刘俊祥, 汤盼盼, 刘志伟. 冷等离子体介导豌豆分离蛋白淀粉样纤维状聚集及对其乳化性和起泡性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 122−131. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040308
LIU Junxiang, TANG Panpan, LIU Zhiwei. Effect of Cold Plasma-mediated Amyloid Fibrous Aggregation on the Emulsification and Foaming Properties of Pea Protein Isolate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 122−131. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040308

· 研究与探讨 ·

冷等离子体介导豌豆分离蛋白淀粉样纤维状聚集及对其乳化性和起泡性的影响

刘俊祥, 汤盼盼, 刘志伟*
（湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128）

摘　要: 本研究评估了冷等离子体（Cold plasma，CP）处理相较于传统酸热法促进豌豆分离蛋白（Pea protein isolate，PPI）淀粉样纤维形成的潜力，同时测定了 PPI 淀粉样纤维的 ThT 荧光强度、微观结构、分子结构、粒径分布、Zeta 电位、表面疏水性、表面游离巯基、游离巯基、总巯基和二硫键含量、乳化性及起泡性等指标的变化情况。结果表明，CP 可显著促进 PPI 淀粉样纤维的形成。与传统酸热法形成的 PPI 淀粉样纤维（A-PF）相比，CP 介导形成的 PPI 淀粉样纤维（CP-PF）表现出更高的 ThT 荧光强度和 β-折叠相对含量，和更短的形成成熟纤维时间。加热 60 min，与 A-PF（219.84 nm）相比，CP-PF 可形成更长的淀粉样纤维（961.35 nm）。疏水性、游离巯基和二硫键分析结果表明，疏水相互作用力和二硫键是驱动 β-折叠结构自组装和有序堆叠形成 CP-PF 的主要驱动力。此外，纤维化显著改善了 PPI 的功能特性，A-PF 和 CP-PF 的乳化性和起泡性显著提高。与 A-PF 相比，CP-PF 表现出更优的乳化性（提升 9.1%）和起泡性（提升 6.8%）。本研究证实 CP 是一种有效促进蛋白淀粉样纤维化，并改善其功能性的技术手段。

关键词: 冷等离子体, 豌豆分离蛋白, 淀粉样纤维, 乳化性, 起泡性
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0122−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040308
本文网刊:

Effect of Cold Plasma-mediated Amyloid Fibrous Aggregation on the Emulsification and Foaming Properties of Pea Protein Isolate

LIU Junxiang，TANG Panpan，LIU Zhiwei*
（College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China）

Abstract: The potential of cold plasma (CP) treatment to promote the formation of amyloid fibrils of pea protein isolate (PPI) was evaluated relative to acidic heat fibrillation condition. The changes of ThT fluorescence intensity, microstructure, molecular structure, particle size distribution, Zeta potential, surface hydrophobicity, surface free sulfhydryl, free sulfhydryl, total sulfhydryl, and disulfide bonds content, emulsifying activity and foaming capacity of PPI amyloid fibrils were determined. Results indicated that the formation of PPI amyloid fibrils was significantly accelerated by CP treatment. Compared to acidic heat-induced PPI amyloid fibrils (A-PF), CP-mediated fibrils (CP-PF) showed higher ThT fluorescence intensity, relative content of β-fold, and shorter maturation time. After 60 min of heating, CP-PF formed longer fibrils (961.35 nm) than A-PF (219.84 nm). Hydrophobicity, free sulfhydryl groups, and disulfide bond analyses revealed that hydrophobic interactions and disulfide bonds were the primary driving forces for the self-assembly and ordered stacking of β-sheet structures during fibrillation process. Furthermore, fibrillization markedly improved the functional properties of PPI. The emulsifying activity and foaming capacity of A-PF and CP-PF were significantly enhancing. Notably, CP-PF exhibited

收稿日期: 2025−04−25
基金项目: 湖南省自然科学基金（2023JJ30294, 2022GK4014）; 湖南省重点研发计划（2023NK2021）; 湖南省研究生科研创新项目（CX20240661, 2024XKC049）。
作者简介: 刘俊祥（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品蛋白, E-mail: a2653058256@126.com。
*** 通信作者:** 刘志伟（1985−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品非热加工, 食品蛋白改性, E-mail: zwliu@hunau.edu.cn。

superior emulsifying (improved by 9.1%) and foaming properties (improved by 6.8%) compared to A-PF. This study demonstrated that CP was an effective technique for promoting PPI amyloid fibril formation and improving its functionality.

Key words: cold plasma; pea protein isolate; amyloid fibrils; emulsification properties; foaming properties

近年来，植物蛋白因经济和可持续等优点而备受关注[1]。其中豌豆分离蛋白高营养价值、来源广泛以及低致敏性等优势，在食品加工中的应用日益增加[2−3]。PPI 主要由球蛋白（65%~80%）和清蛋白（10%~20%）构成。其中，清蛋白（5~80 kDa，2S）为水溶性蛋白[4]。而球蛋白属于盐溶性蛋白，依据沉降系数可分为 legumin（11S）、vicilin（7S）和 convicilin[5]。PPI 作为一种氨基酸组成均衡的优质蛋白质，富含赖氨酸，此外，PPI 是生物活性肽的重要来源[6−8]。除了营养价值外，PPI 还表现出良好的功能特性，如乳化性、起泡性和凝胶性等[4]。然而，PPI 紧密结构导致其表面电荷密度较低、分子尺寸较大且柔性不足，从而限制了 PPI 的功能性[9]。因此，对 PPI 改性以改善其功能性和加工性十分必要。

