

蚕蛹多糖的组成、结构及其乳液特性表征

陈知棠, 高一清, 韦晗晖, 赵丁, 江虹锐*
(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 为了提高蚕蛹附加值, 该文研究了蚕蛹多糖 (Polysaccharide of Silkworm Pupa, PSP) 的组成、结构及其乳液特性。实验从蚕蛹中提取 PSP, 对其组成和结构进行分析; 用 PSP 制备高内相乳液 ($\phi=74\%$), 测定了乳液 Zeta 电位、液滴尺寸、乳化活性指数 (Emulsifying Activity Index, EAI)、乳化稳定性指数 (Emulsion Stability Index, ESI)、流变特性和贮藏稳定性等, 分析了 PSP 质量浓度对其乳液特性的影响。结果表明: PSP 由岩藻糖、氨基半乳糖盐酸盐、鼠李糖、阿拉伯糖、盐酸氨基葡萄糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖和葡萄糖醛酸组成, PSP 及其主要组分 PSP2 (1.01×10^6 u) 和 PSP3 (1.24×10^6 u) 均为酸性多糖。PSP 质量浓度对乳液的稳定性有显著影响, 随着 PSP 质量浓度从 $5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 增加至 $80\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$, 乳液 EAI 从 $3.43\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $17.24\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, ESI 从 10.39 min 提高至 548.30 min, Zeta 电位绝对值从 15.77 mV 上升至 28.10 mV, 液滴尺寸从 $135.80\text{ }\mu\text{m}$ 减小至 $62.07\text{ }\mu\text{m}$ 。由 $80\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液, 其稳定性指数最小, 黏度最大, 贮藏稳定性最佳。该研究表明, PSP 是具有良好乳化特性的天然多糖, 可稳定高内相乳液。该研究可为 PSP 的开发利用提供理论依据, PSP 有望作为新型绿色乳化剂和增稠剂广泛应用于食品加工中。

关键词: 蚕蛹多糖; 结构; 高内相乳液; 乳化剂
文章编号: 1673-9078(2026)02-105-115 **DOI:** 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1862

Composition, Structure, and Emulsion Characterization of Polysaccharides of Silkworm Pupae

CHEN Zhitang, GAO Yiqing, WEI Hanhui, ZHAO Ding, JIANG Hongrui*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To enhance the added value of silkworm pupae, the composition, structure, and emulsion properties of polysaccharides from silkworm pupae (PSP) were investigated in this study. An analysis of the composition and structure of PSP extracted from silkworm pupae was conducted. High internal phase emulsions ($\phi=74\%$) were prepared with the obtained PSP, and the effects of PSP mass concentration on emulsion properties were analyzed by measuring the zeta potential, droplet size, emulsifying activity index (EAI), emulsion stability index (ESI), rheological properties, and storage stability of the emulsions. The results showed that PSP was primarily composed of fucose, galactosamine hydrochloride, rhamnose, arabinose, glucosamine hydrochloride, galactose, glucose, mannose, and glucuronic acid. PSP and its primary components, PSP2 (1.01×10^6 u) and PSP3 (1.24×10^6 u), were acidic polysaccharides. The mass concentration of PSP significantly influenced emulsion stability. With an increase in PSP mass concentration from 5 to $80\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$, EAI increased from $3.43\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ to $17.24\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, ESI improved from 10.39 to 548.30 min, absolute zeta potential rose from 15.77 to 28.10 mV, and droplet size decreased from $135.80\text{ }\mu\text{m}$ to $62.07\text{ }\mu\text{m}$. In particular, the emulsion

引文格式:
陈知棠, 高一清, 韦晗晖, 等. 蚕蛹多糖的组成、结构及其乳液特性表征[J]. 现代食品科技, 2026, 42(2): 105-115.
CHEN Zhitang, GAO Yiqing, WEI Hanhui, et al. Composition, structure, and emulsion characterization of polysaccharides of silkworm pupae [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 105-115.

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-02-06; 接受日期: 2025-02-14
基金项目: 国家自然科学基金项目 (U21A20271); 中央引导地方科技发展资金项目 (桂科 ZY21195013)
作者简介: 陈知棠 (1999-), 女, 硕士, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 2660336978@qq.com
通讯作者: 江虹锐 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: hrjiang@gxu.edu.cn

stabilized with 80 mg·mL⁻¹ PSP exhibited the lowest stability index, the highest viscosity, and the best storage stability. The present study demonstrated that PSP consists of natural polysaccharides with excellent emulsifying properties, which can potentially be used to stabilize high internal-phase emulsions. The results of this study can provide a theoretical basis for the development and use of PSP, which has potential for widespread application as a novel green emulsifier and thickener in food processing.

Key words: polysaccharides of silkworm pupae; structure; high internal phase emulsion; emulsifier

蚕蛹是我国蚕桑产业的主要副产物之一,也是我国“作为普通食品管理的食品新资源名单”中唯一的昆虫类食品。蚕蛹(*Bombyx mori* L.)富含蛋白质、脂肪、矿物质、维生素、多糖等物质。其中,多糖含量占蚕蛹质量的1.27~3.11 wt.%^[1]。近年来,对蚕蛹多糖的研究主要集中在提取工艺优化和生物活性方面。蒋艳忠^[2]以水为溶剂,在固液比1:30(*m/V*)、温度80℃、浸提4h制备桑蚕蛹多糖的得率为4.79%,纯度为69.2%。程广东等^[3]利用水提法制备柞蚕蛹(*Antheraea pernyi*)多糖的平均得率为1.38%。王什等^[4]利用微波辅助弱碱水提取的桑蚕蛹粗多糖得率为4.72%,纯度为71.6%。目前,已发现蚕蛹多糖具有抗肿瘤^[4]、免疫调节^[5-7]、抗菌和抑制成纤维细胞增殖^[8]等作用。关于蚕蛹多糖在食品工业中的应用还未见报道,进一步研究蚕蛹多糖的食品功能特性并将其应用在食品加工中具有一定的意义。

高内相乳液由于其高油相体积分数而表现出固体凝胶结构和功能特性,这使其被广泛应用于食品生产中,如替代固体脂肪和氢化油、递送生物活性成分和改善质地等^[9]。部分天然多糖(如阿拉伯胶、果胶和大豆可溶性多糖等)不但具有良好的乳化性,还具有无毒、生物可降解性和生物相容性好等优势,这使得它们成为构建食品乳液体系所用乳化剂的良好选择^[10]。多糖的疏水基团可快速吸附到油滴表面;多糖中的亲水基团可延伸到连续相中,形成空间屏障提供空间阻力并提供静电排斥力,以抑制或减缓油滴聚集,使乳液保持稳定^[11-13]。多糖乳液的形成和稳定性受许多因素的影响,如颗粒质量浓度、油相体积、pH值、离子强度和温度等^[11]。多糖的组成和结构特性也会影响其乳液特性,进而在食品加工及贮藏过程中对产品的品质带来不同程度的影响。有研究表明,蚕蛹蛋白颗粒可稳定高内相皮克林乳液($\phi=74\%$),该颗粒的蛋白含量为77.83 wt.%,多糖含量为4.80 wt.%^[14]。目前,关于蚕蛹多糖分子结构的深入解析和乳液特性的研究报道较少,其是否具有成为新型乳化剂的潜力尚未见报道。了解蚕蛹多糖(Polysaccharide of Silkworm Pupa, PSP)的组成、结构特性和乳液特性之间的关系可以为其作为天然乳化剂提供理论支持。

