类型的鉴定 亚甲基蓝在皂角米多糖微乳中的扩散速度快于苏丹红Ⅲ,所以皂角米多糖微乳属于水包油(O/W)型。

2.3.2 皂角米多糖对微乳粒径及 ζ 电位的影响 超声波时间对多糖结构有一定影响^[12],在一定超声波时间内(10 min),微乳体系逐渐呈现清晰透明状态。这是由于超声空化效应破坏了水分子与多糖之间原有的网络结构,使得体系的分散性得到改善^[28]。由图7可知,随着超声时间的进一步延长,微乳体系中出现少量絮状沉淀,推测其原因在于过多的小颗粒发生重新聚集,导致体系稳定性下降,与Cai等^[31]的研究结果一致。因此,为满足后续荧光测试需求,选择1 h作为超声处理时间。此外,当超声处理时间为10 min时,微乳的粒径达到最小值, ζ 电位的绝对值最大。

较小的微乳滴尺寸有利于增加药物的体内吸收,而较低的 ζ 值可以增加微乳的稳定性^[23]。低 ζ 电位情况下

(如绝对值 <30 mV),如果电位值能够增加,即使没有达到30 mV,颗粒之间的排斥也会相对增强,有助于提升系统的稳定性^[29],即胶粒带电荷越多,滑动面与溶液本体之间的电动势之差越大,所以超声时间为10 min时效果更好,更稳定。

2.3.3 微乳外观性状 室温(25℃)、15 000 r/min 离心

图7 不同超声时间下皂角米多糖形成微乳的粒径和 ζ 电位Figure 7 Particle size and ζ -potential of microemulsion formed by polysaccharide of *Gleditsia sinensis* at different ultrasonic time

15 min下,微乳呈淡黄色透明状单相。分别超声 0, 10, 60 min后避光静置 30 d的皂角米多糖微乳仍呈淡黄色透明液体,无浑浊和分层现象,表明皂角米多糖微乳在 30 d内具有良好的稳定性。

2.4 微乳中皂角米多糖与槲皮素的疏水相互作用

2.4.1 芘试剂浓度的筛选

由图 8 可知,当芘浓度为

1.0×10^{-2} mol/L 时,其单体荧光发射谱反映的基态振动能级的精细变化中,最后一个特征振动带宽且波长跨度大,故为避免激发缔合物引起的繁复情形,芘试剂需进行稀释。当芘浓度为 1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-6} mol/L 时,荧光发射光谱显示,芘试剂浓度越大,荧光强度越强,故选择芘浓度为 1.0×10^{-5} mol/L。

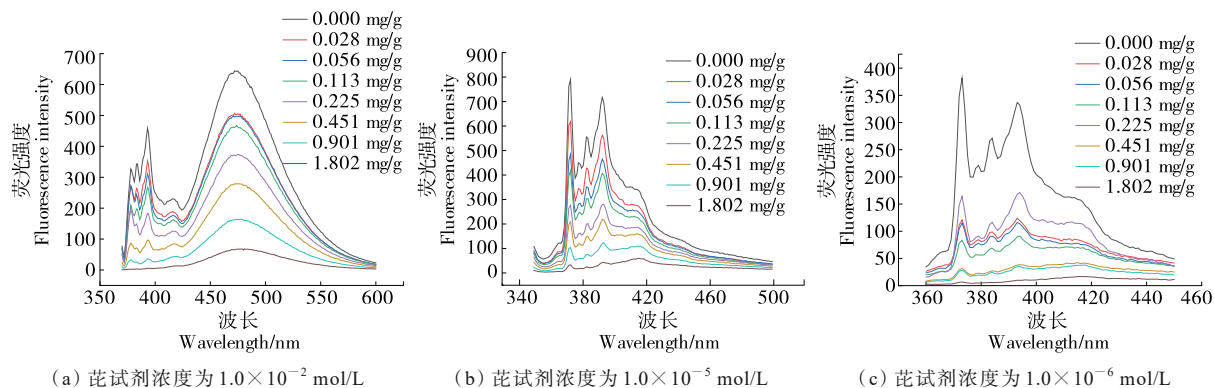


图 8 不同芘试剂浓度的荧光光谱图

Figure 8 Fluorescence spectra of different pyrene reagent concentrations

2.4.2 环境温度的确定 由图 9 可知,当芘浓度为 1.0×10^{-5} mol/L 时,随着环境温度的升高,荧光强度逐渐增加。通过提高环境温度可导致熵协同效应出现,有利于疏水相互作用。同时,环境温度升高促进了芘探针的溶解度并降低了微环境的极性^[32]。当环境温度为 60 °C 时,荧光强度达到满程,为得到荧光强度明显的荧光光谱图,选择环境温度为 50 °C。