食源性蛋白淀粉样纤维是由食品蛋白质在酸性（pH2~3）、高温（80~90 ℃）和低离子浓度下获得的一种富含交叉 β-折叠的蛋白聚集体[10−11]。蛋白淀粉样纤维具有极高的纵横比、良好的分子柔性和丰富的表面功能基团，从而展现出卓越的功能特性[10]。米糠蛋白[12]、大豆蛋白[13]、蚕豆蛋白[14] 等食品蛋白在淀粉样纤维化后功能特性得到显著提升。因此蛋白淀粉样纤维化被认为是一种提升食源蛋白质功能性的新方法。已有报道显示，酸热加工能够使 PPI 具有形成淀粉样纤维的潜能，如 Zhang 等[15] 研究发现，PPI 在 pH2.0、80 ℃ 条件下加热 78 h 能形成大量蠕虫状形态和少量线状的纤维聚集体。Liu 等[16] 发现，PPI 在蛋白含量 1.5%、pH2.0、85 ℃ 加热 24 h 能形成丝状淀粉样纤维。因此，应用 PPI 制备淀粉样纤维具有可行性。虽然已有相关研究报道 PPI 在酸热环境下会出现纤维化聚集行为，但传统热酸法制备蛋白淀粉样纤维需要极端酸性条件和较长水解时间，会阻碍蛋白淀粉样纤维的形成并限制其实际应用。此外，蛋白淀粉样纤维转化率与其分子结构密切相关。天然植物蛋白致密的球状结构和较低的溶解性，限制其在纤维化初始阶段的酸性水解过程，从而导致淀粉样纤维转化效率和转化率偏低[17−18]。研究表明，通过化学[19]、生物[20] 或物理修饰可显著提升蛋白的淀粉样纤维转化效率[21]。其中，物理修饰方法因其环境友好性、无化学残留和高处理效率等优点而备受关注。Tong 等[13] 研究发现，超声预处理使大豆蛋白的疏水区域暴露，从而促进大豆蛋白淀粉样纤维的形成。Liu 等[22] 研究发现，低频磁场预处理能使豌豆球蛋白结构展开，从而促进豌豆球蛋白淀粉样纤维的形成。CP 作为一种利用高能活性氧氮粒子修饰基质物性的手段，因具有绿色、高效等优点，在食品加工领域，尤其是蛋白改性修饰方面具有良好应用前景[23−25]，CP 使蛋白肽链断开，生成小分子肽，类似于食源性蛋白酸热成纤过程中酸热水解蛋白的特性[26]，使 CP 在诱导蛋白成纤方面具有巨大潜力。然而，目前相关的研究仍较为匮乏，亟待深入探索。

因此，本文以 PPI 为对象，通过酸热法对比，研究了 CP 介导的淀粉样纤维状聚集，及纤维化对 PPI 乳化性和起泡性的影响。首先，通过 SDS-PAGE、FTIR 和内源荧光光谱分析成纤过程中 PPI 的结构变化；同时，通过 ThT 荧光光谱、动态激光散射、Zeta 电位和 TEM 检测 PPI 淀粉样纤维的形成过程和形貌变化；另外，通过成纤过程中表面疏水性和二硫键的变化，分析了 PPI 淀粉样纤维自组装驱动力；最后，研究了纤维状聚集对 PPI 乳化性和起泡性的影响。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

豌豆分离蛋白（98%）　上海颖心实验室设备有限公司；十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳（sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE）凝胶制备试剂盒、BeyoBlue 考马斯亮蓝超快染色液　上海碧云天生物技术有限公司；蛋白 Marker　索莱宝科技（中国台湾）；硫黄素 T（thioflavin T, ThT）　Sigma-Aldrich Co, Ltd（St. Louis, MO, USA）；8-苯胺基-1-萘磺酸（8-anilino-1-naphthalenesulfonic acid, ANS）　阿拉丁化工（上海）有限公司；盐酸胍、甘氨酸、尿素、乙二胺四乙酸、三羟甲基氨基甲烷（Tris（hydroxymethyl）aminomethan, Tris）　国药集团化学试剂有限公司；5,5-二硫代 2-硝基苯甲酸　上海瑞永生物科技有限公司；以上试剂均为分析纯及以上级别。

Wix-multipro 2 垂直凝胶电泳装置　韦克斯科技（北京）有限公司；CTP-2000K 等离子体装置　南京苏曼电子有限公司；TS-300T 脱色摇床　杭州米欧仪器有限公司；ZETASIZER NANO ZS 纳米粒度仪　英格兰马尔文仪器有限公司；Multiskan Go Reader 酶标仪　芬兰万塔赛默飞世尔科技有限公司；HJ-6B 磁力搅拌器　苏瑞仪器（常州）有限公司；VORTEX-5 旋涡混合器　其林贝尔仪器制造（海门）有限公司；iS50 傅里叶变换红外光谱（Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR）仪　日本岛津；FEI Tecnai G2 12 透射电子显微镜（Transmission electron microscopy, TEM）　美国 FEI；F-7000 荧光分光光度计　日本岛津仪器有限公司；SCIENTZ-

18N 冷冻干燥机　新芝生物科技(宁波)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 CP 处理　参照 Liu 等[27]的方法并稍作修改,利用介质阻挡放电(Dielectric barrier discharges, DBD)等离子体发生装置进行 CP 处理。将 PPI(10 mg/mL)溶解于超纯水中,用磁力搅拌 12 h 充分水合后,取 5 mL PPI 样品溶液置于石英皿中,CP 处理参数为:40 kV、14 kHz, 9 min, CP 处理后 PPI 样品于 4 ℃ 保存,所有分析均在 24 h 内进行。