该文以蚕蛹多糖为研究对象,探究了其组成和结构特征,并研究不同质量浓度的PSP稳定高内相乳液($\phi=74\%$)的液滴尺寸、Zeta电位、乳化活性指数(Emulsifying Activity Index, EAI)、乳化稳定性指数(Emulsion Stability Index, ESI)、流变特性、乳析指数(Creaming Index, CI)和稳定性指数(Turbiscan Stability Index, TSI)等,分析了PSP的组成、结构和质量浓度的对其乳液特性的影响。以期PSP在食品中作为新型天然乳化剂和增稠剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蚕蛹(Silkworm Pupa),购自广西嘉联茧丝有限公司(中国宜州)。DEAE-52纤维素,购自北京索莱宝科技有限公司;葡聚糖凝胶Sephadex G-150,购自上海源叶生物科技有限公司;溴化钾(光谱纯),购自天津市光复精细化工研究所;Bradford蛋白浓度测定试剂盒,购自上海碧云天生物技术股份有限公司;玉米油,购自当地超市(中国南宁);单糖标准品(岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、氨基半乳糖盐酸盐、盐酸氨基葡萄糖、古罗糖醛酸、甘露糖醛酸),购自扬州市博睿糖生物技术有限公司;普鲁兰多糖标准品P-5、P-10、P-20、P-50、P-100、P-200、P-400、P-800和P-2000,购自日本昭和电工株式会社;其余试剂均为分析纯,购自四川省成都市科隆化学有限公司。

1.2 仪器与设备

BSZ-100自动部分收集器,上海沪西仪器厂有限公司;BN300蠕动泵,济南博纳生物技术有限公司;InfiniteM200PRO酶标仪,奥地利TECAN公司;UltiMate高效液相色谱仪,美国Thermo公司;ICS 5000离子交换色谱仪,美国Thermo公司;Nicolet iS 50傅里叶红外光谱仪,美国Thermo Fisher Scientific公司;U-5100比例光束紫外分光光度计,日本日立制作所株式会社;BT-2600激光粒度分布仪,丹东百特仪

器有限公司; NANO ZS90 Zeta 电位分析仪, 英国马尔文公司; Tower 多重光散射仪, 法国 Formulaction 公司; HR 20 流变仪, TA 仪器。

1.3 方法

1.3.1 PSP的提取

将烘干后的蚕蛹研磨粉碎, 以料液比 1:8 (m/V) 加入正己烷, 在 38 °C 水浴中脱脂 2 h, 重复 1 次。晾干后过 40 目网筛, 得到脱脂蚕蛹粉, 密封保存。

参考 Ali 等^[6]和谭丽鹤等^[15]的方法并稍作修改, 采用水提醇沉法提取蚕蛹多糖。取 50 g 脱脂蚕蛹粉, 按料液比 1:10 (m/V) 加入去离子水, 在室温下搅拌 4 h 后以 4 000 $r \cdot min^{-1}$ 离心 5 min, 得第一次提取液, 取沉淀重复浸提 1 次, 合并 2 次提取液。提取液用真空旋转蒸发器于 50 °C 下浓缩至其原体积的十分之一左右。用 Sevage 试剂和活性炭进行脱蛋白和脱色。然后加入 4 倍体积无水乙醇, 于 4 °C 下静置醇沉 12 h。醇沉液以 4 000 $r \cdot min^{-1}$ 离心 20 min, 沉淀用体积分数为 80% 的乙醇洗涤 3 次, 透析 48 h, 冷冻干燥得到 PSP。

1.3.2 PSP的分离纯化

将 PSP 溶于水后缓慢滴加到 DEAE-52 阴离子交换柱 (2.6×50 cm) 上, 依次用 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 $mol \cdot L^{-1}$ NaCl 溶液进行梯度洗脱, 利用苯酚-硫酸法绘制洗脱曲线。根据洗脱曲线收集洗脱液, 透析脱盐, 冷冻干燥。通过 Sephadex G-150 凝胶色谱柱 (1.6×100 cm) 进一步纯化, 用去离子水洗脱, 得到 PSP2 和 PSP3。

1.3.3 化学组成分析

采用苯酚-硫酸法测定总糖的含量; 采用间羟基联苯法测定糖醛酸含量; 采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量。

1.3.4 结构特征分析

1.3.4.1 单糖组成分析

采用离子色谱法测定单糖组成。精确称取 5 mg 样品置于安瓿瓶中, 加入 2 mL 三氟乙酸 ($3 mol \cdot L^{-1}$), 120 °C 水解 3 h。准确吸取酸水解溶液转移至管中氮吹吹干, 加入 5 mL 水涡旋混匀。吸取 50 μL 加入 950 μL 去离子水, 以 12 000 $r \cdot min^{-1}$ 离心 5 min, 取上清进行分析。以 15 种单糖标准品为对照, 配成标准品混合液。色谱条件: 色谱柱为 Dionex CarbopacTM PA20; 流动相为 A: H_2O ; B: 250 $mmol \cdot L^{-1}$ NaOH; C: 500 $mmol \cdot L^{-1}$ NaOH 含 50 $mmol \cdot L^{-1}$ NaAc; 流量 0.3 $mL \cdot min^{-1}$; 进样量 25 μL ; 柱温 30 °C; 电化学检测器。

1.3.4.2 分子量的测定

采用高效凝胶渗透色谱法测定多糖的分子量。色谱条件: 流动相为 0.05 $mol \cdot L^{-1}$ NaCl 溶液; 色谱柱: BRT105-103-101; 流量 0.7 $mL \cdot min^{-1}$; 柱温 40 °C; 进样量 25 μL ; 示差检测器 RID-20A。与普鲁兰多糖标准品进行对照, 对 PSP2 和 PSP3 的分子量进行分析。根据普鲁兰多糖标准曲线的校准方程计算样品的分子量。

1.3.4.3 紫外全波长扫描及红外光谱分析

将 1 $mg \cdot mL^{-1}$ 的样品溶液用紫外可见分光光度计在 200~400 nm 波长范围内扫描。同时, 将样品与 KBr 按 1:100 (m/m) 比例混合研磨, 压制成片。利用 Nicolet iS 50 傅里叶变换红外光谱仪在 400~4 000 cm^{-1} 的频率范围内以 4 cm^{-1} 的分辨率扫描 32 次。

1.3.5 PSP乳液的制备

将适量的 PSP 分散在去离子水中, 搅拌 2 h, 并在 4 °C 下静置过夜, 获得不同质量浓度 (5、10、20、40、80、100 和 120 $mg \cdot mL^{-1}$) 的 PSP 溶液。乳液总体积固定为 20 mL, 将 PSP 溶液与玉米油按 26:74 (V/V) 比例进行混合, 用高速均质机均质 1 min, 均质速度为 10 000 $r \cdot min^{-1}$ 。

1.3.6 乳液液滴大小和Zeta电位的测定

参考 Hou 等^[16]的方法, 乳液的液滴尺寸用 BT-2600 激光粒度分布仪测量, 结果用体积平均直径 ($d_{4,3}$) 表示。将乳液稀释至 1 $mg \cdot mL^{-1}$, 使用 NANO ZS90 Zeta 电位分析仪测定 Zeta 电位。

1.3.7 EAI和ESI的测定

乳液均质后 0 min 和 10 min 时, 分别从底部取 0.1 mL 乳液用 1 $mg \cdot mL^{-1}$ 十二烷基硫酸钠 (SDS) 溶液稀释, 用分光光度计在 500 nm 波长下测定吸光度。以 1 $mg \cdot mL^{-1}$ SDS 溶液为空白对照。EAI 和 ESI 分别按式 (1) 和 (2) 计算:

$$E_1 = \frac{2.3033 \times A_0 \times DF}{L \times \varphi \times C \times 1000} \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{A_0 \times \Delta T}{A_0 - A_{10}} \quad (2)$$

式中:

E_1 ——乳化活性指数 (EAI), $m^2 \cdot g^{-1}$;

E_2 ——乳化稳定性指数 (ESI), min;

A_0 和 A_{10} ——乳液稀释液在 0 min 和 10 min 时的吸光度;

DF ——稀释倍数;

L ——比色皿的光程, cm;

φ ——油相的体积分数;

C ——样品的质量浓度, $mg \cdot mL^{-1}$;

ΔT ——测定乳液稀释液吸光度的时间差, min。

1.3.8 CI的测定

将新鲜乳液置于透明带盖玻璃瓶中，在常温下静态储存 30 d。用游标卡尺测量乳液初始高度和贮存期间下层清液的高度。CI 按式（3）计算：

$$B = \frac{H_s}{H_t} \times 100\%$$
(3)