2.4.3 超声处理时间对发射荧光光谱的影响 由图 10 和图 11 可知, I1/I3 值增大时,表明槲皮素进入了由 Span80 所形成的非极性区,与 Saponin80 发生疏水相互作用,从而将部分芘探针排斥出该疏水区域,导致非极性区芘含量较低^[26,33]。I1/I3 值减小时,尤其是在 50 °C 及较高槲皮素浓度下,减小的原因可能为:① 升温增强了疏水相互作用,促使 GMs 链构象收缩重叠,与槲皮素结合后形成了更为

致密的疏水微区;② 高浓度槲皮素紧密排列于 GMs 的甘露糖骨架周围,可能屏蔽了骨架本身的疏水位点,同时体系内复杂的分子内与分子间氢键网络共同作用,导致了疏水微区的重构与极化性的改变^[32]。

此外,由图 11 可知,皂角米多糖的相对分子质量是调控其与槲皮素疏水相互作用强度的关键因素。在相同的槲皮素浓度下,皂角米多糖的荧光光谱 I1/I3 值的变化速率随着相对分子质量的减小而逐渐减缓。其原因在于,对皂角米多糖进行超声处理会改变多糖的分子结构,降低多糖相对分子质量,提高多糖的亲水性和溶解性,进而抑制皂角米多糖微乳体系对槲皮素浓度改变的响应^[31-32],这将更有利于实现槲皮素在胃肠道环境中的平稳、可控释放。