1.2.2 PPI 淀粉样纤维的制备　参照 Liu 等[28]的方法并稍作修改,酸热法制备 PPI 淀粉样纤维:将 PPI 溶液(10 mg/mL)用 1 mol/L HCl 溶液调节 pH 至 2.3,然后在 85 ℃ 的恒温水浴搅拌(100 r/min)加热,于不同加热时间(0、10、20、30、40、50、60、90、120、180、300 和 540 min)取样后,立即冰水冷却,于 4 ℃ 保存。酸性加热条件下形成的 PPI 淀粉样纤维命名为 A-PF。将 CP 处理后的 PPI 溶液在 85 ℃ 的恒温水浴搅拌(100 r/min)加热不同时间(0、10、20、30、40、50、60、90、120、180、300 和 540 min)后取样,立即于冰水中冷却,4 ℃ 保存。CP 介导形成的 PPI 淀粉样纤维命名为 CP-PF。

1.2.3 ThT 荧光分析　参照 Tang 等[25]的方法,将 ThT 溶解于磷酸盐缓冲液(10 mmol/L 磷酸盐,150 mmol/L NaCl, pH7.0)中,制得 1 mmol/L ThT 原液,用铝箔避光 4 ℃ 保存。将原液用磷酸盐缓冲液稀释成 50 μmol/L 的工作液。取 40 μL 样品(10 mg/mL)与 4 mL ThT 工作液混合,室温孵育 20 min,用 microplate reader 测定荧光强度,参数为:激发波长 440 nm,发射波长 480 nm,激发和发射狭缝 12 nm。

1.2.4 TEM 测定　PPI 淀粉样纤维样品用去离子水稀释至 0.1 mg/mL,将样品溶液置于铜网板,用醋酸铀酰负染,并在 100 kV 下进行 TEM 观察 PPI 淀粉样纤维样品的微观形貌。使用 Fiji imagej 进行图像处理,分析 PPI 淀粉样纤维长度。

1.2.5 SDS-PAGE　参照 Liu 等[29]的方法并稍作修改,采用 5% 浓缩胶和 10% 分离胶制备 SDS-PAGE 凝胶。将样品用去离子水稀释至 2 mg/mL,稀释后的样品与还原性上样缓冲液按(1∶4, v/v)比例混合后,90 ℃ 金属浴加热 10 min。蛋白 Marker 和样品分别上样 6 μL 和 10 μL,在 75 V 恒压下电泳 3 h,电泳后用超快染色液染色 30 min,再用脱色液(乙酸∶乙醇∶蒸馏水=1∶2∶7, v/v)脱色,直到条带清晰。

1.2.6 FTIR 测定　将冻干后的样品(30 mg)粉碎,与 3.0 g 干燥的溴化钾(重量 1.0%)混合,压缩成薄片进行分析。光谱扫描范围为 400~4000 cm^{-1},分辨率为 4 cm^{-1},扫描次数为 5 次。

1.2.7 粒径分布和 Zeta 电位的测定　用纳米粒度仪测定 PPI 样品(用去离子水稀释至 1 mg/mL)的粒径分布和 Zeta 电位,蛋白质折射率为 1.45,连续相折射率为 1.33。

1.2.8 表面疏水性测定　用 ANS 荧光探针测定 PPI 在淀粉样纤维形成过程中表面疏水性的变化。样品用去离子水稀释至 1 mg/mL。1 mL 样品中加入 8 μL ANS 溶液(5 mmol/L, 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液, pH7)。混合均匀,暗处反应 30 min。测定参数为:激发波长 380 nm(狭缝宽度=2.5 nm),发射波长 400~600 nm(狭缝宽度=5 nm)。

1.2.9 表面游离巯基、游离巯基、总巯基和二硫键的测定　参照 Tang 等[25]的方法并作修改,测定 PPI 样品在纤维形成过程中表面游离巯基、游离巯基以及总巯基(包括二硫键)和二硫键的动态转换。表面游离巯基:样品(0.5 mL)与 2 mL Tris-glycine 缓冲溶液(86 mmol/L Tris, 90 mmol/L 甘氨酸, 4 mmol/L EDTA, pH8.0)混合;游离巯基:将样品(0.5 mL)加入到含有 8 mol/L 尿素和 0.5% SDS 的 2 mL Tris-glycine 缓冲溶液中;总巯基(含二硫键):样品(0.5 mL)先与 0.025 mL β-巯基乙醇和 1 mL 尿素盐酸胍(6 mol/L)混合,在 25 ℃ 下孵育 1 h。为了沉淀 PPI,加入 2.5 mL 三氯乙酸溶液(12%),静置 1 h。10000×g 离心 10 min,收集沉淀,再用三氯乙酸溶液(12%)离心 2 次,去除 β-巯基乙醇。将沉淀溶解于 2 mL 含有 0.5% SDS 和 8 mol/L 尿素 Tris-glycine 缓冲液中。将以上三种样品分别与 0.02 mL Ellman 试剂(4 mg/mL 5,5-二硫代双(2-硝基苯甲酸)DTNB)和 Tris-glycine 缓冲液混合。将混合物在室温下混合均匀后孵育 30 min,于 412 nm 处测定吸光值。缓冲液为空白对照。巯基和二硫键(S-S)的含量用下式计算:

表面游离巯基、游离巯基、总巯基(含二硫化物)含量:

$$SH(\mu mol/g) = \frac{(75.53 \times A_{412}) \times n}{C} \quad 式(1)$$

二硫键含量:

$$S\text{-}S(\mu mol/g) = \frac{SH_{total} - SH_{free\ sulfhydryl}}{2} \quad 式(2)$$

式中,A_{412}:样品吸光度;C:蛋白浓度(1 mg/mL);n:稀释率;因子 73.53 由 $10^6/(1.36\times10^4)$得到。

1.2.10 表观粘度测定　利用流变仪测定样品(10 mg/mL)表观粘度。在 25 ℃ 下,使用直径为 40 mm、板间距为 1 mm 的平板测量剪切速率在 0.1~100 s^{-1} 范围内样品的表观粘度变化。

1.2.11 乳化性(EAI)和乳化稳定性(ESI)测定　参照 Liu 等[30]的方法,利用去离子水稀释 A-PF 和 CP-PF 样品至 1 mg/mL,将 6 mL 蛋白稀释液(pH2.3)和 2 mL 大豆油在 12000 r/min 下高速剪切 2 min,制备乳液。将 50 μL 乳液和 4 mL SDS(0.1wt%)充分混合后,于 500 nm 处测定吸光度。EAI 和 ESI 通过以下公式计算:

$$EAI(m^2/g)=\frac{2\times2.303\times A_0\times D}{c\times(1-\varphi)\times10000}$$　　式（3）

$$ESI(min)=\frac{A_0}{A_0-A_{10}}\times10$$　　式（4）

式中，A_0 和 A_{10} 分别为乳液在 0 min 和 10 min 的吸光度；D 为稀释因子（4000/50=80）；C 为蛋白浓度（0.001 g/mL）；φ 为油的体积分数（0.25）。

1.2.12　起泡性（FC）和起泡稳定性（FS）测定　参照 Qi 等[31] 的方法并修改，将 10 mL 样品溶液（10 mg/mL）置于 50 mL 烧杯中，以 10000 r/min 剪切 2 min，迅速将样品溶液倒入 50 mL 量筒中，测量泡沫在量筒中的体积。根据以下公式计算 FC 和 FS。

$$FC(\%)=\frac{V_0}{10}\times100$$　　式（5）

$$FS(\%)=\frac{V_{10}}{V_0}\times100$$　　式（6）

式中，静置 0 min 后泡沫体积记为 V_0；静置 10 min 后泡沫体积记为 V_{10}。

1.3　数据处理

所有的试验数据均由平行测定三次获得，结果以平均值±标准差的形式表示，采用 Excel 2010 以及 SPSS 25.0 进行统计和显著性分析（P<0.05），用 Origin 2021 软件进行绘图。

2　结果与分析

2.1　ThT 荧光分析

ThT 作为一种特异性荧光探针，与蛋白的 β-折叠结构特异性结合其荧光会显著增加，因此被广泛应用于蛋白淀粉样纤维形成的表征[32]。A-PF 和 CP-PF 在成纤过程中 ThT 荧光强度变化，如图 1 所示。热处理 10 min，PPI 的 ThT 荧光强度迅速升高，随加热时间延长至 30 min，ThT 荧光强度持续上升，并达到稳定期，表明蛋白结构发生显著变化（交叉 β-折叠结构增加），成功形成 PPI 淀粉样纤维[18]。特别是，与 A-PF 相比，CP-PF 的 ThT 荧光强度显著增强。热处理 30 min，CP-PF 的 ThT 荧光强度（1.976±0.013）比 A-PF（1.413±0.031）高约 40%。该结果表明 CP 处理可显著促进 PPI 淀粉样纤维的形成，其原

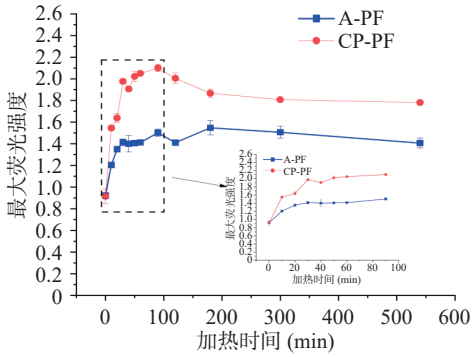


图 1　PPI 成纤过程 ThT 荧光强度变化

Fig.1　Changes in ThT fluorescent intensity of PPI during fibrillation process

因为 CP 产生的活性粒子（如 O_3、NO_3^- 和 H_2O_2 等）介导的蛋白肽链断裂和结构展开促进 PPI 淀粉样纤维的形成[25,29]。

2.2　PPI 淀粉样纤维形貌

利用 TEM 表征了 PPI 成纤过程中的形貌变化。结果如图 2 所示，A-PF 和 CP-PF 在纤维形貌特征上表现出明显差异。未加热前，A-PF 主要呈现球状颗粒形态，其平均直径为 29.05 nm；而 CP-PF 除球状颗粒外，还观察到短棒状结构，其平均长度为 48.98 nm。热处理 60 min，A-PF 开始出现棒状纤维结构，其平均长度达到 219.84 nm；与 A-PF 相比，CP-PF 则形成更为细长且具有良好柔性的长条状纤维结构，平均长度显著增加到 961.35 nm。随加热时间延长至 540 min，A-PF 逐渐成熟，纤维长度持续增加到 399.78 nm；而 CP-PF 的纤维结构发生断裂现象[33]，出现棒状纤维结构，纤维长度显著降低到 497.22 nm。在成纤过程中，CP-PF 相较于 A-PF 表现出更长的纤维形态。

