DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.011

果胶对大豆亲脂性蛋白结构特征及起泡性能的影响

贾智宇,陈薪诺,杨颜如,宋嘉宝,徐正*
(东北农业大学 食品学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘　要:为提升大豆亲脂性蛋白(soybean lipophilic protein,SLP)在充气食品领域的应用潜力,该研究以 SLP 与果胶(pectin,PC)为原料,探究 SLP 与 PC 不同混合质量比对复合物理化特性、结构及起泡性能的影响。对 SLP-PC 复合物的微观形貌、平均粒径与 Zeta 电位、内源荧光光谱、傅里叶变换红外光谱、表面疏水性、界面张力及起泡特性进行分析,并观察泡沫的微观结构。结果表明,与单一 SLP 相比,当 SLP 与 PC 质量比为 4∶1 时,复合物的起泡性显著提升至 125%,泡沫稳定性提高至 43.6%。结构分析表明,PC 通过氢键、静电及疏水相互作用与 SLP 结合,诱导蛋白质去折叠,使其二级结构由有序向无序转变,导致埋藏的疏水基团暴露,表面疏水性显著增加。同时,复合物在 SLP 与 PC 质量比 4∶1 下粒径最小,表面疏水性及界面活性最高,有利于其在空气-水界面快速吸附并显著降低界面张力,从而在界面处构建一层厚实且具有高黏弹性的复合膜。综上,PC 可有效调控 SLP 的结构特征并强化其界面性能。

关键词:大豆亲脂性蛋白;果胶;非共价结合;空气-水界面;起泡性能

Effects of Pectin on the Structural Characteristics and Foaming Properties of Soy Lipophilic Proteins

JIA Zhiyu, CHEN Xinnuo, YANG Yanru, SONG Jiabao, XU Zheng*
(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

Abstract: To enhance the application potential of soybean lipophilic protein (SLP) in the field of aerated foods, this study used SLP and pectin (PC) as raw materials to investigate the effects of different mixing ratios of SLP and PC on the physicochemical properties, structural characteristics and foaming performance of the composite system. The microscopic morphology, average particle size, Zeta potential, intrinsic fluorescence spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy(FTIR), surface hydrophobicity, interfacial tension and foaming properties of the SLP-PC composites were analyzed, and the microstructure of the foams was observed. The results showed that compared with pure SLP, when the mass ratio of SLP to PC was 4∶1, the foaming capacity of the composite was significantly increased to 125%, and the foaming stability was improved to 43.6%. Structural analysis indicated that PC bound to SLP through hydrogen bonding, electrostatic and hydrophobic interactions, which induced protein unfolding, triggered the transition of the protein secondary structure from an ordered to a disordered conformation, and resulted in the exposure of buried hydrophobic groups and a significant increase in surface hydrophobicity. Meanwhile, the composite at the SLP and PC mass ratio of 4∶1 had the smallest particle size, the highest surface hydrophobicity and the optimal interfacial activity. These properties facilitated its rapid adsorption at the air-water interface and remarkable reduction of interfacial tension, thereby constructing a thick composite film with high viscoelasticity at the interface. In summary, PC can effectively regulate the structural characteristics of SLP and enhance its interfacial properties.

Key words: soybean lipophilic protein; pectin; non-covalent interactions; air-water interface; foaming properties

引文格式:
贾智宇,陈薪诺,杨颜如,等. 果胶对大豆亲脂性蛋白结构特征及起泡性能的影响[J]. 食品研究与开发,2026,47(17):84-90.
JIA Zhiyu, CHEN Xinnuo, YANG Yanru, et al. Effects of Pectin on the Structural Characteristics and Foaming Properties of Soy Lipophilic Proteins[J]. Food Research and Development,2026,47(17):84-90.

作者简介:贾智宇(2005—),女(汉),本科,研究方向:粮食工程。
*通信作者:徐正(1997—),男(汉),博士,研究方向:蛋白结构、功能及高值化应用。

大豆亲脂性蛋白(soybean lipophilic proteins, SLP)是从大豆分离蛋白(soybean protein isolate, SPI)中分离出的一种新型亲脂性蛋白组分,主要成分是油体蛋白及磷脂[1]。研究表明,SLP相比大豆蛋白其他组分(SPI、7S以及11S)具有更优异的发泡性能与泡沫稳定性,在充气食品与营养保健品领域应用潜力显著。然而,单一蛋白稳定的泡沫在复杂的环境条件下,通常表现出起泡性能有限或泡沫稳定性差,导致其发泡特性受限而难以满足实际生产要求。因此,有必要对蛋白进行修饰,以拓展SLP在食品领域的应用[2]。