式中：
B——乳析指数（CI），%；
Hs——下层清液的高度，cm；
Ht——整体乳液的高度，cm。

1.3.9 TSI的测定

参考 Villalobos 等^[17]的方法，采用多重光散射仪测定乳液的 TSI。取 20 mL 乳液于专用玻璃瓶中进行扫描测试，时间间隔为 110 s，扫描时间为 12 h，测试温度为 25 ℃。

1.3.10 流变特性的测定

根据 Zhang 等^[18]的方法测定不同质量浓度 PSP 乳液的流变特性，并进行了一些修改。制备不同质量浓度的 PSP 乳液（5、10、20、40 和 80 mg·mL⁻¹），用带有 40 mm 平行板的 HR 20 流变仪，在剪切速率范围为 0.1~100 s⁻¹下测量乳液的粘度。以 1 Hz 的角频率在 0.1%~100% 范围进行振幅扫描，得到线性粘弹性区。在线性粘弹性区域内，在 0.1~100 rad/s 的角频率范围内测定乳液的动态粘弹性行为，记录储能模量（G'）、损耗模量（G''）。在 25~60 ℃ 的温度范围内，以 3 ℃·min⁻¹ 的扫描速率、固定应变（0.1%）和 1 Hz 的固定频率进行温度扫描。

1.4 数据处理及分析

使用 GraphPad 8.0.1 软件处理数据，结果用平均值 ± 标准偏差表示。采用单因素方差分析（ANOVA）进行显著性分析，使用 Origin 2024 软件绘图，其中 P<0.05 表示有显著差异。

2 结果与分析

2.1 PSP提取与分离纯化

经水提醇沉法获得的 PSP 得率为 1.28%，其总糖含量为 80.54 wt.%，蛋白质含量为 8.56 wt.%（表 1）。该得率略低于程广东等^[3]采用水提醇沉法但未经脱色处理的柞蚕蛹（*Antheraea pernyi*）粗多糖（1.38%）和蒋忠艳^[2]未经脱蛋白和脱色处理的桑蚕蛹（*Bombyx mori* Linnaeus）粗多糖（4.79%）。然而，本实验获得的 PSP 总糖含量高于蒋忠艳^[2]（69.2 wt.%）和王什等^[4]（71.60 wt.%）提取的蚕蛹多糖。蚕蛹多糖的得率和纯度与其分离纯化步骤密切相关，脱蛋白和脱色处理虽

然可能导致多糖得率降低，但显著提高了多糖的纯度。

表 1 PSP、PSP2和PSP3的化学组成

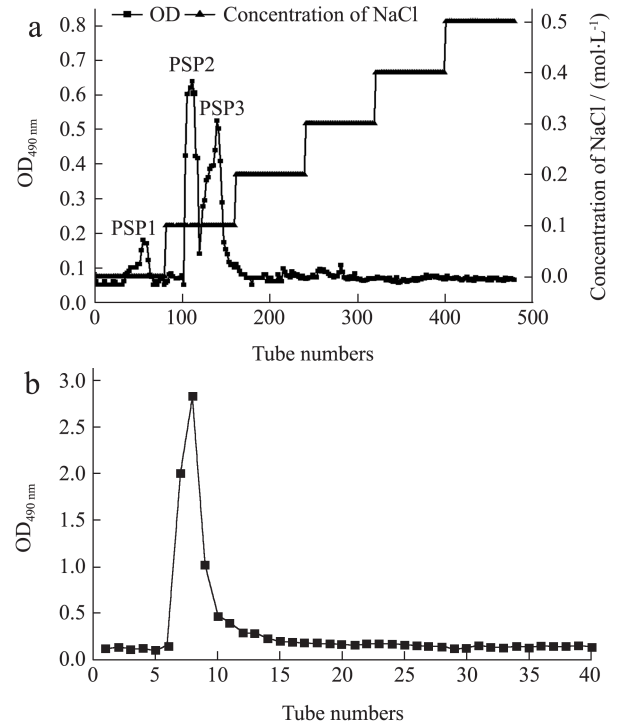
Table 1 Chemical compositions of PSP、PSP2 and PSP3

样品	得率/%	总糖/(wt.%)	蛋白质/(wt.%)	糖醛酸/(wt.%)
PSP	1.28 ± 0.05	80.54 ± 0.75 ^b	8.56 ± 1.73 ^a	11.11 ± 2.20 ^a
PSP2	14.72 ± 0.04	97.81 ± 0.85 ^a	0.47 ± 0.38 ^b	16.39 ± 0.73 ^b
PSP3	18.48 ± 0.07	98.79 ± 0.36 ^a	0.87 ± 0.24 ^b	21.81 ± 1.70 ^c

注：PSP 为蚕蛹粗多糖，PSP2 和 PSP3 为两个经纯化后的蚕蛹多糖组分；PSP 得率以干燥脱脂蚕蛹粉干基计，PSP2 和 PSP3 得率以 PSP 干基计。同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

PSP 经 DEAE-52 纤维素阴离子交换柱层析分离得到三个组分，分别命名为 PSP1、PSP2 和 PSP3（图 1a）。选择回收率较高的 PSP2 和 PSP3（分别为 24.0% 和 36.0%）作为主要组分，通过 Sephadex G-150 进一步纯化，结果如图 1b 和 1c 所示。PSP2 和 PSP3 均呈单一对称洗脱峰，PSP2 和 PSP3 得率为 14.72% 和 18.48%（表 1）。

对 PSP 及其组分进行化学组成分析，发现 PSP 含有 11.11 wt.% 糖醛酸（表 1），这表明 PSP 是一种酸性杂多糖。相关研究发现，通过水提醇沉法获得的桑蚕蛹多糖（Silkrose-BM）^[6]和天蚕蛹多糖（Silkrose-AY）^[19]也均为酸性多糖。与 PSP 相比，PSP2 和 PSP3 中的总糖含量和糖醛酸含量著提高（P<0.05），蛋白质含量显著下降（P<0.05）。如图 1d 所示，PSP2 和 PSP3 在 260 和 280 nm 处均没有明显吸收峰，表明其基本不含核酸和蛋白质等杂质。综上，PSP 经分离纯化得到的 PSP2 和 PSP3 组分为纯度较高的酸性多糖。



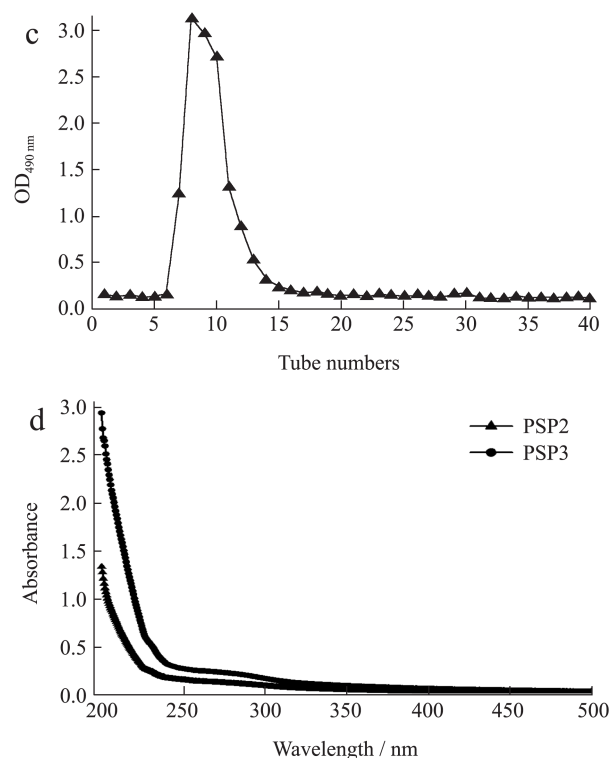


图1 蚕蛹多糖的分离纯化

Fig.1 Isolation and purification of silkworm pupa polysaccharides

注: (a) DEAE-52 纤维素柱洗脱曲线; (b、c) PSP2 和 PSP3 的 Sephadex G-150 柱洗脱曲线; (d) PSP2 和 PSP3 的紫外光谱图。