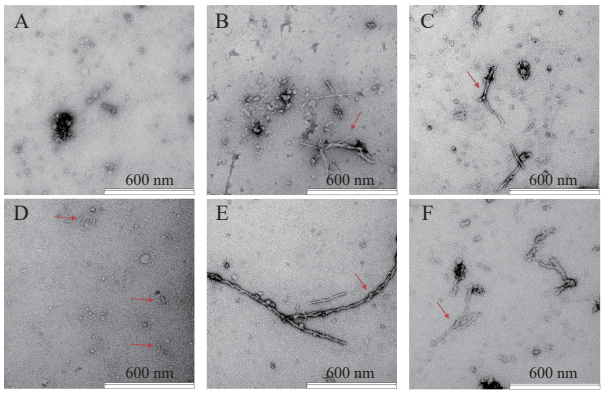


图 2　PPI 成纤过程形貌变化（μ=600 nm）

Fig.2　Change in morphology of PPI during fibrillation process (μ=600 nm)

注：A、B、C 分别为 A-PF-0 min、A-PF-60 min、A-PF-540 min；D、E、F 分别为 CP-PF-0 min、CP-PF-60 min、CP-PF-540 min，标尺为 600 nm，放大倍数 13000 倍。

2.3　SDS-PAGE 分析

通过 SDS-PAGE 研究了 PPI 成纤过程一级结构的变化。结果如图 3 所示，随加热时间的延长，A-PF 和 CP-PF 中豌豆 7S 球蛋白组分（Convicilin（70 kDa）和 Vicilin（48 kDa））以及 11S 球蛋白组分（酸性亚基（39 kDa），碱性亚基（22 kDa））的特征条带强度逐渐减弱[34]，表明在酸性 pH 和高温条件下，PPI 发生显著水解。该结果与燕麦球蛋白[35] 和苋菜蛋白[36] 成纤过程一级结构的变化相一致。此外，CP-PF 的条带也呈现类似的变化趋势，表明 CP 作用于蛋白表现出类似于酸水解，使蛋白结构展开和肽链断裂的特性，有助于 PPI 淀粉样纤维的形成。

2.4　FTIR 分析

通过 FTIR 分析了 PPI 在成纤过程中蛋白二级结构的变化。结果如图 4 所示。随加热时间的延长，酰胺 I 带（1700~1600 cm^{-1}）和酰胺 A 带（3200~

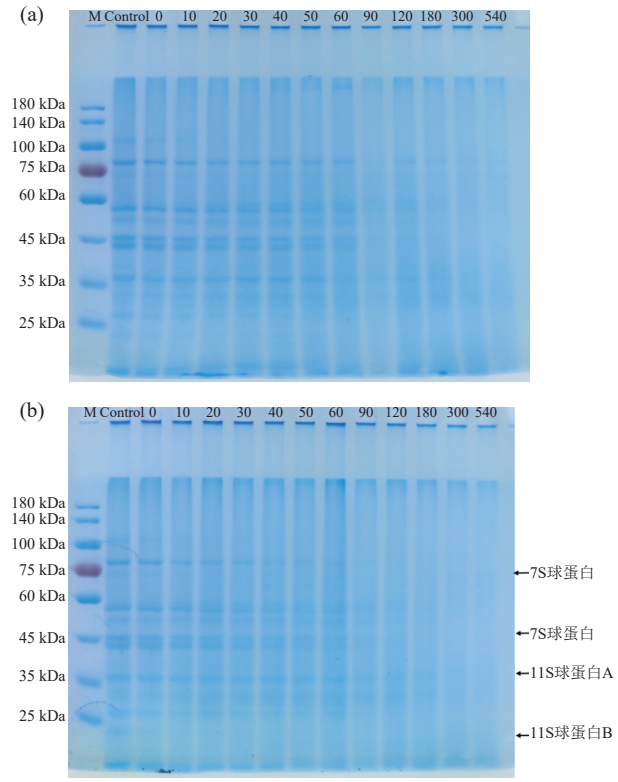


图 3　PPI 成纤过程一级结构变化

Fig.3　Changes in primary structure of PPI during fibrillation process

注: (a)A-PF; (b)CP-PF。

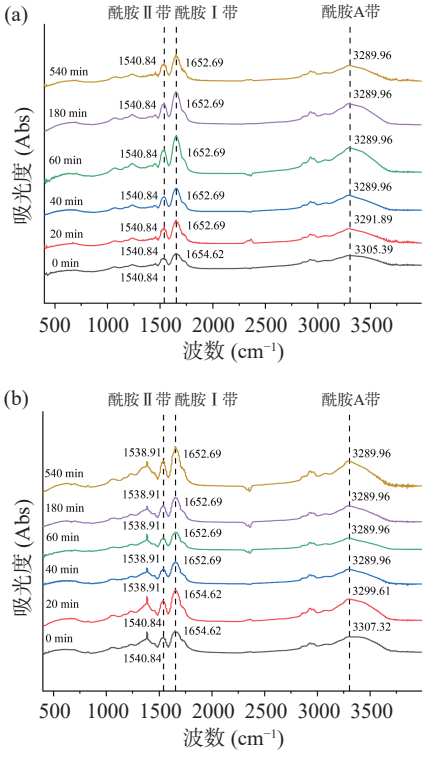


图 4　PPI 在成纤过程中的红外图谱

Fig.4　Changes in infrared spectrum of PPI during fibrillation process

注: (a)和(b)分别为 A-PF 和 CP-PF。

3400 cm^{-1})均出现明显的蓝移现象, 该变化反映了蛋白分子内氢键网络的重组过程, 表明 PPI 淀粉样纤维中形成了更紧密的氢键网络, 氢键相互作用对稳定 *β*-折叠结构和维持淀粉样纤维的整体构象具有关键作用[37−38]。

