

pH调控下黄芪多糖油脂体乳液的稳定性及理化特性分析

曲浩雯，付泽世，郑晓艳，蒋南玥，卢洪亮，李萌*
(东北农业大学食品学院，乳品科学教育部重点实验室，黑龙江哈尔滨 150030)

摘要：为了探讨不同 pH 值条件下（3、5、7 和 9）黄芪多糖（*Astragalus Polysaccharide*, APS）对大豆油脂体（Soybean Oil Body, SOB）乳液稳定性、理化性质及储存期间（28 d）抗氧化的影响,该研究以大豆和黄芪多糖为原料制备了黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液，并利用粒径分布、zeta 电位、乳液稳定性等指标对乳液体系进行了表征。结果表明，pH 值显著影响黄芪多糖复合乳液的乳化性能和乳液的稳定性。在 pH 值为 9 的条件下，复合乳液表现出最小的粒径，为 804.29 nm，且在储藏 14 d 后，未出现明显的分层现象。随着存储时间延长至 28 d，pH 值为 9 时的复合乳液在氢过氧化物、Tbars、酸价方面仍保持最低水平，分别为 8.83 mmol·kg⁻¹，4.99 μmol·kg⁻¹ 和 3.90 mg·g⁻¹。综上所述，该研究得出碱性环境下更有利于黄芪多糖-大豆油脂体的稳定的结论，为开发高稳定性、抗氧化功能型乳液基食品提供了理论基础与技术参数。

关键词：大豆油脂体；黄芪多糖；乳液稳定性；氧化

文章编号：1673-9078(2026)6-229-236 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.6.0292

Stability and Physicochemical Properties of *Astragalus Polysaccharide* and Soybean Oil Body Emulsion under pH Control

QU Haowen, FU Zeshi, ZHENG Xiaoyan, JIANG Nanyue, LU Hongliang, LI Meng*

(College of Food Science, Key Laboratory of Dairy Science, Ministry of Education, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The effects of different pH values (3, 5, 7, and 9) on the stability, physicochemical properties, and antioxidant capacity of *Astragalus polysaccharide* and soybean oil body (APS-SOB) composite emulsions during 28-day storage were investigated. Composite emulsions were prepared from soybean and APS and characterized through indicators such as particle size distribution, zeta potential, and emulsion stability. pH significantly influenced the emulsifying performance and stability of APS composite emulsions. At pH 9, the composite emulsion had the smallest particle size (804.29 nm), and no significant phase separation was observed after 14 days of storage. When the storage period was extended to 28 days, the composite emulsion maintained the lowest levels of hydroperoxides (8.83 mmol·kg⁻¹), Tbars (4.99 μmol·kg⁻¹), and acid value (3.90 mg·g⁻¹) at pH 9, concluding that alkaline conditions were more favorable for APS-SOB composite emulsion stability, providing theoretical support and technical parameters for developing high-stability, antioxidant functional emulsion-based foods.

Key words: soybean oil body; *Astragalus polysaccharide*; emulsion stability; oxidation

引文格式：

曲浩雯,付泽世,郑晓艳,等.pH调控下黄芪多糖油脂体乳液的稳定性及理化特性分析[J].现代食品科技,2026,42(6):229-236.

QU Haowen, FU Zeshi, ZHENG Xiaoyan, et al. Stability and physicochemical properties of *Astragalus polysaccharide* and soybean oil body emulsion under pH control [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(6): 229-236.

收稿日期：2025-03-03；修回日期：2025-05-16；接受日期：2025-05-19
作者简介：曲浩雯（1999-），女，硕士研究生，研究方向：乳成分能与营养，E-mail: qheloise@126.com
通讯作者：李萌（1980-），女，博士，副研究员，研究方向：乳成分能与营养，E-mail: limeng@neau.edu.cn

大豆油脂体 (Soybean Oil Body, SOB) 是存在于大豆种子细胞中的天然脂质储存结构^[1,2], 含有约 0.6 wt.%~3.0 wt.% 的蛋白质、0.6 wt.%~2.0 wt.% 的磷脂和 94.0 wt.%~98.0 wt.% 的甘油三酰基酯。完整、稳定且独立的 SOB 结构主要由磷脂分子的头部、指向细胞质的尾部以及磷脂分子层表面组成, 该表面存在膜蛋白, 也称为内在蛋白^[3,4]。膜蛋白的疏水区域延伸至磷脂单分子层的疏水酰基部分和油体内的 TAG 中, 形成“锚定”结构, 可以保护 SOB 抵抗环境压力^[5], 这使得 SOB 比传统的蛋白质乳剂更稳定。另外, SOB 富含有益的脂溶性活性成分, 如生育酚等, 也赋予其良好的功能特性。不过, 单一 SOB 的稳定性仍易受多种因素影响, 限制了其部分应用。近年来, 天然多糖因其安全性、可修饰性及多重功能特性 (如界面吸附、空间位阻效应、抗氧化活性), 成为替代合成乳化剂的研究热点^[6,7]。然而, 多糖的稳定性能高度依赖于其分子结构 (如分子量、官能团组成) 及环境条件 (如 pH 值、离子强度), 亟需筛选兼具物理稳定与抗氧化功能的天然多糖, 并系统解析其构效关系与环境响应机制。