为克服这一限制,多糖通常与蛋白质结合以提高起泡特性[3]。果胶(pectin, PC)是以聚半乳糖醛酸为主链,通过糖苷键连接各种单糖(葡萄糖、半乳糖、木糖等)形成的阴离子多糖[4]。PC除了具有良好的生物降解性外,还对离子强度、pH值和温度具有较好的耐受性,被广泛用于复合蛋白制备泡沫。例如,Ma等[5]通过将PC与羽扇豆蛋白非共价结合制备混合物,显著提升了蛋白质的起泡性能;张紫媛等[6]指出与PC复合后,β-酪蛋白的起泡性明显提高;龚世敏等[7]发现通过PC与小麦面筋蛋白复合,极大程度提高了其起泡稳定性。尽管如此,当前对SLP的起泡行为的认识仍非常有限,且PC对其起泡性能的影响尚未被研究。基于此,本研究通过将SLP与PC按不同质量比混合,探究PC添加对SLP理化、结构以及起泡特性的影响,以期拓展SLP作为天然起泡剂在充气食品发泡领域的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

低温脱脂豆粕:山东禹王实业有限公司;果胶:上海源叶生物科技有限公司;8-苯胺基-1-萘磺酸(8-anilino-1-naphthalenesulfonic acid, ANS):上海麦克林生化科技有限公司;二喹啉甲酸(bicinchoninic acid, BCA)蛋白质定量分析测试盒:北京索莱宝科技有限公司;氢氧化钠、氯化钠、硫酸:国药集团化学试剂有限公司。以上化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

PHS-3C型pH计:上海仪电科学仪器股份有限公司;HJ-6B型磁力搅拌器:苏瑞仪器(常州)有限公司;GL-21M高速冷冻离心机:湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;Pilot10 15EP型真空冷冻干燥机:北京博医康仪器有限公司;Zetasizer Nano ZS9型粒度及电位分析仪:英国马尔文仪器有限公司;UV-6100紫外-可见分光光度计:日本岛津公司;F-4500型荧光分光光度计、FTIR-8400S型傅里叶变换红外光谱仪:日本日立公司;BX53型光学显微镜:日本奥林巴斯仪器有限公司;OCA25型光学接触角测量仪:德国Dataphysics Instruments GmbH公司;Y25型高速剪切机:上海约迪仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 SLP的制备

参考Li等[8]的方法并稍作修改。将低温脱脂豆粕按料液比1∶8(g/mL)分散于去离子水中,用1.0 mol/L NaOH溶液调节至pH5.0。混合物在25 ℃下搅拌1 h后,于4 ℃、3 000 ×g条件下离心10 min。随后,取上清液加入10 mmol/L Na_2SO_3溶液,用1 mol/L H_2SO_4溶液调节至pH5.8,经8 000×g离心5 min收集沉淀。将剩余上清液继续调至pH5.0,在55 ℃水浴加热15 min后加入50 mmol/L NaCl溶液,再次调节pH值至5.5,最后经3 000×g离心10 min收集沉淀物,冷冻干燥后获得SLP。

1.3.2 SLP-PC复合物的制备

称取适量SLP和PC分别溶于离子水中,在室温下利用磁力搅拌器搅拌过夜,制备浓度为2%的SLP和PC储备液。随后,将两者按照不同质量比混合,并在中性条件下连续搅拌2 h,分别制得SLP与PC质量比为1∶0、1∶1、2∶1、4∶1、8∶1、16∶1的复合溶液。SLP的最终浓度固定在1%。

1.3.3 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察

参考刘盼玲等[9]的方法,将冻干的样品粉末用导电胶带固定在铝样品台上,喷金处理后,使用SEM在加速电压5 kV、放大倍数200×条件下观察样品显微图像。

1.3.4 平均粒径和Zeta电位测定

将样品稀释至0.1 mg/mL,采用粒度及电位分析仪在25 ℃测定平均粒径与zeta电位。测定时,连续相折射率设为1.46,分散相折射率设为1.33,重复3次。

1.3.5 内源荧光光谱扫描

参照Al-Shabib等[10]的方法并适当修改,将样品稀释至0.10 mg/mL,采用荧光分光光度计测定荧光光谱。测定条件:激发波长280 nm,发射波长扫描范围300~450 nm,激发与发射狭缝宽度均为5 nm,扫描速度1 200 nm/min。

1.3.6 傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)扫描

将冷冻干燥后的样品与溴化钾(KBr)按1∶100的质量比混合并压片,采用傅里叶变换红外光谱仪在4 000~400 cm^{-1}波数范围内测定光谱,分辨率为4 cm^{-1}[11]。

1.3.7 表面疏水性(H_0)测定

将不同样品分散液稀释至不同浓度(0.08、0.16、0.24、0.32、0.40 mg/mL)。取20 μL 8.0 mmol/L的ANS加入各4 mL的稀释液中,在25 ℃下反应15 min。激发波长为390 nm,发射波长为470 nm。采用线性回归分析,根据荧光初始斜率和蛋白质浓度计算H_0[12]。

1.3.8 界面张力测定

根据刘文芳等[13]描述的悬滴法,通过光学接触角

测量仪测量样品在空气-水界面处的界面张力。使用进样器系统注射器生成 10μL 的样品溶液液滴，利用 CCD 相机连续监测液滴形状 2 000 s，并根据 Young-Laplace 方程分析液滴轮廓[14]，计算界面张力(γ)。