PPI 在成纤过程的二级结构变化, 如表 1 所示。在酸热处理的 0~180 min, A-PF 的有序结构不断形成, 并趋于稳定, 表现为 *β*-折叠和 *β*-转角相对含量逐渐增大。其中 *β*-折叠相对含量在 180 min 达到最大, 为 32.4%±0.4%, 表明 *β*-折叠在 A-PF 的成纤过程中大量存在, 有助于 A-PF 的形成[39]。在酸热处理后期(180~540 min), *α*-螺旋、*β*-折叠和 *β*-转角相对含量显著下降, 无规卷曲相对含量显著上升(P<0.05)。CP-PF 也表现出相似的变化趋势, 其 *β*-折叠相对含量在 60 min 时达到最大值(36.2%±0.4%), 随加热时间的延长, *β*-折叠相对含量逐渐降低。特别是, 在成纤过程中, CP-PF 的 *β*-折叠相对含量始终高于 A-PF, 该结果证实了 CP 介导淀粉样纤维状聚集能够促进 *β*-折叠结构的形成和稳定。这些结构变化特征与 ThT 荧光强度和 TEM 观察结果相一致, 表明 *β*-折叠结构的形成和稳定是决定 PPI 淀粉样纤维形成效率的关键因素。该结果与卵清蛋白[40] 和大米蛋白[31] 淀粉样纤维形成过程的结构转变结果相似。

表 1　PPI 成纤过程二级结构变化

Table 1　Changes in secondary structure of PPI during fibrillation process.

样品	*α*-螺旋(%)	*β*-折叠(%)	*β*-转角(%)	无规卷曲(%)
A-PF-0 min	25±0.2^{a}	26.6±0.7^{d}	30±0.3^{c}	18.4±0.4^{a}
A-PF-20 min	22.6±0.1^{b}	29.6±0.2^{c}	31.5±0.1^{b}	16.3±0.3^{c}
A-PF-40 min	22.3±0.3^{bc}	30.8±0.5^{b}	31.8±0.2^{b}	15.1±0.4^{d}
A-PF-60 min	22.1±0.2^{c}	31.9±0.3^{a}	33±0.7^{a}	13±0.6^{e}
A-PF-180 min	21.2±0.4^{d}	32.4±0.4^{a}	33.1±0.2^{a}	13.3±0.9^{e}
A-PF-540 min	20.5±0.3^{e}	30.2±0.3^{bc}	32±0.2^{b}	17.3±0.4^{b}
CP-PF-0 min	24.3±0.7^{a}	27.4±0.4^{d}	29.8±0.2^{b}	18.5±0.3^{b}
CP-PF-20 min	20.2±0.3^{b}	32.8±1.1^{c}	30.4±0.4^{b}	16.6±0.4^{c}
CP-PF-40 min	19.1±0.4^{c}	33.9±0.6^{bc}	31.1±0.5^{a}	15.9±0.5^{c}
CP-PF-60 min	18.1±0.2^{d}	36.2±0.4^{a}	30.2±0.4^{b}	15.5±1.1^{c}
CP-PF-180 min	17.8±0.3^{d}	34.3±0.3^{b}	29.1±0.3^{bc}	17.9±0.3^{b}
CP-PF-540 min	15.9±0.4^{e}	33.9±0.4^{bc}	28.2±0.3^{c}	21.0±0.8^{a}

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.5　Zeta 电位和表面疏水性分析

通过测定 Zeta 电位(*ζ* 电位)研究 PPI 成纤过程中表面电荷的变化规律, 结果如图 5a 所示。热处理 180 min, A-PF 的 *ζ* 电位显著增加(P<0.05)并达到最大值(31.75±1.15 mV)。*ζ* 电位的升高可归因于成纤过程中氨基基团的质子化作用导致-NH_3^+基团暴露[41]。随加热时间延长至 540 min, A-PF 的 *ζ* 电位略微下降, 原因可能是形成了长径比更大的 PPI 淀粉样纤维, 导致带电基团重新被埋入长链聚集体内部[42]。该现象与已有研究结果相一致[43]。CP-PF 呈现类似的 *ζ* 电位变化趋势。在成纤过程中, CP-PF 的 *ζ* 电位始终高于 A-PF, 表明 CP-PF 的肽段具有更好的溶液稳定性和分散性, 相应地也显示出更强的有序蛋白纤维形成能力。

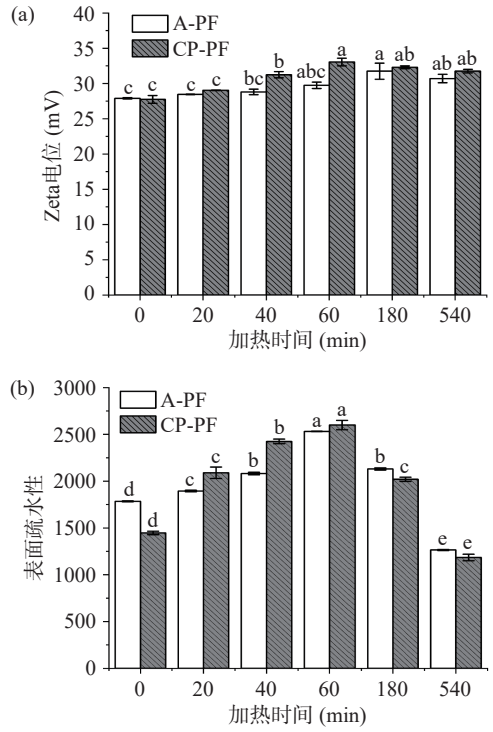


图 5　PPI 成纤过程中 Zeta 电位和表面疏水性变化

Fig.5　Changes in Zeta potential and surface hydrophobicity of PPI during fibrillation process