黄芪多糖 (Astragalus Polysaccharide, APS)——一种从传统药用植物黄芪中提取的生物活性杂多糖——因其独特的结构和功能特性, 在乳液科学中具有重要研究价值。APS 主要由鼠李半乳糖醛酸聚糖 II 和 α -(1 $\rightarrow$ 4)-葡聚糖组成, 形成分子量为 10^4 ~ 10^6 Da 的高度分支结构^[8]。其分子结构整合了亲水基团 (如羟基和羧基) 与疏水区域 (如非极性糖环), 能够有效吸附于油水界面以降低界面张力, 并形成机械强度较高的界面膜^[9]。此外, APS 的高分子量和分支构象可产生空间位阻效应, 显著抑制液滴聚集^[10]。值得注意的是, APS 具有 pH 响应特性: 其羧基质子化状态随 pH 变化, 可能调控界面电荷及膜的粘弹性^[11]。这些特性使 APS 成为一种多功能乳化剂, 能够为乳液体系提供物理稳定性和抗氧化保护。

尽管多糖基乳化剂的研究日益增多, 但针对 APS 的探索仍十分有限, 尤其是在不同 pH 条件下与天然油脂体 (如大豆油脂体, SOB) 的相互作用机制尚未明晰。现有研究多集中于合成乳液或单一组分体系^[12], 尚未揭示 APS 如何与天然油脂体蛋白协同稳定复杂乳液。此外, APS 在脂质体系中的 pH 依赖性抗氧化机制 (对抑制储存期间的氧化降解至关重要) 仍未被探索。为填补上述知识空白, 本研究系统探讨 APS 在稳定 SOB 乳液中的双重作用: (1) 作为 pH 调控的界面稳定剂; (2) 作为脂质氧化的抗氧化抑制剂。通过关联 pH 值 3~9 条件下的乳液稳定性指标 (Zeta 电位、

粒度) 与氧化标记物 (氢过氧化物、TBARS、酸价), 我们阐明了 APS 在多组分乳液体系中的构效关系。这项工作不仅深化了对植物多糖-蛋白质相互作用的基础理解, 还为设计适用于功能性食品的天然乳化剂提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

大豆购自东农大豆研究所 (中国哈尔滨), 该品种为本地筛选的“68 号品种”, 其粗脂肪含量为 16.89% (干基), 蛋白质含量为 43.29%。APS 购自上海源叶科技有限公司 (中国上海), 纯度为 $\geq 90\%$ 。所用的其他试剂均为分析级。所有实验均使用去离子水。

1.2 主要仪器与设备

PL-2002 型电子天平, Merck Toledo 公司; TCS sp² AOBs 型激光共聚焦电子显微镜, Leica 公司; pH S-3C 型 pH 计, Sartorius 公司; Nano-ZS90 型激光粒度仪, Malvern 公司; RST 流变仪, 美国 Brookfield 公司; F-4500 荧光分光光度计, 日本日立公司。

1.3 实验方法

1.3.1 SOB 的制备

SOB 的提取步骤参照 Tzen 等^[13]的方法, 并进行改进。具体来说, 大豆种子经预冷蒸馏水 (料液比 1:5, m/V) 于 4 $^{\circ}\text{C}$ 低温浸渍 20 h 完成水化。充分溶胀后, 与提取缓冲液 ($0.8\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl, $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl, $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 蔗糖, 料液比 1:5, m/V) 混合均质, 调节 pH 值为 7.5, 经胶体磨破碎细胞后, 进行初滤及离心 ($10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4 $^{\circ}\text{C}$, 30 min), 此分离步骤连续循环三次以富集界面组分。收集离心管顶部分层的乳脂层, 按 1:5 (m/V) 比例重悬于纯化缓冲液 ($50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl, pH 值为 7.5) 中进行二次纯化离心 (参数同上), 重复三次后获得高纯度 SOB 初级提取物。为进一步灭活内源酶活性, 将 SOB 悬浊液置于 80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴中热处理 20 min, 终产物经快速冷却后于 4 $^{\circ}\text{C}$ 低温保存待用。经 BCA 法测定 SOB 蛋白含量为 21.38%。

1.3.2 黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液的制备

配制质量分数 0.1% 的 APS 水相体系, 掺混 10 wt.% 比例的 SOB 分散相, 采用高速剪切乳化机 ($10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min) 完成预乳化处理, 获得均质化复合乳液。初乳化体系经 24 h 室温静置后, 转入 4 $^{\circ}\text{C}$ 低温环境过夜。待体系复温至 25 $^{\circ}\text{C}$ 后, 通过微量滴定

法 ($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 或 NaOH 溶液) 对乳液进行 pH 值梯度调节 (pH 值为 3.0、5.0、7.0、9.0), 并按定期节点完成稳定性指标检测。

1.3.3 Zeta 电位

Zeta 电位由 NANO-A-ZS90 粒度电位分析仪测定。乳液的体积分数用 PBS 按照 1:1 000 稀释, 取 1 mL 稀释乳液加入电位杯中, 设置温度 25°C , 散射角度为 90° , 重复次数 10 次。乳液颗粒和水性分散介质的折射率分别为 1.46 和 1.33。

1.3.4 粒度的测定

粒度由激光粒度仪 Mastersizer 3000E 定量表征, 取原始乳液经 PBS 按 1:500 (V/V) 实施稀释, 取 1 mL 加入粒径杯中, 设置温度 25°C , 散射角度为 90° , 重复次数 10 次。

1.3.5 超高分辨显微镜观察

基于 GE Delta Vision OMX SR 超分辨显微系统, 进行观察分析。取 2 mL 稀释样品与 $80 \mu\text{L}$ 复合荧光染料工作液 (含 0.02 wt.% 尼罗红、0.1 wt.% 尼罗蓝) 轻柔涡旋混匀, 取 $10 \mu\text{L}$ 滴加至载玻片。采用 Ar/Kr 激光器 (激发波长 488 nm) 与 He/Ne 激光器 (激发波长 630 nm) 进行观察。