1.3.9 起泡性(foaming capacity，FC)和泡沫稳定性(foaming stability，FS)测定

参考 García Arteaga 等[15]的方法并适当修改，将不同样品溶液在 25 ℃、10 000 r/min 下通过高速剪切机均质 60 s，并且通过公式(1)和(2)分别计算 FC 和 FS。

$$C = V_0/V_L \times 100 \quad (1)$$

$$S = V_{30}/V_0 \times 100 \quad (2)$$

式中：C 为 FC，%；S 为 FS，%；V_0、V_{30} 分别为均质 0、30 min 时的泡沫体积，mL；V_L 为均质前溶液体积，mL。

1.3.10 泡沫显微图像

泡沫形成后，立即取少量样品泡沫置于载玻片上并轻轻盖上盖玻片，借助光学显微镜分别观察 0 min 和 30 min 泡沫的微观形态。

1.4 数据处理

所有试验均进行 3 次，结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 软件(version 22.0)进行数据分析，采用单因素方差分析和 Duncan 检验对数据进行差异性分析。使用 Origin 生成图形。

2 结果与分析

2.1 扫描电子显微镜观察结果

采用扫描电子显微镜对 SLP-PC 复合物的微观形貌变化进行直观表征。不同 SLP 与 PC 质量比下复合物的微观结构变化见图 1。

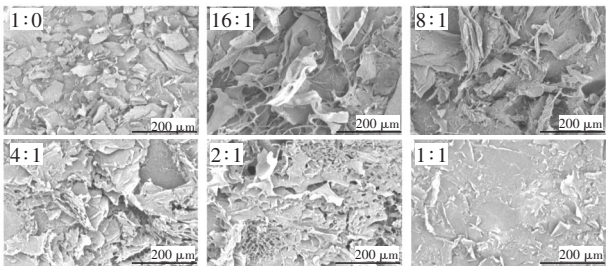


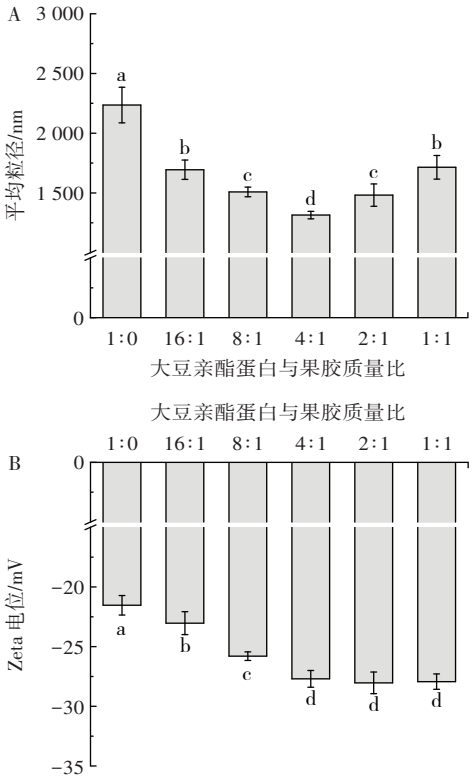
图 1 不同 SLP 与 PC 质量比复合物微观结构的变化

Fig.1 Changes in microstructure of composites with different mass ratios of SLP and PC

如图 1 所示，对照组(1:0)SLP 呈现出不同形状和尺寸的光滑层状结构。添加 PC 后，观察到 SLP 与 PC 通过带状结构相互交联[16]。随着 PC 添加量的升高，复合物表面由疏松多孔逐渐转变为光滑致密且孔隙减少。这可能是由于体系黏度变化所致：PC 通过非共价相互作用与 SLP 结合，导致溶液黏度升高。An 等[17]在制备茶渣蛋白与黄原胶的复合物时，也观察到了相似的结构特征。

2.2 平均粒径和 Zeta 电位

借助动态光散射技术对 SLP-PC 复合物的平均粒径、粒径分布及表面电位进行表征分析，直观反映不同 SLP 与 PC 质量比对复合物粒径及电位特性的影响，具体结果见图 2。



A. 平均粒径；B. Zeta 电位。不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

图 2 不同 SLP 与 PC 质量比复合物粒径及 Zeta 电位的变化

Fig.2 Changes in particle size and Zeta potential of composites with different mass ratios of SLP and PC

由图 2A 可知，随着 PC 在 SLP 中的占比增加，形成的 SLP-PC 复合物的平均粒径呈现出先减小后又增大的变化趋势，当 SLP 与 PC 的质量比为 4:1 时，平均粒径达到最小值(1 314.67 nm)。这表明 SLP 与 PC 可以通过非共价相互作用在中性条件下发生聚合反应，并且当两者质量达到适当比例之后，PC 与 SLP 聚集形成较小尺寸粒径的可溶性复合物促进 SLP 分散[18-19]。这与喻靖[20]的研究结论一致，其在柑橘果胶与大豆分离蛋白的复合体系中也观察到了类似现象。

图 2B 显示，当 SLP 与 PC 质量比从 1:0 变化到 1:1 时，Zeta 电位绝对值持续增加。这些变化可能源于连续相中 SLP 与 PC 之间的相互作用。在中性条件下，带负电的 PC 可能与 SLP 表面部分带正电荷的区域结合。另一方面，随着 PC 的不断加入，形成的 SLP-PC 复合物的表面电位所带负电荷增多，直至 PC 覆盖 SLP 表面，即 SLP 与 PC 质量比为 4:1 时，对应最高的 Zeta 电位绝对值。同样，张佳雨等[21]的研究指出，与