2.2 单糖组成与分子量分布

PSP、PSP2 和 PSP3 的离子交换图谱如图 2 所示, 其单糖种类和摩尔比如表 2 所示。如表 2 所示, PSP、PSP2 和 PSP3 的单糖种类和摩尔比不同。单糖组成和其他报道的结果相似, 但摩尔比不同^[6,15,19]。PSP 与谭丽鹤等^[15]用弱碱水提取的桑蚕蛹水溶性多糖的单糖组成均以葡萄糖为主, 但单糖的种类不同。这可能是由于水提法条件温和, 可较好的保留多糖原有的结构; 而多糖碱处理后易发生 Walden 反应或脱硫现象, 造成多糖结构的改变^[20]。Ali 等^[6]用水提法获得的桑蚕蛹(采自日本)多糖以及 Ohta 等^[19]用水提法提取的天蚕蛹(采自日本)多糖均为酸性多糖, 谭丽鹤等^[15]用弱碱水提取的桑蚕蛹(采自山东)水溶性多糖为中性糖。这可能是由于碱性条件下糖醛酸易发生 β 消除反应, 导致糖醛酸的含量下降^[16]。此外, 来自不同地区的蚕蛹, 其多糖含量和单糖组成还会受品种、地域、气候条件的影响而存在差异^[1]。

PSP、PSP2 和 PSP3 的高效凝胶渗透色谱图如图 3 所示, 未经纯化的 PSP 含有多个峰, 且峰型较宽(图 3a), 说明其含有多个组分, 分子量分布较宽; 计算可知

PSP 的分子量分布范围为 $2.14 \times 10^3 \sim 1.25 \times 10^6$ u。PSP2 (图 3b) 和 PSP3 (图 3c) 均呈现一个主峰和一个小峰, 其主要的分子量分别为 1.01×10^6 u 和 1.24×10^6 u。PSP2 和 PSP3 分别在 31.83 min 和 31.66 min 洗脱出的小峰, 这可能是由于样品中含有少量低分子量多糖或蛋白质^[21]。PSP2 和 PSP3 的分子量略高于 Ohta 等^[19]提取的天蚕蛹多糖 (3.15×10^5 u), 与 Ali 等^[6]提取的家蚕蛹水溶性多糖 (1.15×10^6 u) 相近。

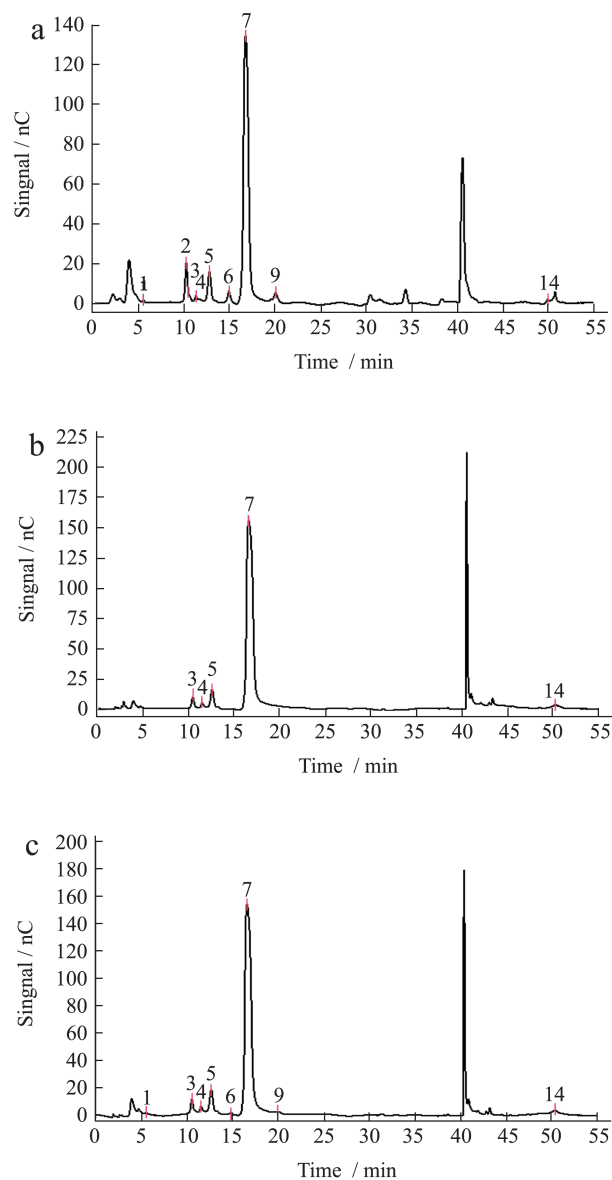


图2 蚕蛹多糖的离子色谱图

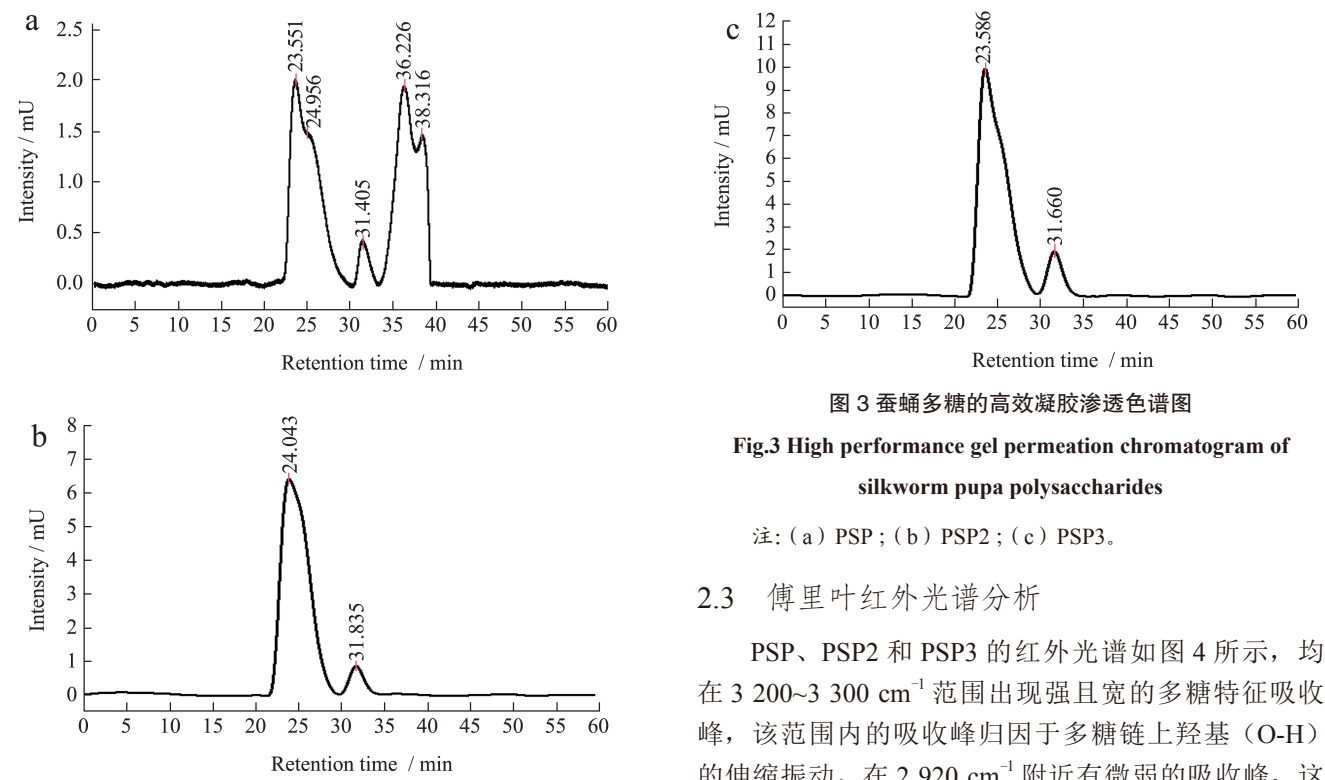
Fig.2 IC chromatograms of silkworm pupa polysaccharides