1.3.6 乳化性质

将 $20 \mu\text{L}$ 待测乳液与 4.98 mL SDS (0.1 wt.%) 混匀。于紫外可见分光光度计 500 nm 波长处测定初始吸光度在 500 nm 波长下测定吸光度 A_0 , 样品静置 30 min 后复测吸光度 A_{30} , 以 SDS 溶液作为空白, 根据公式 (1) 和 (2) 计算:

$$EAI = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{c \times \varphi \times 10000} \quad (1)$$

$$ESI = \frac{A_0}{A_0 - A_{30}} \times 30 \quad (2)$$

式中:

EAI ——乳化活性指数, $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;

ESI ——乳化稳定性指数;

N ——稀释倍数, 250;

c ——蛋白质水溶液质量浓度, $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$;

φ ——油相体积分数。

1.3.7 浊度

将复合溶液稀释 100 倍, 在 25°C 下用紫外可见分光光度计在 600 nm 波长处测量浊度, 以去离子水为校准。

1.3.8 静态流变学特性

在室温下使用流变仪 60 mm 夹具, 狭缝为 $500 \mu\text{m}$ 。测定剪切速率在 0.1 至 100 s^{-1} 之间变化并确定了乳液

的粘度和剪切应力。

1.3.9 乳液絮凝稳定性

取 10 mL 样品放入样品瓶中, 然后在 25°C 下储存 14 d 和 28 d 以建立动力学平衡。乳液絮凝稳定性通过底部澄清相的高度随时间的变化来量化。计算公式 (3) 如下:

$$CI = \frac{H_1}{H_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

CI ——乳化指数;

H_1 ——乳液澄清相高度;

H_2 ——乳液总高度。

1.3.10 过氧化值的测定

基于硫氰酸盐比色法测定乳液体系过氧化值 (Peroxide Value, PV), 取 1 mL 待测乳液与 5 mL 混合溶剂 (异辛烷: 异丙醇 = 2:1, V/V) 振荡混匀; 实施低温高速离心 ($10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 4°C , 5 min) 分层, 移取 1 mL 上层备用。向萃取液中依次加入 $20 \mu\text{L}$ 新鲜配制的氯化亚铁溶液与硫氰酸钾溶液, 涡旋混合后避光静置 20 min; 加入 5 mL 混合剂 (甲醇: 正丁醇 = 2:1, V/V), 充分振荡终止反应。于 510 nm 波长处测定吸光度值, 并按下式 (4) 计算:

$$PV = \frac{0.5 \times A \times k \times n}{55.86 \times 2 \times m} \quad (4)$$

式中:

PV ——过氧化值, $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$;

A ——样品吸光度;

k —— Fe^{3+} 标准曲线斜率;

m ——样本中油脂质量, mg ;

n ——上清液体积分数, %。

1.3.11 TBARS值的测定

移取 1 mL 待测乳液与 2 mL TBA 工作液 (含 0.375 g TBA、 15 g 三氯乙酸、 1.76 mL 浓盐酸的显色体系, 定容 100 mL) 涡旋振荡混匀。置于恒温沸水浴 ($100 \pm 0.5^\circ\text{C}$) 加热 25 min, 期间每 5 min 手动摇晃防止局部过热; 反应终止后于 4°C 冰浴, 转移至离心管离心 ($12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 4°C , 10 min), 移取 1.5 mL 上清液于 532 nm 波长处测定特征吸光度。基于四乙氧基丙烷标准曲线 (线性方程 $y = 0.5805x - 0.0613$, $R^2 = 0.9965$) 计算 TBARS 值。

1.3.12 酸价的测定

取 1 mL 样品至 5 mL 正丁醇和 95% 乙醇 (1:1, V/V) 中, 加入酚酞指示剂, 用氢氧化钾溶液滴定, 至溶液呈粉红色且 30 s 内不褪色, 记下消耗溶液的体积

V 。以不添加油脂体为空白实验,记下消耗溶液的体积 V_0 ,根据公式(5)计算:

$$X_{AV} = \frac{(V - V_0) \times C \times 56.1}{0.42} \quad (5)$$

式中:

X_{AV} ——酸价, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;

V ——氢氧化钾消耗的体积, mL ;

V_0 ——空白测定氢氧化钾消耗的体积, mL ;

C ——标准溶液的摩尔浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$;

56.1——氢氧化钾的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

1.4 数据处理

所得数据用 SPSS Statistics 24 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行方差分析; $P < 0.05$ 表示差异显著, $P > 0.05$ 表示差异不显著; Origin 2022 (Northampton, MA, USA) 作图。

2 结果与分析

2.1 pH值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液稳定性的影响

乳液稳定性可以最直观的看到乳液的聚集或凝结程度。pH 值会影响油脂体表面的电荷,进而影响颗粒大小、电位、表面疏水性和乳化活性。由图 1 可知室温贮存 14 d 后, pH 值 3 和 5 的乳液出现显著分层, pH 值 7 的乳液出现微弱分层,而 pH 值 9 的乳液稳定性良好,未出现明显的絮凝分层现象。具体来说, pH 值为 3 时的 SOB 表面蛋白带正电荷 ($\text{pH} < \text{pI}$),与带负电的 APS 通过静电吸引形成复合物,静电复合物可以抑制 SOB 的聚集,但同时酸性条件下也会导致 APS 部分质子化,削弱其空间位阻作用,因此在长期储存后出现相分离^[14]。pH 值为 5 时,此时的 pH 值接近 SOB 表面蛋白的等电点,疏水相互作用会作为主导, SOB 与 APS 通过疏水-亲水微区嵌合形成胶束样结构,但由于静电排斥不足,从而导致乳液出现轻微絮凝^[15]。pH 值为 7 时, APS 与 SOB 表面蛋白通过氢键与范德华力协同发挥作用,形成松散复合物,在储存短期范围内,稳定性相对良好。在 pH 值为 9 时,由于 SOB 表面蛋白带负电 ($\text{pH} > \text{pI}$) 与 APS 阳离子基团之间形成的离子键,以及疏水作用共同发挥作用,使得此时的乳液更加稳定^[16]。