PC 的非共价结合增加米谷蛋白的电位绝对值。

2.3　内源荧光光谱分析

以色氨酸为代表性发色基团，其荧光发射光谱特征被广泛用于评价蛋白质的构象转变及微环境变化。不同 SLP 与 PC 质量比下复合物的内源荧光光谱变化见图 3。

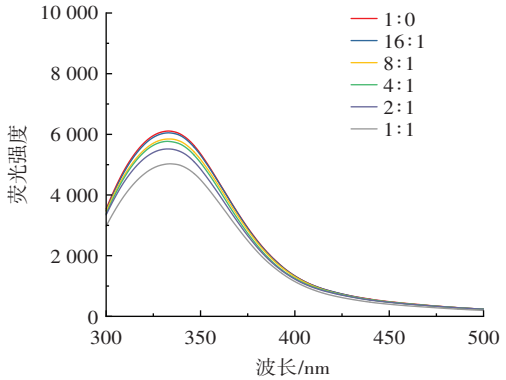


图 3　不同 SLP 与 PC 质量比复合物内源荧光光谱的变化

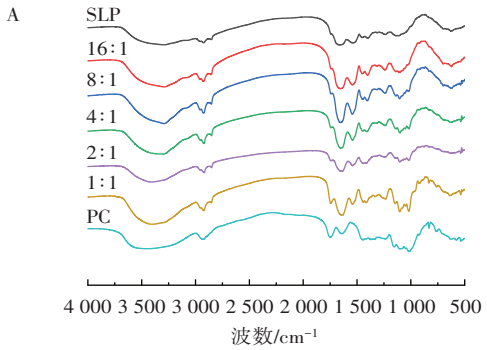
Fig.3　Changes in intrinsic fluorescence spectra of composites with different mass ratios of SLP and PC

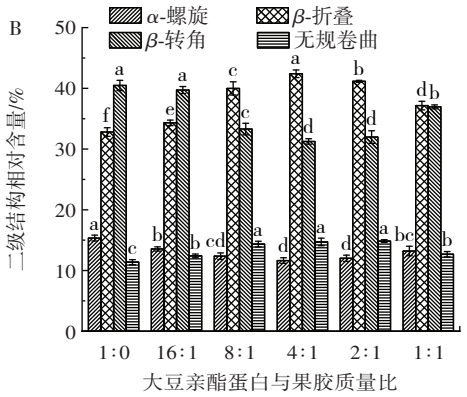
如图 3 所示，与 SLP 相比，添加 PC 形成的 SLP-PC 复合物的荧光强度明显降低，并且复合物荧光强度随着 PC 添加量的增加不断降低。这可能是由于蛋白质与多糖之间的相互作用导致荧光猝灭。同时，SLP 形成复合物后，最大荧光波长（λ_{max}）从 330 nm 红移到 334 nm。这表明 SLP 和 PC 之间的非共价相互作用诱导蛋白质微环境发生变化，促使埋藏在内部发色基团残基从疏水区域迁移至极性微环境[22]。

2.4　傅里叶变换红外光谱分析

FT-IR 作为表征蛋白质结构与分子相互作用的有效方法，可通过特征吸收峰的变化，分析 SLP 与 PC 之间的相互作用机制，以及 SLP 在形成复合物前后的二级结构演变。不同 SLP 与 PC 质量比下复合物的红外光谱和蛋白质二级结构相对含量变化见图 4。

如图 4A 所示，SLP 在 3 288.5 cm^{-1} 处展现出宽峰，主要归因于 O—H 和 N—H 键的伸缩振动。随着 PC 的加入，峰值迁移至 3 380.2 cm^{-1}[23]。这可能归因于





A. FT-IR；B. 蛋白质二级结构相对含量。不同小写字母表示同一指标组间差异显著，$P<0.05$。

图 4　不同 SLP 与 PC 质量比复合物 FT-IR 光谱及二级结构的变化

Fig.4　Changes in FT-IR spectra and secondary structures of composites with different mass ratios of SLP and PC

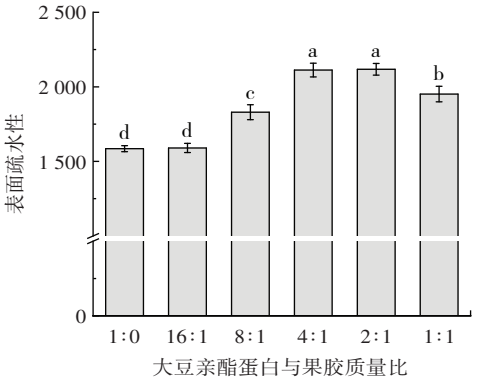
SLP 和 PC 之间形成氢键。SLP 在 1 659.4、1 543.7、1 240.5 cm^{-1} 处出现典型峰值，分别对应肽键的 C═O 键伸缩振动（酰胺 I 带）、C—N 键伸缩振动与 N—H 键弯曲振动（酰胺 II 带）以及 N—H 键振动（酰胺 III 带）。引入 PC 后，上述特征峰均发生不同程度的位移，表明 PC 通过静电作用与 SLP 结合[24]。此外，3 000~2 800 cm^{-1} 附近的特征峰归属于蛋白质 C—H 基团的伸缩振动，该峰的变化可能与疏水作用相关。综上，SLP-PC 复合物的形成涉及多种相互作用力，包括氢键、静电以及疏水相互作用。