注: (a)和(b)分别为 Zeta 电位和表面疏水性, 不同字母表示具有显著性差异 P<0.05, 图 6、图 9~图 10 同。

PPI 成纤过程中表面疏水性的变化规律如图 5b 所示。热处理 60 min, A-PF 的表面疏水性显著增加(P<0.05)并达到最大值, 表明 PPI 分子通过结构展开和水解作用, 使原本包埋的疏水性基团暴露于分子表面。随加热时间的延长, A-PF 的表面疏水性逐渐降低, 表明成纤过程中的构建单元(交叉 β-折叠结构)通过疏水相互作用自组装形成有序纤维结构[44]。CP-PF 也表现出相似的变化趋势。特别是, 在酸热处理的 20~60 min, CP-PF 的表面疏水性高于 A-PF, 表明 CP 介导 PPI 淀粉样纤维状聚集有利于 PPI 结构展开。以上结果与 Yang 等[45] 的研究结果一致。上述结果表明, 疏水相互作用是 PPI 淀粉样纤维形成的主要分子作用力。

2.6　巯基和二硫键分析

在影响蛋白淀粉样纤维形成的诸多因素中, 二硫键通过分子内和分子间作用对成纤过程具有关键作用。分子内二硫键可维持蛋白质的天然构象稳定性, 从而抑制淀粉样纤维聚集; 而分子间二硫键则通过促进蛋白质分子的交联, 显著加速成纤进程[46]。PPI 成纤过程中的表面游离巯基、总游离巯基、总巯基(含二硫键)和二硫键的动态变化, 如图 6 所示。热处理 60 min, CP-PF 的表面游离巯基含量显著增加(P<0.05), 并达到最大值(3.89±0.09 μmol/g), 表明 CP-PF 在热变性和酸性水解作用下, 其分子疏水核心区的-SH 基团在成纤过程初期逐步暴露[40]。然而, 随加热时间延长至 540 min, 表面游离巯基含量显著下降(P<0.05), 其可能的原因为 PPI 在形成淀粉样纤维的过程中, 部分游离巯基被重新包埋在纤维结构内部[47]。与此同时, 游离巯基和总巯基含量显著降低(P<0.05)。相应地, CP-PF 的二硫键含量显著增加(P<0.05), 并达到最大值(10.16±0.21 μmol/g), 表明 CP-PF 增加的二硫键可能为分子间二硫键, 其增强了多肽链间的分子相互作用, 从而驱动了 PPI 淀粉样纤维的形成[46]。A-PF 也表现出类似的变化趋势(图 6b)。热处理 20 min, A-PF 的表面游离巯基含量显著增加, 并达到最大值(3.86±0.01 μmol/g)。随加热时间延长至 540 min, 表面游离巯基含量显著下降(P<0.05)。游离巯基和总巯基(含二硫键)含量显著下降(P<0.05)。同时, 二硫键含量显著增加(P<0.05), 并达到最大值(10.05±0.12 μmol/g)。综上所述, 在成纤过程中, 疏水相互作用和二硫键是 PPI 淀粉样纤维形成的主要作用力。

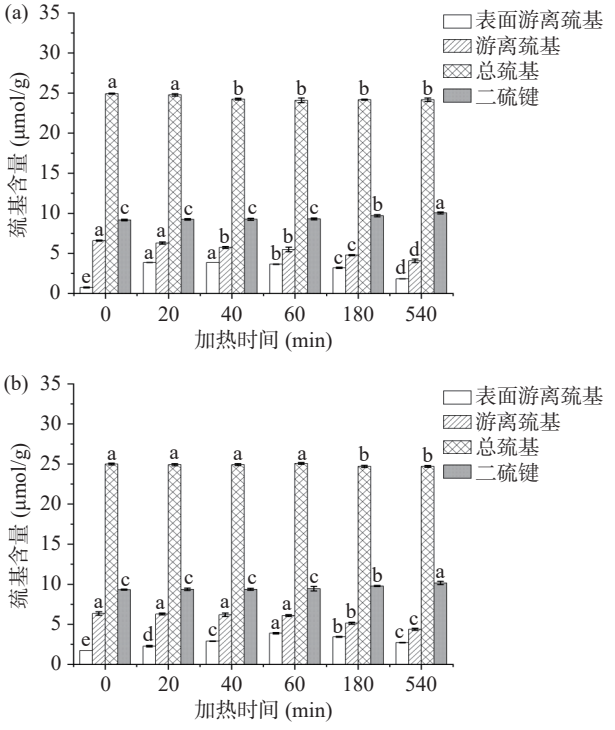


图 6　PPI 成纤过程中表面游离巯基、游离巯基、总巯基和二硫键动态变化

Fig.6　Changes in surface free sulfhydryl, total free sulfhydryl, total sulfhydryl, and disulfide bonds of PPI during fibrillation process