2.2 浊度

浑浊度表明不溶性复合物的形成。如图 10 所示,黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液的浊度在 pH 值 5 时显著升高。这种增加可归因于 APS 和 SOB 表面蛋白之间发生的静电相互作用。当 pH 值变为 9 时,复合乳液浊度明显降低,这是由于静电斥力增强,阻碍了乳液颗粒的絮凝,导致低浊度。

2.3 粒度

pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液粒度的影响如图 1 所示。从图 3 可知,粒径的大小随 pH 值的变化而变化, pH 值 3、5 条件下的复合乳液粒径分别为 1 879.28、2 376.99 nm,均显著高于 pH 值 7 (1 078.38 nm) ($P < 0.05$),而 pH 值 9 的粒径为 804.29 nm,显著低于其他 pH 值条件下的粒径 ($P < 0.05$)。粒径较高的乳液通常表现较低的稳定性,这主要与蛋白质之间的静电斥力较弱有关。APS 的长链结构可以通过空间位阻效应抑制 SOB 颗粒的聚集,另外 APS 的亲水性有助于 SOB 形成更稳定的复合网络结构,当 pH 值为 9 时,由于表面蛋白电荷量增多,电荷排斥增强,减小了 SOB 油滴的粒径^[17]。

2.4 Zeta 电位

pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液 Zeta 电位的影响如图 4 所示。pH 值 3、5 条件下的复合乳液 Zeta 电位分别为 -35.66、-24.20 mV,电位绝对值小于 30 的乳液时不稳定的,由此可以看出 pH 值 5 的乳液稳定性较差,这是因为 pH 值 5 时液滴表面的负电荷量减少,液滴间的斥力减弱。而 pH 值 9 乳液的 Zeta 电位为 -52.38 mV 显著高于 pH 值 7 条件下复合乳液的电位 (-41.63 mV) ($P < 0.05$)。这很可能是由于在 pH 值高于 pI 时,蛋白之间的静电斥力增大,阻止液滴之间的聚集。根据 Liu 等^[4]的研究,SOB 的 pI 为 4~5 之间。当 pH 值为 9 时,APS 的羧基和硫酸基团完全电离,赋予其强负电性,与 SOB 界面蛋白 ($\text{pH} > \text{pI}$ 时带负电) 形成同电荷排斥。另外 APS 通过吸附在 SOB 表面形成双层结构,进一步增强了体系的总负电荷密度,阻止液滴间的聚集。此现象与文献报道的多糖-油脂体复合物界面电荷调控机制一致^[18]。

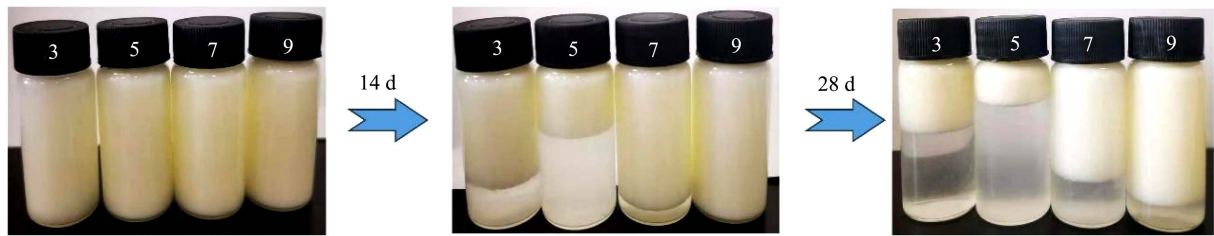


图 1 pH 值对黄芪多糖 – 大豆油脂体复合乳液稳定性的影响

Fig.1 Effect of pH values on the stability of *Astragalus* polysaccharide and soybean oil complex emulsion

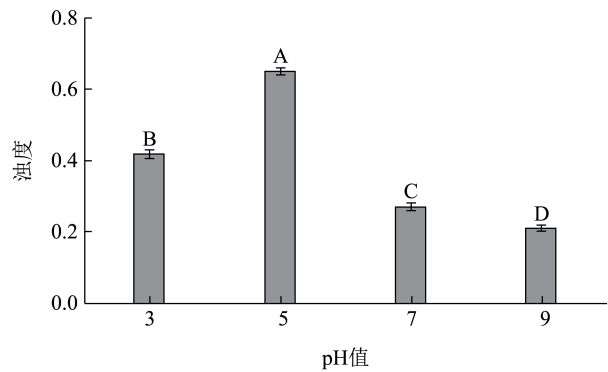


图 2 pH 值对黄芪多糖 – 大豆油脂体复合乳液浊度的影响

Fig.2 Influence of pH values on turbidity of *Astragalus* polysaccharide and soybean oil body complex emulsion

注：图中不同字母表示差异有统计学意义 ($P<0.05$)，下同同理。

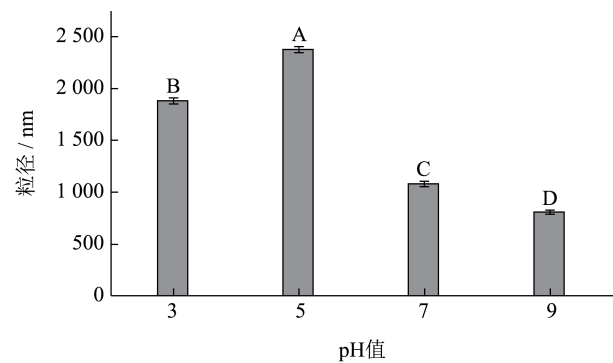


图 3 pH 值对黄芪多糖 – 大豆油脂体复合乳液粒度的影响

Fig.3 Effect of pH values on particle size of *Astragalus* polysaccharide-soybean oil complex emulsion