酰胺 I 带被认为是反映蛋白质二级结构的指纹区域，通过拟合分析进一步探究了二级结构的变化。如图 4B 所示，随着体系中 PC 添加量的升高，复合物的 α-螺旋以及 β-转角含量表现出先降低后增高的趋势。相反，无规卷曲含量则增加后降低[25]。这表明适量（SLP 与 PC 质量比大于 4∶1）PC 诱导 SLP 分子内部发生伸展，导致蛋白质二级结构由稳定有序状态向无序状态转变。然而，当 PC 添加量过高（SLP 与 PC 质量比小于 4∶1）时，大量 PC 和 SLP 之间会发生强交联，导致 SLP-PC 复合物呈现致密且不规则的构型，同时复合结构发生转变，结构更为有序，导致无规卷曲含量减少。

2.5　表面疏水性分析

表面疏水性直接关联蛋白质表面疏水基团的暴露程度，同时侧面指示蛋白质结构变化。采用 ANS 荧光探针法对 SLP-PC 复合物的表面疏水性变化进行测定，不同 SLP 与 PC 质量比下复合物的表面疏水性变化见图 5。

由图 5 可知，随着 PC 的添加，SLP-PC 复合物的 H_0 值从 1 585.40 显著增加至 2 112.48。该现象与先前研究报道的结果一致[26]。结合平均粒径以及内源荧光



不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

图 5　不同 SLP 与 PC 质量比复合物的表面疏水性

Fig.5　Surface hydrophobicity of composites with different mass ratios of SLP and PC

结果综合考虑，可以理解为 PC 的添加引发 SLP 的结构发生改变。一般来说，蛋白质疏水基团大多埋藏在内部且少量暴露于分子表面。随着 SLP 与 PC 质量比从 1∶0 减小到 4∶1，导致原本嵌于 SLP 内部的疏水基团迁移至表面，从而引起 SLP 的 H_0 值显著提高[27]。然而，随着 PC 添加量的继续增加，SLP 与 PC 形成颗粒尺寸更大的复合物，部分疏水基团被再次埋藏在复合物内部，进而导致 H_0 的下降。

2.6　界面张力分析

界面张力可用于评估 SLP-PC 复合物稳定空气-水界面的能力。不同 SLP 与 PC 质量比下复合物的界面张力特征变化见图 6。

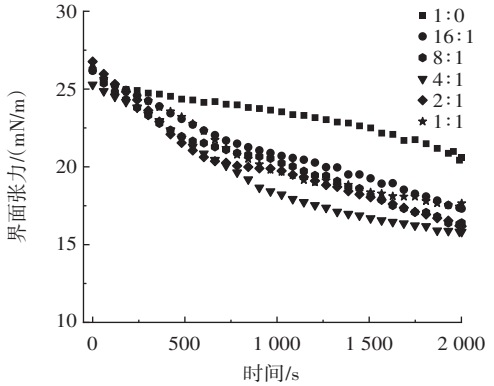


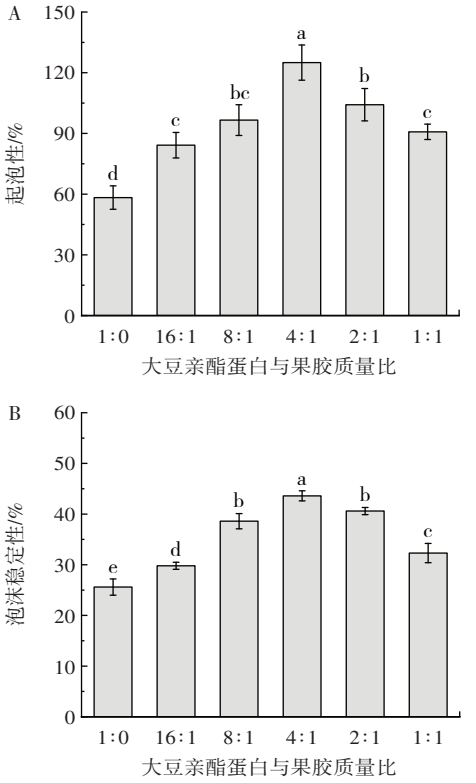
图 6　不同 SLP 与 PC 质量比复合物的界面张力变化

Fig.6　Surface tension changes of composites with different mass ratios of SLP and PC