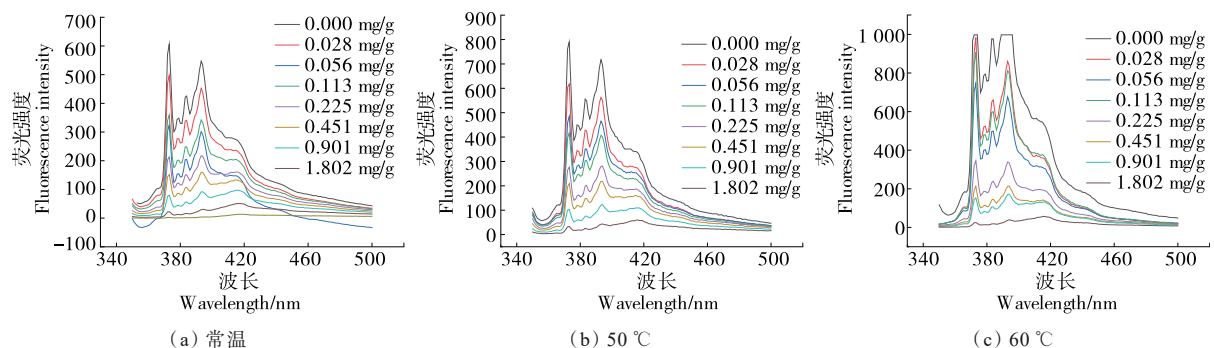


图 9 不同温度下的荧光光谱图

Figure 9 Fluorescence spectra at different temperatures

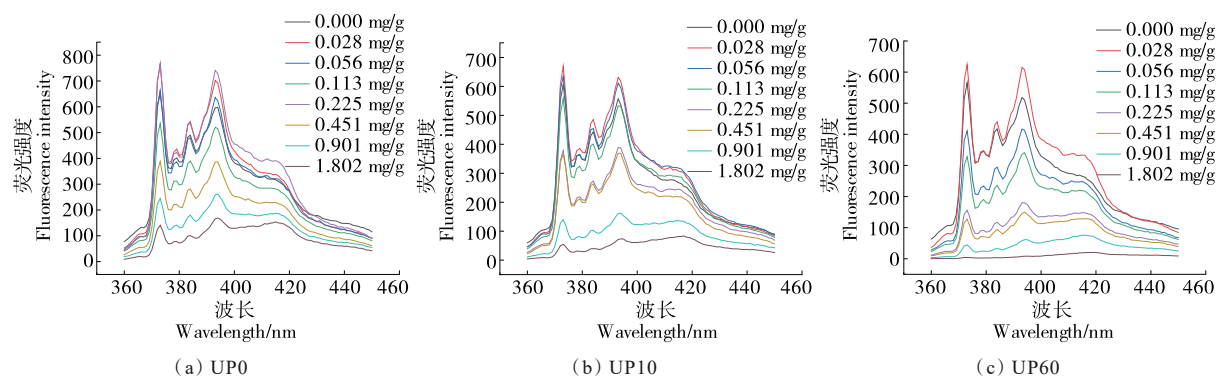


图 10 皂角米多糖槲皮素微乳的荧光光谱

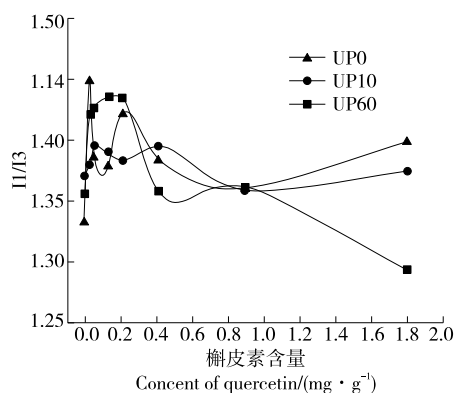
Figure 10 Fluorescence spectra of quercetin microemulsion of polysaccharide from *Gleditsia sinensis*

图 11 皂角米多糖微乳的 I1/I3 值随槲皮素含量的变化情况

Figure 11 Variation of the I1/I3 value of the *Gleditsia sinensis* polysaccharide microemulsion with the content of quercetin

3 结论

将皂角米多糖引入表面活性剂微乳体系,筛选出 O/W 型皂角米多糖微乳的最佳制备工艺和配方。结果表明,以超声处理 10 min 皂角米多糖为原料制备的微乳粒径更小,ζ 电势绝对值更大,稳定性更佳。结合荧光探针技术,揭示经超声处理得到的低相对分子质量皂角米多糖形成的微乳可显著抑制疏水相互作用对槲皮素浓度的响应,有利于实现槲皮素在胃肠道环境中的平稳、可控释放。后续将聚焦于皂角米多糖分子结构(如半乳糖/甘露糖比例)对微乳性能的影响,开展槲皮素在微乳中的体外释放及体内生物利用度研究。

参考文献

- [1] Xie X X, Wei Y. A review on anti-cancer properties of quercetin in gastric cancer[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2025, 16: 1563229.
- [2] Ścibior A. Overview of research on vanadium-quercetin complexes with a historical outline[J]. *Antioxidants*, 2022, 11

(4): 790.

- [3] Booravilli J, Sirisolla J D. Assessment of cytotoxic effects of quercetin nanoemulgel on different skin cancer cell lines[J]. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 2025, 51(7): 771-785.
- [4] 陈杨玲, 焦叶, 崔波, 等. 蛋白基植物多酚纳米输送载体研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(4): 8-14.
Chen Y L, Jiao Y, Cui B, et al. Research progress of protein-based plant polyphenol nano-delivery carriers[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(4): 8-14.
- [5] Ramos M, Mellinas C, Solaberrieta I, et al. Emulsions incorporated in polysaccharide-based active coatings for fresh and minimally processed vegetables[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 665.
- [6] Zhang J, Michniak-Kohn B B. Investigation of microemulsion and microemulsion gel formulations for dermal delivery of clotrimazole[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2018, 536(1): 345-352.
- [7] Kajbafvala A, Salabat A, Salimi A. Formulation, characterization, and *in vitro/ex vivo* evaluation of quercetin-loaded microemulsion for topical application[J]. *Pharmaceutical Development and Technology*, 2018, 23(8): 741-750.
- [8] Guo J X, Qiu Y, Zhang J, et al. A review on polysaccharide-based delivery systems for edible bioactives: pH responsive, controlled release, and emerging applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 291: 139178.
- [9] Salman A A. Sugar-based emulsifiers: sustainable molecules with great potential[J]. *Carbohydrate Research*, 2025, 553: 109504.
- [10] Lang W, Mondol D, Trakooncharoenvit A, et al. Formulation and evaluation of a novel megalomeric microemulsion from tamarind seed xyloglucan-megalosaccharides for improved high-dose quercetin delivery[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 137: 108430.
- [11] Xiao F, Zhao Y, Wang X R, et al. Metabolite components and nutritional composition of the endosperm in seven species from *Gleditsia*[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 22: 101340.