2.5 微观结构

图 5 展示了不同 pH 值下 SOB 与 APS 复合乳液的微观结构。红色区域代表着油相，绿色区域代表蛋白相。液滴呈亚球型结构，可表示油滴被 SOB 表面的蛋白包裹，可以起到抵抗外界环境的作用。而在 pH 值 3 及 5 条件下，图中圆圈区域，可以观察到单独的油滴出现，并未被蛋白包裹，这表示此时的 pH 值下存在液滴聚集和较低的乳液稳定性。更为重要的是在 pH 值 5 时，

油滴聚集程度明显更高，这可能是由于 SOB 的等电点在 pH 值 4.5 左右，影响了乳液的稳定。相比之下，在 pH 值 7 及 9 时，如图中白色箭头所示，可以观察到出现的油滴往往都伴随着蛋白的覆盖，絮凝程度显著降低，同时液滴分散，在 pH 值 9 的乳液分布程度要比 pH 值 7 时更广。以上可以证明，pH 值 7 及 9 时的复合乳液的稳定性更高。张等指出，当大豆分离蛋白和乳清分离蛋白的 pH 值 8 到 11 时，液滴絮凝减少，乳化液稳定^[19]。

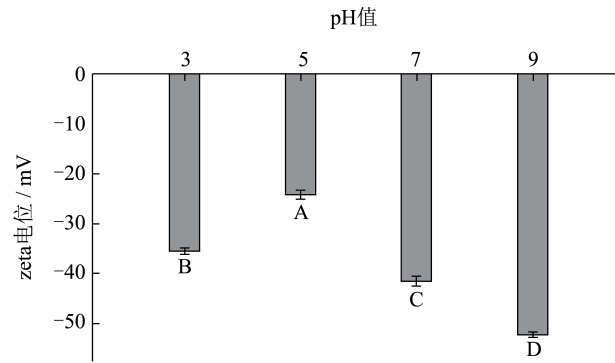


图 4 pH 值对黄芪多糖 – 大豆油脂体复合乳液 zeta 电位的影响

Fig.4 Effect of pH values on zeta potential of *Astragalus* polysaccharide and soybean oil body complex emulsion

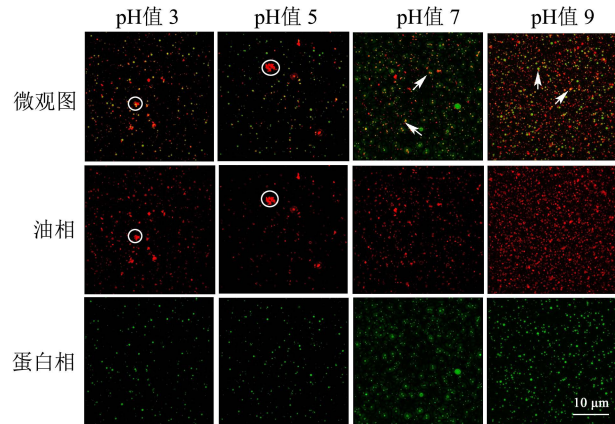


图 5 不同 pH 值对黄芪多糖 – 大豆油脂体复合乳液的微观结构

Fig.5 Microstructure of *Astragalus* polysaccharide and soybean oil complex emulsion at different pH values

2.6 流变特性

pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液粘度的影响如图 6 所示。在剪切速率小于 10 s^{-1} 时, 复合乳液在 pH 值 3 和 5 条件下的表观粘度均显著高于 pH 值 7 和 9 的粘度 ($P<0.05$)。这是由于在等电点附近, 由于乳液的絮凝增强, 导致粘度增大, 在剪切的作用下, 絮凝发生破坏表现出剪切稀化现象。然而在高于等电点的条件下, 乳液由于斥力增加, 液滴更为分散, 粘度表现更低。如图 7 所示, 剪切应力随着剪切速率的增加而增大。复合乳液在 pH 值为 3、5 和 7 条件下的剪切应力均显著高于 pH 值 9 ($P<0.05$)。其中 pH 值 5 时表现最高的剪切应力, 这是由于此时复合物乳液絮凝程度较高, 颗粒聚集在一起, 需要更大的力才能将其破坏^[20], 这与粘度分析一致。Othmeni 等^[21]发现在等电点附近, 乳液的絮凝程度显著增加, 颗粒聚集导致剪切应力升高。

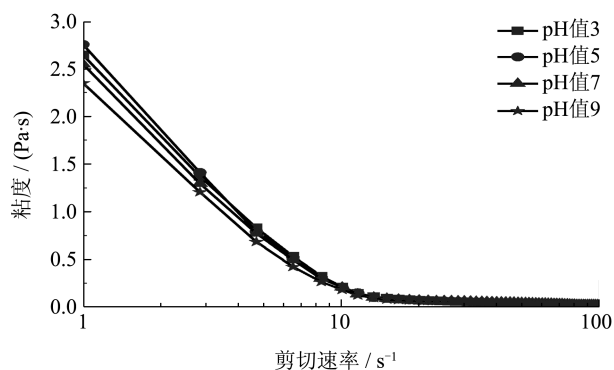


图 6 pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液表观粘度的影响

Fig.6 Effect of pH values on the apparent viscosity of *Astragalus* polysaccharide and soybean oil body complex emulsion