注: (a) PSP; (b) PSP2; (c) PSP3。保留时间 2.0 min 和 40.5 min 处为溶剂峰。1. 岩藻糖; 2. 氨基半乳糖盐; 3. 鼠李糖; 4. 阿拉伯糖; 5. 盐酸氨基葡萄糖; 6. 半乳糖; 7. 葡萄糖; 8. 木糖; 9. 甘露糖; 10. 果糖; 11. 核糖; 12. 半乳糖醛酸; 13. 古罗糖醛酸; 14. 葡萄糖醛酸; 15. 甘露糖醛酸。

表 2 PSP、PSP2和PSP3的单糖组成（摩尔比）
Table 2 Monosaccharide compositions of PSP、PSP2 and PSP3 (molar ratio)

单糖名称		PSP	PSP2	PSP3	桑蚕蛹水溶性多糖 ^[15]	桑蚕蛹多糖 ^[22]	Silkrose-BM ^[6]	Silkrose-AY ^[19]
岩藻糖	Fuc	0.97	—	1.83	—	—	2.2	2.1
氨基半乳糖盐酸盐	GalN	3.01	—	—	—	—	—	—
鼠李糖	Rha	1.85	7.40	8.20	—	0.69	6.7	6.2
阿拉伯糖	Ara	0.61	2.51	2.75	—	—	0.5	3.5
盐酸氨基葡萄糖	GlcN	2.22	2.52	2.99	—	—	—	—
半乳糖	Gal	4.98	—	2.21	1.59	2.76	23.8	5.7
葡萄糖	Glc	77.37	79.81	71.17	95.94	95.1	14.6	48.9
甘露糖	Man	6.65	—	1.85	0.88	0.83	9.4	13.1
葡萄糖醛酸	GlcA	2.35	7.76	9.01	—	0.63	7.5	9.3
山梨糖	Sor	—	—	—	1.59	—	—	—
N-乙酰基-d-葡萄糖胺	GlcNAc	—	—	—	—	—	19.6	7.6
N-乙酰基-d-半乳糖胺	GalNAc	—	—	—	—	—	19.6	—
d-甘露糖酸	D-ManA	—	—	—	—	—	—	3.5

注：—未检出。



2.3 傅里叶红外光谱分析

PSP、PSP2 和 PSP3 的红外光谱如图 4 所示，均在 3 200~3 300 cm^{-1} 范围出现强且宽的多糖特征吸收峰，该范围内的吸收峰归因于多糖链上羟基（O-H）的伸缩振动。在 2 920 cm^{-1} 附近有微弱的吸收峰，这

可能是由于 C-H 拉伸和弯曲振动, 包括 -CH、-CH₂ 和 -CH₃ [23]。在 1 730 cm⁻¹ 和 1 290 cm⁻¹ 附近的弱吸收峰, 归因于 C=O 在酯基或羧基中的拉伸振动 [24]。在 1 640 cm⁻¹ 附近的吸收峰表示为羧基 (COO-) 中 C=O 的不对称伸缩振动, 说明多糖样品中都存在糖醛酸; COO- 的 C=O 在 1 400 cm⁻¹ 附近的对称拉伸振动与 1 640 cm⁻¹ 处的不对称拉伸振动耦合证明蚕蛹多糖 PSP2 和 PSP3 组分都是酸性多糖 [25]。1 410 和 1 145 cm⁻¹ 处的峰主要归因于 C-O-C 和 C-O-H 键的存在; 1 010 cm⁻¹ 处吸收峰归因于 C-O-H 变形, 这表明这两个多糖组分中均可能存在吡喃环; 850 cm⁻¹ 附近的吸收峰表明多糖样品中存在 β-糖苷键和 α-糖苷键 [26]。

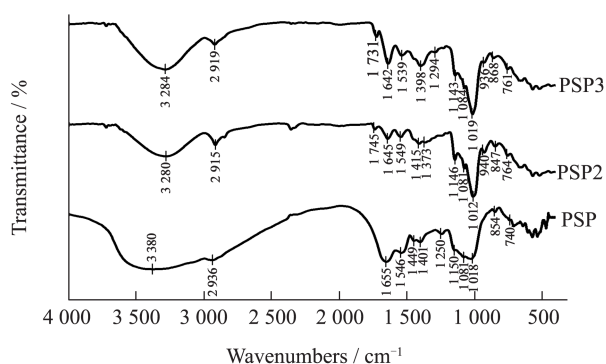


图 4 PSP、PSP2 和 PSP 傅里叶变换红外光谱图

Fig.4 Fourier transform infrared spectra of PSP, PSP2 and PSP3

2.4 PSP的乳化特性表征

2.4.1 PSP乳液的乳液液滴大小和Zeta电位

Zeta 电位是液滴表面之间静电相互作用的主要指标之一, 电位绝对值越高, 液滴之间的静电排斥力越强, 乳液的稳定性越好 [16]。PSP 质量浓度对乳液液滴大小和 Zeta 电位的影响如图 5 所示。液滴大小和 Zeta 电位的变化具有质量浓度依赖性。随着 PSP 质量浓度从 5 mg·mL⁻¹ 增大到 80 mg·mL⁻¹, 电位绝对值从 15.77 mV 显著上升至 28.10 mV, 液滴大小从 135.80 μm 显著降低至 62.07 μm。这可能是由于随着 PSP 质量浓度上升, 乳液中的表面电荷增多, 可提供更强的静电排斥力来抵抗液滴之间的范德华相互作用、聚结和絮凝 [13,27]。在较低质量浓度时, 过少的 PSP 不能有效包裹油滴, 导致其具有较大的液滴尺寸; 随着 PSP 质量浓度增大, PSP 在液滴表面的覆盖率上升, 形成稳定的多层吸附结构使得液滴之间的空间位阻增大, 形成更小的液滴, 进一步增强乳液稳定性 [28]。综上, 液滴尺寸随着多糖质量浓度的增加而逐渐减小。根据文献报道, 大豆壳多糖 (SHPS) 在 7~9 mg·mL⁻¹ 范围, 液滴尺寸由 4.85 μm 减至 1.62 μm [29]。

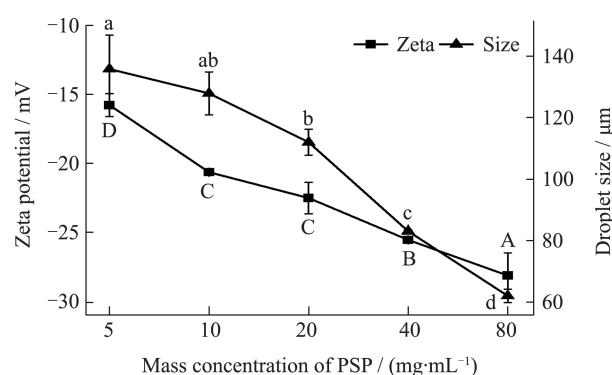


图 5 不同质量浓度 PSP 乳液的 Zeta 电位和液滴大小

Fig.5 Zeta potential and droplet size of PSP emulsions at different mass concentrations

注: 不同大写字母表示不同样品之间的 Zeta 电位差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示不同样品之间的液滴大小差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4.2 EAI和ESI

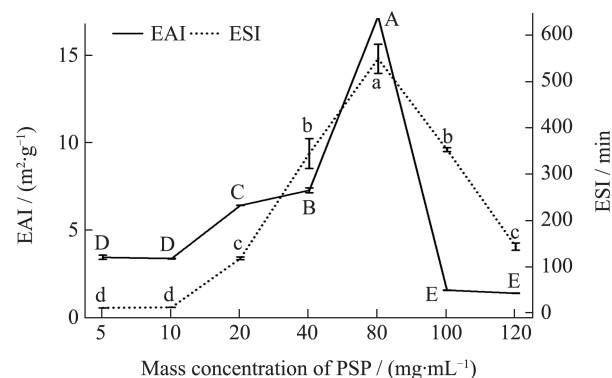


图 6 不同质量浓度 PSP 乳液的 EAI 和 ESI

Fig.6 EAI values and ESI values of PSP emulsions at different mass concentrations

注: 不同大写字母表示不同样品之间的 EAI 电位差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示不同样品之间的 ESI 差异显著 ($P < 0.05$)。