图 6 显示，各组界面张力均随时间延长表现出相似的行为变化。在初期阶段，观察到界面张力迅速下降，表明样品在空气-水界面持续吸附。此外，随着 SLP 与 PC 质量比的增加，界面张力呈现下降后上升的趋势，并且在 SLP 与 PC 质量比为 4∶1 时达到最小水平。这种界面性能的差异可能归因于蛋白质结构的变化。根据 Huang 等[28]的报道，疏水基团的暴露及粒径的减小，有助于蛋白质在空气-水界面亲和力的提高。同样地，类似的结构变化也在 Hong 等[29]的研究中被报道，他们指出此类变化有助于螺旋藻分离蛋白更快速地扩散吸附至空气-水界面。然而，过量的 PC 引发蛋白质聚集，形成对空气-水界面亲和力降低的复合物，导致界面张力上升。

2.7　起泡性和泡沫稳定性

经高压均质处理后，对 SLP-PC 复合物的起泡性和泡沫稳定性进行测定。不同 SLP 与 PC 质量比下复合物的起泡性能变化见图 7。



A. 起泡性指数；B. 泡沫稳定性指数。不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

图 7　不同 SLP 与 PC 质量比复合物的起泡性和泡沫稳定性

Fig.7　Foaming property and foam stability of composites with different mass ratios of SLP and PC

图 7 显示，对照组 SLP(1∶0)表现出最低的起泡性(58.3%)。这可能是由于 SLP 具有较大的粒径，且表面活性较低，导致其在空气-水界面的吸附能力受限所致。随着 PC 的加入，SLP 的起泡性随着 PC 添加量的增多表现出先升高后降低的趋势，当 SLP 与 PC 质量比为 4∶1 时，样品的起泡性达到最大值(125.0%)[29]。这表明 PC 的添加改善了 SLP 的界面活性，使其能够更高效地在界面处吸附，从而提高了复合物的起泡性。该发现进一步证明了界面张力结果。此外，复合物的泡沫稳定性呈现出与起泡性相似的变化趋势。即 SLP

与 PC 质量比从 1∶0 变化至 4∶1，泡沫稳定性从 25.6% 提高至 43.6%。这种现象的可能原因是 PC 与 SLP 可能在界面处协同构建了一层更厚且具有高黏弹性的复合界面膜，从而减缓液体在泡沫表面的流动，并提高泡沫稳定性。当 SLP 与 PC 质量比小于 4∶1 时，复合物的起泡性及泡沫稳定性均显著降低[30]。这可能是由于大量 PC 的加入导致体系黏度大幅升高，进而限制了复合物在空气-水界面的吸附，因此表现为起泡性及泡沫稳定性的下降[31]。

2.8 泡沫微观结构

采用光学显微镜对 SLP-PC 复合物形成泡沫的微观结构进行直观表征。不同 SLP 与 PC 质量比下泡沫的微观形貌变化见图 8。

从图 8 可以看出，所有样品组在搅打后的初始阶段均为规则均匀且紧密堆叠的球状，代表稳定的泡沫结构。泡沫形成 30 min 后，观察到所有的泡沫均明显增大，表明气泡间发生奥氏熟化现象。根据拉普拉斯定律，小气泡内更高的压力驱使气体穿过液膜向相邻的大气泡扩散，导致小气泡收缩而大气泡生长[32]。然而，与复合物稳定的泡沫不同，SLP 稳定的泡沫在 30 min 后出现了多边形 Plateau 边界。由于这类 Plateau 边界对泡沫排液的阻力较低，会加速液膜内液体流失，进而标志着泡沫进入以快速排液为主导的不稳定阶段。相比之下，由 SLP-PC 复合物稳定的泡沫具有更小的尺寸和更均匀的分布，这一特征在 SLP 与 PC 质量比为 4∶1 时最为显著，表明 PC 可以有效地增强泡沫的稳定性。这一观察结果与上述泡沫稳定性结果一致[33]。综上所述，该泡沫微观结构观察结果与上述宏观泡沫稳定性结果一致，进一步证实了 PC 对泡沫性能的增强作用。