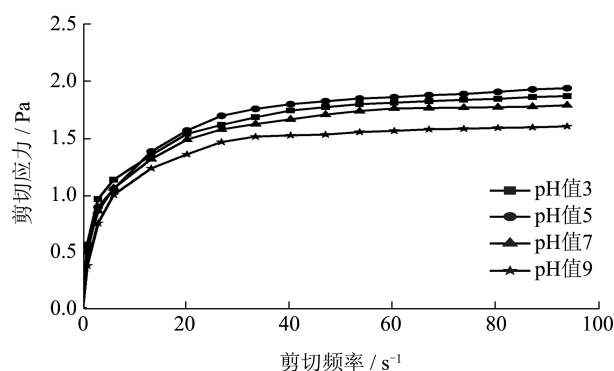


图 7 pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液剪切应力的影响

Fig.7 Effect of pH values on shear stress of *Astragalus* polysaccharide and soybean oil body composite emulsion

2.7 乳化性质

乳化活性指的是蛋白质能够附着在新生成的液滴表层, 从而稳固油与水之间的交界面的能力, 而乳化稳

定性则是指乳液在面对外部环境变化时, 能够保持油与水界面不分离的特性。乳化活性以及乳化稳定性是评估乳液的乳化性质的重要标准。在图 8 中, pH 值 3、5 条件下的复合乳液乳化活性分别为 12.33 、 $9.52\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, 均显著低于 pH 值 7 ($14.30\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)、9 ($17.50\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) 条件下的复合乳液乳化活性 ($P<0.05$)。同样在图 9 中, pH 值为 3、5、7、9 条件下的复合乳液乳化稳定性分别为 126.79 、 107.03 、 173.85 、 186.03 ($P<0.05$)。这是由于在等电点附近时, 乳液表面净电荷量减少, APS 与 SOB 表面蛋白的作用力变弱, 凝胶网络分散, 同样在 pH 值为 3 的条件下表面蛋白可能发生较大程度的变性, 导致乳液的乳化活性降低^[22]。随着 pH 值的上升, 乳液中的羧基和羟基等官能团的增多, 分子间的静电相互作用得到加强。这种增强的静电作用导致乳液界面层的厚度增加, 从而使得乳化性质得到提升^[23]。

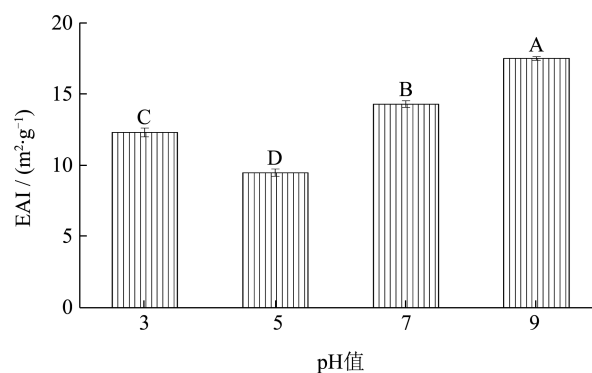


图 8 pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液乳化性质的影响

Fig.8 Effect of pH values on emulsification properties of *Astragalus* polysaccharides and soybean oil body complex emulsion

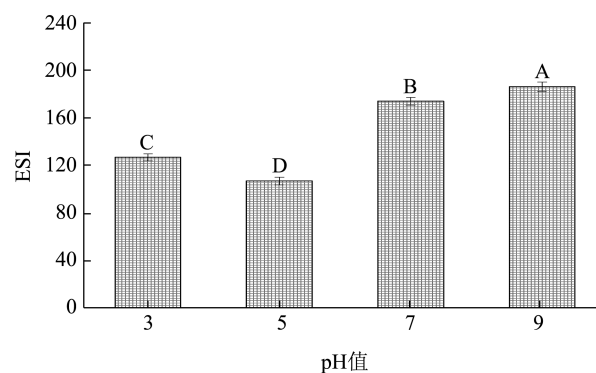


图 9 pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液乳化稳定性的影响

Fig.9 Effect of pH values on emulsion stability of *Astragalus* polysaccharides and soybean oil body complex emulsion

2.8 过氧化值

过氧化值可以反映脂肪酸氧化程度。由图 10 可知, 在 0~28 d 中, 所有复合乳液的过氧化值均呈先升高后降低的趋势。其中 pH 值 3 和 5 的乳液在第 13 天达到

最高值, 分别为 14.85、16.45 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而在 28 d 后分别为 11.38、13.09 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。pH 值 7 和 9 则 16 d 时达到最大值, 分别为 13.60、11.74 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而在 28 d 后分别为 10.18、8.83 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。出现上述的原因可能是由于随着贮存时间的延长, 初级氧化产物会发生分解从而导致曲线下降。与 pH 值 7 和 9 相比, pH 值 3 和 5 时的乳液由于静电斥力较弱, 导致油脂流出, 更易发生聚集, 增大了与氧气的接触面积, 从而会提前达到峰值^[24,25]。

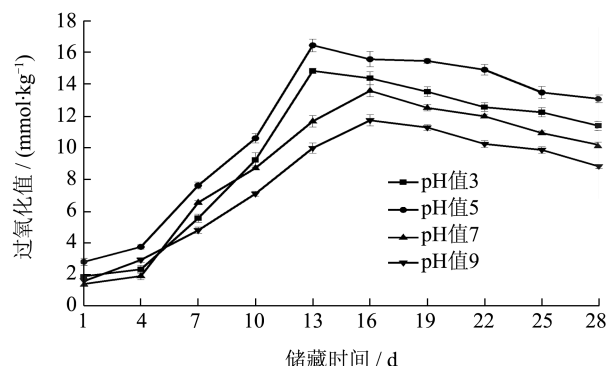


图 10 pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液过氧化值的影响

Fig.10 Effect of pH values on peroxide value of *Astragalus polysaccharide and soybean oil complex emulsion*