EAI 和 ESI 是评估样品乳化性能的常用指标。有研究报告称, 多糖的乳化性能主要与其质量浓度、分子量、单糖组成、疏水基团、蛋白组成或流变特性有关 [13,30]。如图 6 所示, 在 5~120 mg·mL⁻¹ 范围内 EAI 和 ESI 随着 PSP 质量浓度的增加先上升后下降, 80 mg·mL⁻¹ 时 EAI 和 ESI 达到最大值 (17.24 m²·g⁻¹ 和 548.3 min)。这可能是由于随着 PSP 质量浓度增加, 多糖在液滴表面的吸附量增加, 构建了更加紧密的界面膜, 阻止了液滴的聚集或聚结 [12,16]。此外, 多糖中的阿拉伯糖有助于形成中性糖侧链, 从而影响多糖的乳化性能 [13,31]。山慈菇多糖 (AEP) 制备的乳液中也发现了相似现象, EAI 和 ESI 在 5~20 mg·mL⁻¹ 范围内与多糖质量浓度呈正相

关,且在 $20 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, AEP 乳液的 EAI (0.37) 和 ESI (40.51) 均达到最大值^[32]。然而, PSP 质量浓度增加至 100 和 $120 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, EAI 和 ESI 迅速下降。该现象可能是归因于多糖质量浓度处于较高水平时, 油滴表面已被多糖完全覆盖, 但仍存在许多多糖分子未能吸附于油滴表面。此时, 这些未吸附的多糖分子在液滴之间诱发的渗透吸引力抵消了液滴间的排斥相互作用, 乳液平衡状态被打破, 致使液滴相互靠近并发生絮凝^[33]。综上, PSP 表现出良好的乳化能力, 并在 $5\sim 80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 范围内可通过增加质量浓度进行改善乳化性能。

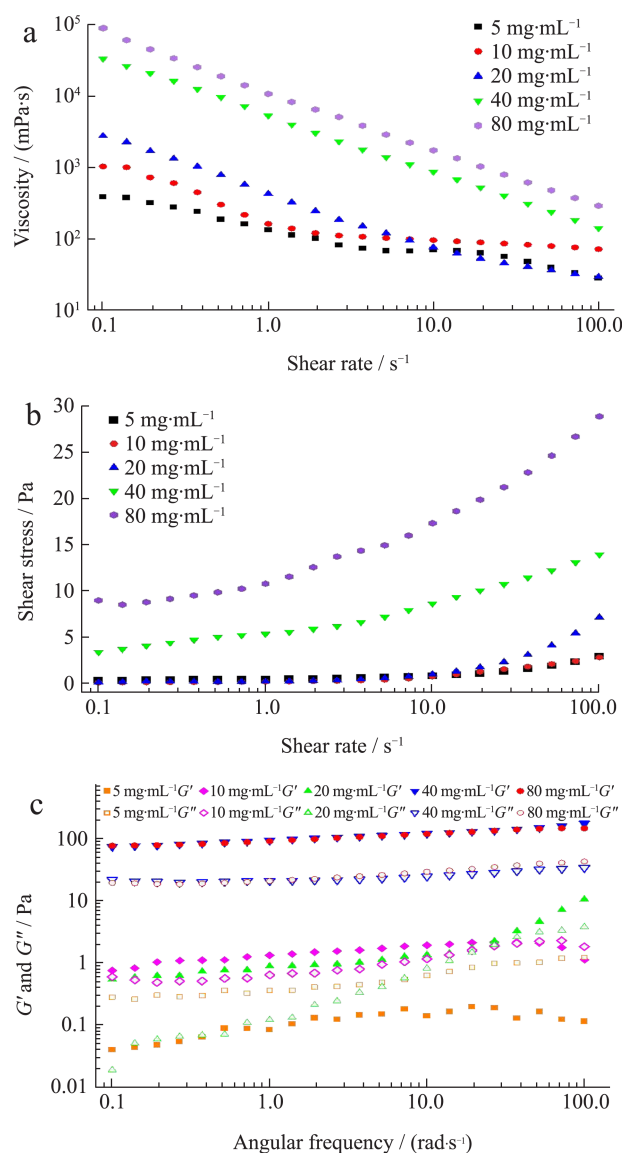
2.4.3 PSP乳液的流变特性

不同质量浓度 PSP (5 、 10 、 20 、 40 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) 稳定的乳液剪切速率对粘度的影响如图 7a 所示。乳液粘度呈现多糖质量浓度和剪切速率依赖性, 粘度随质量浓度的增加而增大, 但随剪切速率的增大而减小, 均表现出剪切稀化行为, 说明 PSP 乳液属于假塑性流体。PSP 质量浓度为 $80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 乳液的剪切稀化行为最明显。粘度的增加可能是因为在高质量浓度下多糖单链的纠缠相应增加, 限制了 PSP 的运动和拉伸^[30], 从而减弱乳液液滴的布朗运动、迁移和聚集速度, 使得乳液更加稳定^[34,35]。在刺梨水溶性多糖^[30] 和山慈菇多糖^[32] 的研究中也观察到了类似现象, 即分别在 $0.5\sim 3 \text{ wt.}\%$ 和 $0.6\sim 2.5 \text{ wt.}\%$ 范围内乳液粘度随多糖质量浓度的增加而增加。乳液的剪切应力变化呈现多糖质量浓度依赖性, 并随 PSP 质量浓度的增加而增大。 $80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液具有最大的剪切应力, 说明该质量浓度下 PSP 的分子相互作用力更强。这可能是因为强烈的剪切应力可以引起液滴重排, 这不仅放大了空间位阻效应, 而且加剧了多糖分子间的摩擦, 从而提高了粘度^[13]。此外, PSP 主要组分 PSP2 ($1.01\times 10^6 \text{ u}$) 和 PSP3 ($1.24\times 10^6 \text{ u}$) 分子量略大于其他多糖 (如刺梨多糖^[30] ($0.51\times 10^6 \text{ u}$) 和大豆壳多糖^[29] ($0.53\times 10^6 \text{ u}$)), 较大的分子链长可能会使乳液的黏度较高, 液滴的移动和聚集减弱, 进而乳液呈现较好的稳定性^[13,31]。

乳液的弹性和粘性取决于储能模量 (G') 与损耗模量 (G'') 的比值 ($\tan \delta$)。当 $\tan \delta < 1$, 乳液呈现弹性行为; 当 $\tan \delta > 1$, 乳液呈现粘性行为。如图 7c 所示, 质量浓度为 $10\sim 80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时乳液表现出弱凝胶行为 ($\tan \delta < 1$)。在 $0.1\sim 100 \text{ rad/s}$ 角频率范围内, 不同质量浓度 PSP 乳液 (5 、 10 、 20 、 40 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) 的 G' 和 G'' 均随着角频率的增加而增加。其中, 高质量浓度 (40 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) PSP 乳液在整个测试过程中始终具有较高的储能模量的损耗模量, 并具有较低且稳定的 $\tan \delta$ ($0.15\sim 0.3$), 表明其胶凝能力较强, 更容易形成有序的网络结构^[36]。这可能是由于较高的表面载

荷量导致多糖分子在界面处缠结更多, 多糖链之间连接点的数量和复杂性增加, 从而形成了具有更高粘弹性模量的界面膜^[29]。

通过测定温度扫描来评估不同质量浓度 PSP 乳液对温度变化的敏感性。如图 7e 所示, 在 $25\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, 不同质量浓度 PSP 乳液 (5 、 10 、 20 、 40 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) 的 G' 和 G'' 均随着质量浓度的增加而增加。其中, $80 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液 G' 和 G'' 最大, 这可能是由于有限的热处理未对其具有高粘弹性模量且致密的界面膜造成破坏, 因此展现出最佳的热稳定性^[37]。此外, $5 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液在 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右发生熔解, 这可能是由于较低质量浓度下分子之间碰撞的概率较低, 同时其较低的粘度、 G' 和 G'' 无法使乳液保持稳定^[16]。PSP 乳液 G' 和 G'' 均随温度的升高而降低, 这可能归因于随着温度的升高, 吸附在油水界面处的 PSP 发生剧烈移动或脱落, 原先有序的网络结构被破坏, 导致其 G' 和 G'' 降低^[37,38]。