- [12] Busch V M, Pepa L S, Panizzolo L A, et al. Effect of ultrasound and enzymatic hydrolysis on the physicochemical properties of *Neltuma ruscifolia* seed gum and other galactomannan gums[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(8): 2 380-2 392.
- [13] Niknam R, Mousavi M, Kiani H. A comparative study on the emulsifying and foaming aspects of *Gleditsia caspica* galactomannan (as a new source of hydrocolloid), fenugreek galactomannan, and xanthan gum mixtures[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2022, 46(12): e17205.
- [14] Tang Z W, Debnath A, Li S Q, et al. Polysaccharide-based beads and water purification: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 319: 145382.
- [15] 蒲龙林, 吴雯雯, 易先德, 等. 黄原胶—皂角米多糖 Pickering 乳液超声辅助制备工艺优化及稳定性分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(10): 174-185.
- Pu L L, Wu W W, Yi X D, et al. Optimization of ultrasonic-assisted preparation process and stability analysis of xanthan gum and *Gleditsia sinensis* seed polysaccharide Pickering emulsion[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 174-185.
- [16] Pokhrel D R, Sah M K, Gautam B, et al. A recent overview of surfactant-drug interactions and their importance[J]. RSC Advances, 2023, 13(26): 17 685-17 704.
- [17] 蒲龙林, 姚秋萍, 吴雯雯, 等. 皂角米多糖纯化工艺及吸湿保湿特性研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(12): 154-160.
- Pu L L, Yao Q P, Wu W W, et al. Study on purification process and moisture absorption and moisture retention characteristics of *Gleditsia sinensis* seed polysaccharides[J]. Food & Machinery, 2024, 40(12): 154-160.
- [18] Wang D Q, Yin D Y, Wang J D, et al. Influencing factors and microscopic formation mechanism of phase transitions of microemulsion system[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2022, 12(10): 2 735-2 746.
- [19] Wolska E, Sznitowska M, Chorążewicz J, et al. Microscopic and biopharmaceutical evaluation of emulsion and self-emulsifying oil with cyclosporine[J]. Pharmaceuticals, 2023, 16(12): 1 713.
- [20] 蔡程晨, 朱式业, 熊武国, 等. 猕猴桃籽油微乳液的制备及货架期预测[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 127-132.
- Cai C C, Zhu S Y, Xiong W G, et al. Preparation of kiwi fruit seed oil micro-emulsion and its shelf life prediction[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 127-132.
- [21] Wang B Y, Cai T G, Liu Q, et al. Preparation and evaluation of spirulina polysaccharide nanoemulsions[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2018, 42(3): 1 273-1 282.
- [22] Niknam R, Mousavi M, Kiani H. Comprehensive evaluation of emulsifying and foaming properties of *Gleditsia caspica* seed galactomannan as a new source of hydrocolloid: effect of extraction method[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107758.
- [23] Liu H F, Mei J A, Xu Y, et al. Improving the oral absorption of nintedanib by a self-microemulsion drug delivery system: preparation and in vitro/in vivo evaluation[J]. International Journal of Nanomedicine, 2019, 14: 8 739-8 751.
- [24] Wang A Y, Zhong Q X. Properties and mechanisms of O/W emulsions stabilized by shellac and xanthan gum at acidic pH [J]. Food Chemistry, 2025, 475: 143352.
- [25] Zheng Y Q, Bao Z J, Fan Y X, et al. Spectrometric study on the hydrophobic hydration in the formation of Tween-60 micelles with curcumin[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 370: 121065.
- [26] Yang J, Zhou Q W, Huang Z H, et al. Mechanisms of *in vitro* controlled release of astaxanthin from starch-based double emulsion carriers[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106837.
- [27] Li K S, Nagai T. Increasing magnitude of color differences amplifies category effects[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 13665.
- [28] 王鑫, 罗钰, 修伟业, 等. 甜玉米芯多糖纳米乳制备与评价 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 124-133.
- Wang X, Luo Y, Xiu W Y, et al. Preparation and evaluation of sweet corn cob polysaccharide nano emulsion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 124-133.
- [29] Xu X F, Liu W, Luo L P, et al. Influence of anionic polysaccharides on the physical and oxidative stability of hydrolyzed rice glutelin emulsions: impact of polysaccharide type and pH[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 185-194.
- [30] 刘欣, 周志磊, 毛健. 玫瑰精油微乳制备及性质研究[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(5): 79-85.
- Liu X, Zhou Z L, Mao J. Preparation and characterization of rose essential oil microemulsion and tested its characteristic[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(5): 79-85.
- [31] Cai W D, Hu T, Cai W F, et al. Ultrasound-induced changes in rheological behavior and hydrophobic microdomains of *Lignosus rhinocerotis* polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 213: 565-573.
- [32] Zhang X, Dai L X, Li P F, et al. Characterization of hydrophobic interaction of galactomannan in aqueous solutions using fluorescence-based technique[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 267: 118183.
- [33] Guo Q, Ye A Q, Lad M, et al. Effect of gel structure on the gastric digestion of whey protein emulsion gels[J]. Soft Matter, 2014, 10(8): 1 214-1 223.