2.9 TBARS

TBARS 通过测定乳液脂质过氧化过程中生成的丙二醛的含量, 反映乳液的氧化程度。同 pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液的过氧化值的影响如图 11 所示。结果显示 TBARS 值在 0~28 d 内呈现逐步上升趋势。由图 13 可知, 在第 28 天时不同 pH 值 (从低到高) 复合乳液的 TBARS 分别为 6.28、8.64、5.70、4.99 $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。且 pH 值 3 和 5 的乳液在第 13 天开始上升速度明显加快, 对于 pH 值 7 和 9 的乳液在第 16 天开始出现同样变化趋势, 这是因为油脂体乳液中油脂的初级产物发生降解, 导致次级产物增多^[26]。

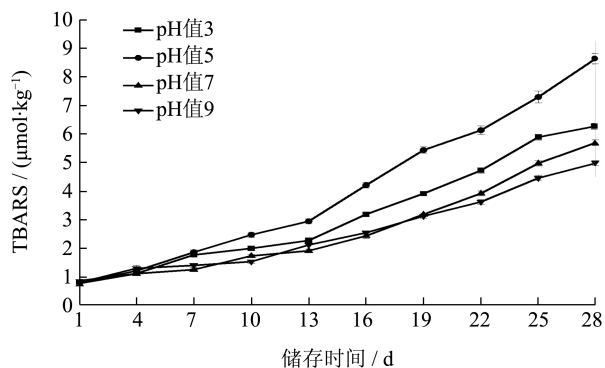


图 11 pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液 TBARS 的影响

Fig.11 Effect of pH values on TBARS of *Astragalus polysaccharide and soybean oil body complex emulsion*

2.10 酸价

酸价可以衡量油脂体乳液中脂肪酸败的程度。pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液的酸价的影响如图 12 所示。总体而言, 当体系 pH 值接近油脂体蛋白的等电点 ($\text{pI} \approx 5$) 时, 蛋白质分子表面净电荷趋近于零, 分子间静电排斥力减弱, 导致蛋白质聚集并脱离油水界面, 使得脂质直接暴露于水相中, 加速了脂质氧化, 进而导致酸价升高^[24]。在后续的储藏过程 (0~28 d) 中, 所有复合乳液的酸价都呈升高的趋势。这归因于油脂体中三酰甘油发生水解, 引起酸价升高。在第 28 天时, 所有乳液 (pH 值 3~9) 的酸价分别为 4.87、6.44、4.23 及 3.90 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。总体来看, 大豆油脂体复合乳液氧化程度较低, 脂肪酸释放缓慢稳定, 一方面这可能由于 SOB 表面蛋白的保护作用^[27]。油脂蛋白和磷脂单分子层紧紧地覆盖在整个 SOB 的表面, 这层保护膜防止其氧化^[28]。另外 pH 值从 3 到 9, 酸价逐渐降低, 这是因为随着 pH 值的升高, SOB 表面同性净电荷量增加, 静电斥力变大, SOB 液滴间不易发生絮凝, 使得氧化反应降低, 氧化速率变慢^[29,30]。

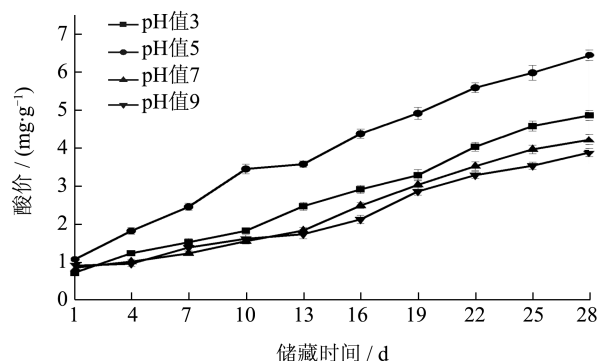


图 12 pH 值对黄芪多糖-大豆油脂体复合乳液酸价的影响

Fig.12 Effect of pH values on acid value of *Astragalus polysaccharide and soybean oil complex emulsion*

3 结论

本研究讨论了不同 pH 值对 SOB 与 APS 通过相互作用形成复合乳液的影响。由于在酸性条件下分子间斥力降低导致乳液发生聚集, 均表现出较差的乳化能力, 而在 pH 值 9 时实现了最优的乳化稳定能力, 这得益于分子间静电排斥的增强, 生成更小的油滴。而在接近等电点的 pH 值下, 乳液的粒径显著增大, 乳液分层现象明显。同时在储藏期间, 各乳液的酸价总体较低, 这是由于多糖与油体表面蛋白结合形成界面膜, 有效的保护了乳液的氧化^[18,19,31]。综上所述, 本研究将有助于进一步探索 SOB 与 APS 之间的关系, 促进复合乳液在较宽的 pH 值范围内的有效利用, 如制