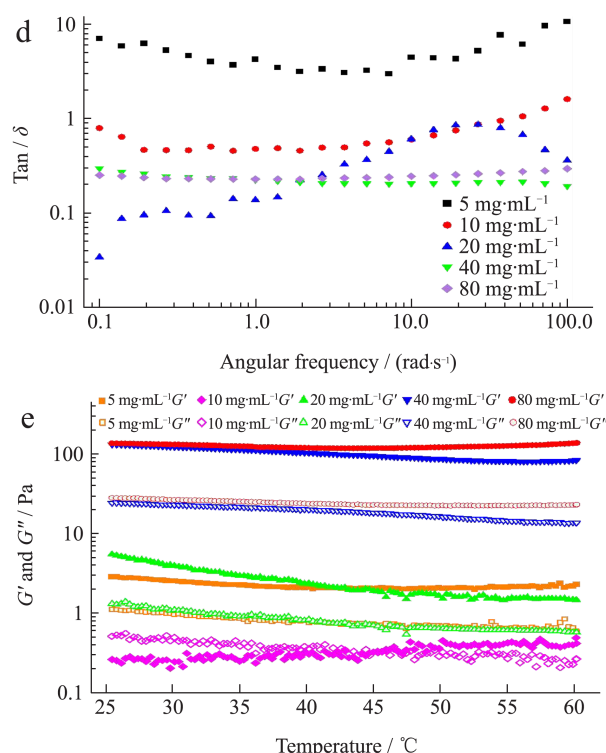


图7 不同质量浓度 PSP 乳液的流变特性

Fig.7 Rheological properties of PSP emulsions with different mass concentration

注: (a) 剪切速率对表观粘度的影响; (b) 剪切速率对表观切应力的影响; (c) 存储模量 (G') 和损耗模量 (G''); (d) $\tan \delta$; (e) 温度扫描。

2.4.4 PSP质量浓度对乳液贮藏稳定性的影响

2.4.4.1 PSP乳液贮藏期间液滴尺寸和CI值的变化

将乳液置于 25°C 下保存 30 d, 通过监测贮藏期间液滴大小及 CI 的变化来评价乳液体系的贮藏稳定性, 结果如图 8 所示。贮藏期间, $5\sim 20\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ PSP 乳液液滴尺寸先增大后减小, 表明液滴发生了聚结和聚集。这可能是由于吸附在油滴表面的 PSP 界面层较薄, 易发生聚结和聚集, 小液滴聚结形成大液滴, 导致液滴尺寸增大; 当增大后的液滴或较大的液滴难以维持稳定状态时, 会向上迁移或游离到乳液表面, 进而致使液滴尺寸整体减小^[39]。贮藏期间, $5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液 CI 值逐渐增大后稳定不变; 20 、 40 和 $80\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液 CI 值均为 0 且未发生变化。结果表明, PSP 乳液的贮藏稳定性随质量浓度的增加而上升, $80\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液贮藏稳定性最好。这可能是由于其液滴间静电斥力较大, 高粘度和较厚的界面层导致的液滴之间形成巨大的空间位阻, 使其液滴聚结或絮凝抵抗力最强^[13]。此外, 较高的 G' 和 G'' 也有助于乳液抵抗液滴变形^[13]。Chen 等^[12]发现多糖中的乙酰基可通过空间和机械稳定效应阻止油滴

的聚集, 从而显著减小液滴尺寸和 CI 值。类似地, 黄智^[40]也发现牛大力多糖 (MSCP) 乳液的稳定性随着多糖质量浓度增加而增强, 即由 1 wt.% MSCP 稳定的乳液乳析指数显著高于 6 wt.% MSCP 制备的乳液。

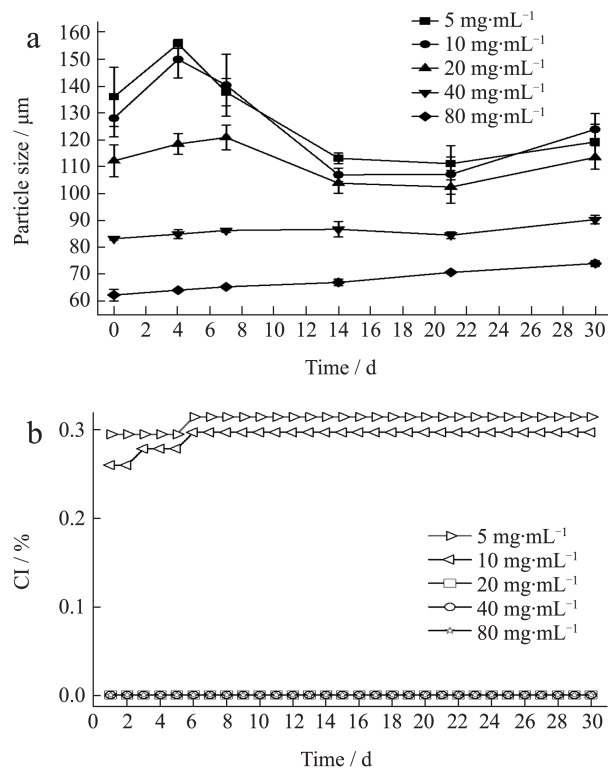


图8 不同 PSP 质量浓度对乳液贮藏稳定性的影响

Fig.8 The effect of different mass concentrations of PSP on emulsion storage stability

注: (a) 贮藏期间 (30 d) 的液滴大小; (b) 乳析指数。

2.4.4.2 PSP乳液稳定性指数

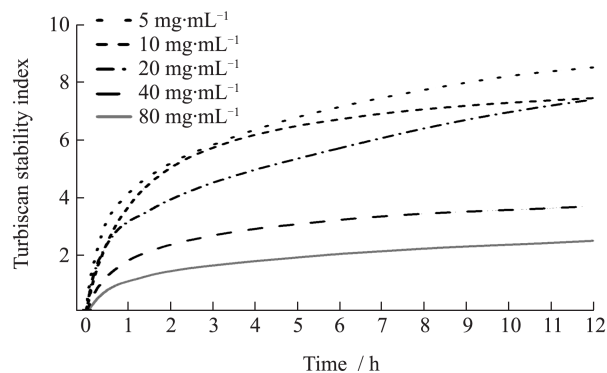


图9 不同质量浓度的 PSP 乳液 TSI 值的变化

Fig.9 Changes in TSI values of PSP emulsions at different mass concentrations

TSI 可作为评估乳液稳定性的指标, 该参数考虑了乳液发生的所有不稳定现象^[17]。TSI 越小, 乳液体系的稳定性越高。如图 9 所示, TSI 值呈现出质量浓度依赖性, 不同质量浓度 PSP 乳液的稳定指数随时间

延长的排列顺序为 $80 > 40 > 20 > 10 > 5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 其中, $80 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液表现出最佳的稳定性。说明 PSP 质量浓度的增加可提高乳液的稳定性, 该趋势与贮藏稳定性变化情况一致。

3 结论

该研究对 PSP 的组成、结构进行表征, 并系统评价了 PSP 的乳液特性。结果表明, PSP、PSP2 和 PSP3 的主要单糖均为葡萄糖, PSP2 和 PSP3 的主要分子量是 $1.01 \times 10^6 \text{ u}$ 和 $1.24 \times 10^6 \text{ u}$ 。PSP 质量浓度对乳液性质的影响相当显著。随着 PSP 质量浓度从 $5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 增加至 $80 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, PSP 在油滴表面的覆盖率增大并形成更致密的界面膜, 增强了液滴间的静电斥力和空间位阻, 从而降低了液滴尺寸 (从 $135.80 \mu\text{m}$ 减小至 $62.07 \mu\text{m}$)。流变特性表明, 粘度、 G' 和 G'' 随着质量浓度的增大而增大, 这进一步提升液滴抵抗聚结或絮凝的能力。此外, PSP 中的蛋白质部分和阿拉伯糖也可能对乳液产生了积极影响。总体来看, $80 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ PSP 稳定的乳液具有最好的乳化活性 ($17.24 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) 和乳化稳定性 (548.30 min), 并表现出最佳的贮藏稳定性。因此, 在一定范围内 ($5 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) 可通过提高 PSP 质量浓度改善乳化效果, PSP 可在食品加工中作为乳化剂和增稠剂。综上所述, 该研究初步阐明了蚕蛹多糖的组成、结构及其乳液特性, 后续将进一步围绕 PSP2 和 PSP3 两个组分对乳液特性的影响开展研究工作, 以进一步完善蚕蛹多糖的乳化机制, 为其在食品工业的广泛应用提供理论基础。