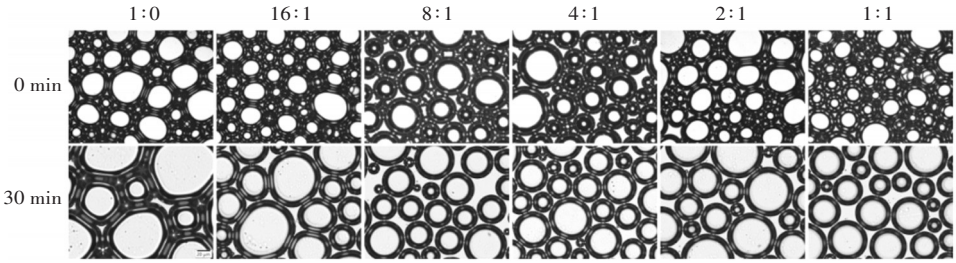


图 8 不同 SLP 与 PC 质量比复合物的泡沫微观结构

Fig.8 Microstructure of foam composites with different mass ratios of SLP and PC

3 结论

本研究证实了 PC 对 SLP 起泡特性的显著改良作用。结果表明，当 SLP 与 PC 质量比为 4∶1 时，复合物的起泡性和泡沫稳定性达到峰值，分别较 SLP 提升了 1.14 倍和 0.7 倍。研究发现，PC 与 SLP 通过氢键、静电及疏水相互作用发生非共价结合，诱导蛋白质构象去折叠，结构有序转向无序状态，促进了内部疏水基团的暴露并显著提升表面疏水性。另外，SLP 与 PC 在 4∶1 的最佳质量比下，两者形成了平均粒径更小且电位绝对值更高的复合物。这些结构变化显著降低了空气-水界面张力，促使复合物在界面处高效吸附，并构建了一层高黏弹性的复合膜。泡沫显微分析进一步证实，PC 的引入有效抑制了气泡间的奥氏熟化，使泡沫结构更加细小均一，为 SLP 作为高效天然起泡剂在充气食品领域的应用提供了理论支撑。

参考文献：

[1] 朱秀清, 衣程远, 刘琳琳, 等 . 超声诱导大豆亲脂蛋白复合姜黄素及其特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 115-122.
ZHU Xiuqing, YI Chengyuan, LIU Linlin, et al. Embedding curcumin with soybean lipophilic protein induced by ultrasonic treatment and the analysis of its properties[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 115-122.

[2] 王胜男, 刘秀琳, 李阳阳, 等 . 明胶、聚乙二醇对大豆蛋白/多糖高内相乳液稳定性的影响[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2025, 46(3): 161-169.
WANG Shengnan, LIU Xiulin, LI Yangyang, et al. Impact of gelatin and polyethylene glycol on the stability of high internal phase emulsion of soybean protein/polysaccharide[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2025, 46(3): 161-169.

[3] 原晨耀, 杨晨, 董佳乐, 等 . 大豆分离蛋白-高酯柑橘果胶复合凝胶的工艺优化与特性调控[J/OL]. 食品与发酵工业[2026-01-10]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045180.
YUAN C Y, YANG C, DONG J L, et al. Process optimization and property regulation of soybean protein isolate-high ester citrus pectin composite gel[J/OL]. Food and Fermentation Industries[2026-01-10]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045180.

[4] 汪静, 毕金峰, 刘凯悦, 等 . 果胶结构特性与流变特性构效关系研究进展[J]. 中国果菜, 2025, 45(12): 28-36.
WANG Jing, BI Jinfeng, LIU Kaiyue, et al. Research progress on structure-activity relationship between pectin structural characteristics and rheological properties[J]. China Fruit & Vegetable, 2025, 45(12): 28-36.

[5] MA X F, HABIBI M, SAGIS L M C. Air-water interfacial and foaming properties of lupin protein-polysaccharide soluble complexes: Role of physicochemical properties, morphological characteristics, and flexibility[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 165: 111247.

[6] 张紫媛, 王琳, 田佳奇, 等 . 天然提取物对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(6): 413-424.
ZHANG Z Y, WANG L, TIAN J Q, et al. Effects of natural extracts on the gel properties of myofibrillar protein[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(6): 413-424.

[7] 冀世敏, 张连富 . 小麦面筋蛋白-果胶复合物的制备及功能特性研究[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(8): 84-90.

JI Shimin, ZHANG Lianfu. Study on the preparation and functional properties of wheat gluten-pectin complexes[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(8): 84-90.

[8] LI Y, ZHONG M M, XIE F Y, et al. The effect of pH on the stabilization and digestive characteristics of soybean lipophilic protein oil-in-water emulsions with hypromellose[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125579.

[9] 刘盼玲, 唐诗琦, 闫世长 等 . 大豆亲脂蛋白-绿原酸碱、酶和自由基共价结合体系的构象变化、功能性质及复合机制的研究[J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 80-91.
LIU Panling, TANG Shiqi, YAN Shizhang, et al. Conformational changes, functional properties and complexation mechanisms of soybean lipophilic protein - chlorogenic acid alkaline, enzymatic, and free radical covalent binding systems[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 80-91.

[10] AL-SHABIB N A, KHAN J M, MALIK A, et al. Molecular interaction of tea catechin with bovine β - lactoglobulin: A spectroscopic and in silico studies[J]. Saudi Pharmaceutical Journal, 2020, 28(3): 238-245.

[11] XUE H, XU M, LIAO M F, et al. Effects of tea and *Illicium verum* braise on physicochemical characteristics, microstructure, and molecular structure of heat-induced egg white protein gel[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106181.

[12] SIRISON J, ISHII T, MATSUMIYA K, et al. Comparison of surface and foaming properties of soy lipophilic protein with those of glycinin and β-conglycinin[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106345.

[13] 刘文芳, 田汉民, 刘维龙 . PSO 算法应用于悬滴法表面张力的计算[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(4): 149-151, 156.
LIU Wenfang, TIAN Hanmin, LIU Weilong. Surface tension calculation by pendant drop method using PSO algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(4): 149-151, 156.

[14] LING S D, ZHANG J W, ZHUO C, et al. Generation of monodisperse micro-droplets within the stable narrowing jetting regime: Effects of viscosity and interfacial tension[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2022, 26(7): 53.