备奶油和饮料, 以及动物脂肪替代品等。

参考文献

- [1] 袁利鹏,刘波,熊波,等.大豆磷脂的制备、功能特性及行业应用研究进展[J].中国酿造,2013,32:13-15.
- [2] SHAMS-WHITE M M, CHUNG M, DU M, et al. Dietary protein and bone health: a systematic review and meta-analysis from the National Osteoporosis Foundation [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2017, 105: 1528-1543.
- [3] 龙国徽.大豆蛋白的结构特征与营养价值的关系[D].长春:吉林农业大学,2015.
- [4] LIU S, WANG W, MENG L, et al. Antioxidants and unsaturated fatty acids are involved in salt tolerance in peanut [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39: 207.
- [5] ENVELOPE F Z P, ENVELOPE Q Z, ENVELOPE, Y J X, et al. Soybean oil bodies: A review on composition, properties, food applications, and future research aspects [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 124: 107296.
- [6] PEHLIVANOGLU H, OZULKU G, YILDIRIM R M, et al. Investigating the usage of unsaturated fatty acid-rich and low-calorie oleogels as a shortening-mimetics in cake [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 7(2): 13621.
- [7] 韩天翔,李杨,毕爽,等.磷脂对大豆乳清蛋白乳化特性的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(2):8.
- [8] ZHANG X, YAN Q, XIAO Y, et al. Integrating network pharmacology, molecular docking, and animal studies to investigate the protective effect of Astragalus polysaccharide on fluoride-induced renal injury in rats [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2025, 294: 118109.
- [9] TANG L, XIE S, WANG D, et al. Astragalus polysaccharide/carboxymethyl chitosan/sodium alginate based electroconductive hydrogels for diabetic wound healing and muscle function assessment [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 350: 123058.
- [10] MIN C, ZHANG C, CAO Y, et al. Rheological, textural, and water-immobilizing properties of mung bean starch and flaxseed protein composite gels as potential dysphagia food: The effect of Astragalus polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124236.
- [11] LI Y, DONG X, ZHANG Y, et al. Astragalus polysaccharide improves the growth, meat quality, antioxidant capacity and bacterial resistance of Furong crucian carp (Furong carp ♀ × red crucian carp ♂) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244: 124999.
- [12] SONG H, ZHONG M, SUN Y, et al. Recovery of proteins from soybean oil-body wastewater at various pH levels and their structural and functional characterization [J]. LWT, 2023, 174: 114455.
- [13] TZEN J T, PENG C C, CHENG D J, et al. A new method for seed oil body purification and examination of oil body integrity following germination [J]. Journal of Biochemistry, 1997, 121(4): 762-768.
- [14] CHEN J, WANG Y, PU M, et al. pH-regulated preparation and structural characterization of non-covalent complexes of soybean isolate proteins with different charged polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 298: 140004.
- [15] WU N, YANG X, TENG Z, et al. Stabilization of soybean oil body emulsions using κ , ι , λ -carrageenan at different pH values [J]. Food Research International, 2011, 44(4): 1059-1068.
- [16] GAO Y, ZHENG Y, YAO F, et al. Effects of pH and temperature on the stability of peanut oil bodies: New insights for embedding active ingredients [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 654: 130110.
- [17] YU X, QIN X, YANG F, et al. The physicochemical stability and *in vivo* gastrointestinal fates of flaxseed oil bodies with the introduction of soluble flaxseed gum polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110287.
- [18] ZHU T, WANG S, YAN D, et al. Preparation, interaction, and digestion of peanut oil body-based emulsion gels with xanthan gum and gallic acid [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 163: 111063.
- [19] ZHANG X, QI B, XIE F, et al. Emulsion stability and dilatational rheological properties of soy/whey protein isolate complexes at the oil-water interface: Influence of pH [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106391.
- [20] LEON-FLORIAN E, IGURA N, PEREZ-WON M, et al. Microalgae-loaded SPI-based monodisperse emulsions prepared by PREMIX membrane emulsification: Effect of pH and HHP on droplet size and droplet size distribution [J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100629.
- [21] OTHMENI I, KAROUI R, BLECKER C. Impact of pH on the structure, interfacial and foaming properties of pea protein isolate: Investigation of the structure-Function relationship [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134818.
- [22] 郭兴凤,谭凤艳,闫秋丽.SDS改性大豆分离蛋白流变学特性研究[J].粮食与油脂,2007,12:2.
- [23] TIAN Y, TAHA A, ZHANG P, et al. Effects of protein concentration, pH, and NaCl concentration on the physicochemical, interfacial, and emulsifying properties of β -conglycinin [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106784.
- [24] JIN H, LI B, XIE H, et al. Effects of papain hydrolysate of *Pseudosciaena crocea* roe on the physical and oxidative stability of water-in-oil emulsions [J]. LWT, 2024, 210: 116734.
- [25] FENG J, SCHROEN K, GUYOT S, et al. Physical and oxidative stabilization of oil-in-water emulsions by roasted coffee fractions: interface- and continuous phase-related effects [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(11): 4717-4728.
- [26] DING M, ZHANG T, ZHANG H, et al. Gelatin-stabilized traditional emulsions: Emulsion forms, droplets, and storage stability [J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 320-327.
- [27] QIN C, HAN M, FU R, et al. Influence of extraction pH and homogenization on soybean oleosome emulsion stability [J]. LWT, 2024, 203: 116404.
- [28] BOURGEOIS C, GOMAA A I, LEFÈVRE T, et al. Interaction of oil bodies proteins with phospholipid bilayers: A molecular level elucidation as revealed by infrared spectroscopy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 122: 873-881.
- [29] CHEN N, WANG Z, ZHU J, et al. Effect of extraction pH on the emulsion stability and surface protein structure of soybean oil body [J]. Food Chemistry, 2025, 473: 143029.
- [30] KELLERBY S S, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Role of proteins in oil-in-water emulsions on the stability of lipid hydroperoxides [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(20): 7879-7884.
- [31] SHI Z, CHEN Z, MENG Z. Study on oil body emulsion gels stabilized by composited polysaccharides through microgel particles compaction and natural gelation [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108146.