参考文献

- [1] 刘开莉,梁贵秋,陆春霞,等.两广二号家蚕蚕蛹的营养成分和活性物质品质评价[J].西南农业学报,2021,34(1):214-222.
- [2] 蒋艳忠.蚕蛹多糖的提取工艺研究[J].食品工业,2015,36(4):133-135.
- [3] 程广东,汪梓晗,夏秋博,等.响应面法优化柞蚕蛹多糖的提取工艺及其抑菌活性研究[J].中国饲料,2023,6:19-24.
- [4] 王什,李红玉.响应面优化提取蚕蛹多糖及其抗肿瘤活性研究[J].中药材,2017,40(3):665-669.
- [5] 王国基,殷伟芬,王俊,等.蚕蛹多糖对小鼠免疫功能的影响[J].江苏大学学报(医学版),2007,5:373-375.
- [6] ALI M F Z, YASIN I A, OHTA T, et al. The silkrose of *Bombyx mori* effectively prevents vibriosis in penaeid prawns via the activation of innate immunity [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 8836.
- [7] ALI M F Z, NAKAHARA S, OTSU Y, et al. Effects of functional polysaccharide from silkworm as an immunostimulant on transcriptional profiling and disease resistance in fish [J]. Journal of Insects as Food and Feed, 2022, 8(11): 1221-1233.
- [8] ZHOU Y, ZHOU S, DUAN H, et al. Silkworm pupae: a functional food with health benefits for humans [J]. Foods, 2022, 11(11): 1594.
- [9] WANG S, LIU L, BI S, et al. Studies on stabilized mechanism of high internal phase Pickering emulsions from the collaboration of low dose konjac glucomannan and myofibrillar protein [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108862.
- [10] TANG Q, HUANG G. Improving method, properties and application of polysaccharide as emulsifier [J]. Food Chemistry, 2022, 376(15): 131937.
- [11] CUI F, ZHAO S, GUAN X, et al. Polysaccharide-based pickering emulsions: formation, stabilization and applications [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106812.
- [12] CHEN H, FU X, LUO Z. Effect of molecular structure on emulsifying properties of sugar beet pulp pectin [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 99-106.
- [13] LV Y, CAI X, XV T, et al. Emulsions stabilized by okra polysaccharides: physicochemical, interfacial, and emulsification properties [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110338.
- [14] 王小艺,邓筱语,韩丽淑,等.胃肠道环境对蚕蛹蛋白稳定Pickering高内相乳液及其负载虾青素的影响[J].食品科学,2023,44(6):41-48.
- [15] 谭丽鹤,李红玉.桑蚕蛹多糖超声提取优化及水溶性多糖组分分析[J].中成药,2016,38(6):1254-1259.
- [16] HOU F, YANG S, MA X, et al. Characterization of physicochemical properties of oil-in-water emulsions stabilized by *Tremella fuciformis* polysaccharides [J]. Foods, 2022, 11(19): 3020.
- [17] VILLALOBOS-ESPINOSA J C, GARCIA-ARMENTA E, ALAMILLA-BELTRAN L, et al. Effect of pumping and atomisation on the stability of oil/water emulsions [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 327: 111056.
- [18] ZHANG W, FAN X, GU X, et al. Emulsifying properties of pectic polysaccharides obtained by sequential extraction from black tomato pomace [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105454.
- [19] OHTA T, KUSANO K, IDO A, et al. Silkrose: a novel acidic polysaccharide from the silkworm that can stimulate the innate immune response [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 136: 995-1001.
- [20] 马向前,夏苏东,王苹,等.海参多糖的提取纯化、化学分析方法和生物活性研究进展[J].食品与发酵工业,2024,50(7):364-373.
- [21] TRIGUI I, YAICH H, SILA A, et al. Physicochemical properties of water-soluble polysaccharides from black chock for cumin seeds [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 117: 937-946.
- [22] 何钊,孙龙,冯颖,等.几种水溶性昆虫多糖的单糖组分分析[C]//云南省昆虫学会.云南省昆虫学会2009年年会论文集.中国林业科学研究院资源昆虫研究所;国家林业局资源昆虫培育与利用重点实验室实验室,2009:191.
- [23] YAN Z, ZHOU F, LIANG J, et al. Distinction and quantification of *Panax* polysaccharide extracts via attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy with first-order derivative processing [J]. Spectrochimica Acta Part A-Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024, 313(15): 124124.
- [24] LIANG X, LIU M, WEI Y, et al. Structural characteristics and

- structure-activity relationship of four polysaccharides from *Lycii fructus* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127256.
- [25] YAN J, WU L, QIAO Z, et al. Effect of different drying methods on the product quality and bioactive polysaccharides of bitter gourd (*Momordica charantia* L.) slices [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 588-596.
- [26] KHERROUBI S, MORJEN M, TEKA N, et al. Chemical characterization and pharmacological properties of polysaccharides from *Allium roseum* leaves: *in vitro* and *in vivo* assays [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277(3): 134302.
- [27] SHAO P, FENG J, SUN P, et al. Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides [J]. Food Research International, 2020, 137: 109376.
- [28] JIANG Z, BAI X. Effects of polysaccharide concentrations on the formation and physical properties of emulsion-templated oleogels [J]. Molecules, 2022, 27(17): 5391.
- [29] YANG H, LIU Y, WANG S, et al. Composition, morphology, interfacial rheology and emulsifying ability of soy hull polysaccharides extracted with ammonium oxalate and sodium citrate as extractants [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(5): 2325-2336.
- [30] WANG L, ZHANG B, XIAO J, et al. Physicochemical, functional, and biological properties of water-soluble polysaccharides from *Rosa roxburghii* Tratt fruit [J]. Food Chemistry, 2018, 249: 127-135.
- [31] BINDEREIF B, EICHHOEFER H, BUNZEL M, et al. Arabinan side-chains strongly affect the emulsifying properties of acid-extracted sugar beet pectins [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 106968.
- [32] JI Y, LIAO A, HUANG J, et al. The rheological properties and emulsifying behavior of polysaccharides sequentially extracted from *Amana edulis* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 137: 160-168.
- [33] SHI M, WANG F, JIANG H, et al. Effect of enzymatic degraded polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* on the physical and oxidative stability of fish oil-in-water emulsions [J]. Food Chemistry, 2020, 322(30): 126774.
- [34] YUE J, CHEN X, YAO X, et al. Stability improvement of emulsion gel fabricated by *Artemisia sphaerocephala* Krasch. polysaccharide fractions [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 205: 253-260.
- [35] GAO K, LIU T, ZHANG Q, et al. Stabilization of emulsions prepared by ball milling and cellulase treated pomelo peel insoluble dietary fiber: integrity of porous fiber structure dominates the stability [J]. Food Chemistry, 2024, 440(15): 138189.
- [36] KARATAY G G B, GALVAO A M M T, Hubinger M D. Storage stability of conventional and high internal phase emulsions stabilized solely by chickpea aquafaba [J]. Foods, 2022, 11(11): 1588.
- [37] LIU C, TIAN Y, MA Z, et al. Pickering emulsion stabilized by β -cyclodextrin and cinnamaldehyde/ β -cyclodextrin composite [J]. Foods, 2023, 12(12): 2366.
- [38] HUANG X, LIU B, LI Y, et al. Influence mechanism of components and characteristics on structural and oxidative stability of emulsion gel [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109852.
- [39] GAO J, LIANG H, LI S, et al. Development of zein/soluble soybean polysaccharide nanoparticle-stabilized Pickering emulsions [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(5): 1907-1916.
- [40] 黄智.牛大力多糖的结构鉴定、生物活性及乳化性能研究[D].广州:华南理工大学,2022.