[15] GARCÍA ARTEAGA V, APÉSTEGUI GUARDIA M, MURANYI I, et al. Effect of enzymatic hydrolysis on molecular weight distribution, techno - functional properties and sensory perception of pea protein isolates[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 65: 102449.

[16] 董浩东, 朱丽蕊, 田东林, 等 . 微波预处理对小麦麦芽醇溶蛋白结构及啤酒致敏性影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2025, 56(6): 907-918.
DONG Haodong, ZHU Lirui, TIAN Donglin, et al. Microwave pretreatment on gliadin structure in wheat malt and beer allergenicity[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2025, 56(6): 907-918.

[17] AN Z N, LIU Z B, MO H Z, et al. Preparation of Pickering emulsion gel stabilized by tea residue protein/xanthan gum particles and its application in 3D printing[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 343: 111378.

[18] QIU L D, ZHU Y, ZHU X Q, et al. Effects of ultrasound on the structure and properties of soy protein gels prepared with different 11S/7S ratios[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 167: 111392.

[19] DAI S C, LIAO P L, WANG Y L, et al. Soy protein isolate-catechin non-covalent and covalent complexes: Focus on structure, aggregation, stability and *in vitro* digestion characteristics[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108108.

[20] 喻靖 . 柑橘果胶—大豆分离蛋白静电相互作用、界面吸附特性及其乳化稳定性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
YU Jing. Study on the electrostatic interaction, interfacial adsorption properties and emulsion stability of citrus pectin - soy protein isolate system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.

[21] 张佳雨, 周际松, 付青璇, 等 . 果胶复合提升米谷蛋白界面特性及Pickering 乳液的贮藏稳定性[J]. 现代食品科技, 2024, 40(8): 50-60.
ZHANG Jiayu, ZHOU Jisong, FU Qingxuan, et al. Improvement of interfacial properties of rice glutelin via complexation with pectin and storage stability of Pickering emulsions[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 50-60.

[22] 唐令奎, 魏海燕, 龙廷渟, 等 . 菊粉对蛋清-大豆分离蛋白复合蛋白起泡性能的影响及机理初探[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(13): 212-217.
TANG Lingkui, WEI Haiyan, LONG Tingting, et al. Effect of inulin on foaming performance of egg white-soy protein isolate and exploration of its action mechanism[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(13): 212-217.

[23] LI Y H, CHENG Y, ZHANG Z L, et al. Modification of rapeseed protein by ultrasound-assisted pH shift treatment: Ultrasonic mode and frequency screening, changes in protein solubility and structural characteristics[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105240.

[24] ZHONG M M, SUN Y F, SONG H Y, et al. Dithiothreitol-induced reassembly of soybean lipophilic protein as a carrier for resveratrol: Preparation, structural characterization, and functional properties[J]. Food Chemistry, 2023, 399: 133964.

[25] 王帅, 钟明明, 王震霄, 等 . 超声辅助 pH 值偏移处理对大豆亲脂蛋白结构和功能性质的影响及其相关性分析[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 169-176.
WANG Shuai, ZHONG Mingming, WANG Zhenxiao, et al. Effect of ultrasound-assisted pH shift on the structural and functional properties of soybean lipophilic proteins and correlation between them[J]. Food Science, 2024, 45(16): 169-176.

[26] YANG W, DENG C J, XU L S, et al. Protein-neutral polysaccharide nano-and micro-biopolymer complexes fabricated by lactoferrin and oat β - glucan: Structural characteristics and molecular interaction mechanisms[J]. Food Research International, 2020, 132: 109111.

[27] GUO Y N, ZHANG S, GU Y, et al. Mechanism of sodium alginate synergistically improving foaming properties of pea protein isolate: Air/water interface microstructure and rheological properties[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110624.

[28] HUANG D J, ZHANG W Y, LIU Y Y, et al. Effect of combined pH-Shifting and high - intensity ultrasound treatment on the structural, functional, and foaming properties of *Tenebrio* Molitor Protein[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 167: 111384.

[29] HONG X, LI J Y, SHEN Y W, et al. Achieving high - performance *Spirulina platensis* protein isolate - based foam *via* ultrasound coupled with pH shift-induced interfacial remodeling: Dynamic adsorption and interfacial rheology behavior[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 168: 111479.

[30] AL-THAIBANI A, MOSTAFA H, AL ALAWI M, et al. Camel milk whey powder formulated using thermal (spray - drying process) and non - thermal (ultrasonication) processing methods: Effect on physicochemical, technological, and functional properties[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107097.

[31] HUANG D J, XU Y Z, ZHANG W Y, et al. Enhancement of foaming property of *Ormosia protein*: Insights into the effect of high-intensity ultrasound on physicochemical properties and structure analysis[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109902.

[32] ZHANG S L, TIAN L, YI J H, et al. Impact of high-intensity ultrasound on the chemical and physical stability of oil-in-water emulsions stabilized by almond protein isolate[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 149: 111972.

[33] QIAN S, LAN T T, ZHAO X, et al. Mechanism of ultrasonic combined with different fields on protein complex system and its effect on its functional characteristics and application: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 98: 106532.

责任编辑:王艳
收稿日期:2026-01-23