注: (a)和(b)分别为 A-PF 和 CP-PF。

2.7　粒径大小分析

PPI 成纤过程中的粒径变化, 如图 7 所示。未处理的 A-PF 呈现双峰分布特征(图 7a)。热处理 20 min, A-PF 的小粒径峰向左移动, 对应于 A-PF 的水解过程及纤维组装所需构建单元(交叉 β-折叠)的释放。随加热时间延长至 180 min, A-PF 的粒径逐渐增大, 表明释放的构建单元已组装成有序的淀粉样纤维结构[48]。然而, 热处理 540 min, A-PF 的平均粒径显著减小, 说明部分 PPI 淀粉样纤维或聚集体发生解离现象[22]。相比之下, 初始状态下 CP-PF 同样呈现双峰分布, 但其粒径大于 A-PF(图 7b), 与图 2D

的 TEM 图像中观察到的短棒状前体结构相符，表明 CP 处理可诱导 PPI 分子预聚集[49]。热处理 20 min，CP-PF 的大粒径峰和小粒径峰向左移动，粒径减小。随加热时间延长至 60 min，CP-PF 的粒径逐渐增大。在长时间加热后（180~540 min），大粒径峰和小粒径峰都向左移动。以上发现与 TEM 的观察结果相一致，说明 CP 处理可能诱导形成 PPI 淀粉样纤维前体的形成，最终加速了有序 *β*-折叠淀粉样纤维的形成。

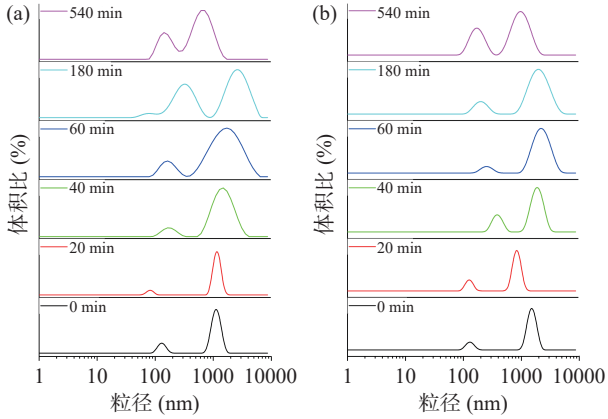


图 7 PPI 在成纤过程中的粒径分布变化

Fig.7 Change in size distribution of PPI during fibrillation process

注：(a)和(b)分别为 A-PF 和 CP-PF。

2.8 表观粘度分析

表观粘度作为影响食品品质特性的关键参数，其变化与蛋白浓度、pH、颗粒尺寸及聚集体形态等密切相关[50]。PPI 成纤过程中表观粘度的变化，如图 8 所示。结果表明，所有 PPI 样品均表现出典型的假塑性流体行为，其表观粘度随剪切速率增加而降低。如图 8a 所示，热处理 20 min，A-PF 的表观粘度显著降低（$P<0.05$），原因可能是蛋白结构展开导致内部疏水区域暴露。随加热时间延长至 540 min，A-PF 的表观粘度逐渐增加，可能是由于分子间相互作用（如疏水作用力和二硫键）促进了 PPI 淀粉样纤维间的交联，增强了网络结构的致密性[51]。相比之下，CP-PF 的表观粘度在 40 min即出现峰值（图 8b），较 A-PF 显著提前，该现象与 TEM 观察到的纤维快速形成过程一致。特别是在成纤过程初期（0~60 min），CP-PF 的表观粘度显著高于 A-PF，直接证实了 CP 介导 PPI 纤维化促进了更紧密的纤维网络结构的形成。随加热时间延长至 540 min，CP-PF 的表观粘度显著降低（$P<0.05$）。蛋白表观粘度的增加与其流体力学直径的增大及成纤过程中形成的缠结网络结构密切相关[52]。热处理时间过长会导致蛋白纤维中产生过多的小分子肽段，减小蛋白样品的流体力学直径，从而降低体系表观粘度[53]。该流变学特征与粒径分析和 TEM 结果相互印证，表明 CP 处理不仅缩短了制备成熟 PPI 淀粉样纤维的时间，而且促进了 CP-PF 中更紧密的纤维网络结构的形成。

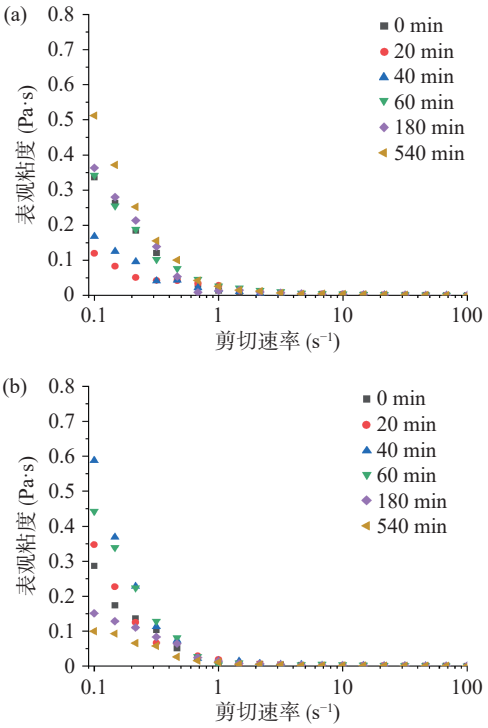


图 8 PPI 成纤过程中表观粘度变化

Fig.8 Change in apparent viscosity of PPI during fibrillation process

注：(a)和(b)分别为 A-PF 和 CP-PF。

2.9 乳化性和乳化稳定性分析

在成纤过程中，A-PF 和 CP-PF 制备的乳液的 EAI 和 ESI 的变化规律如图 9 所示。热处理 540 min，

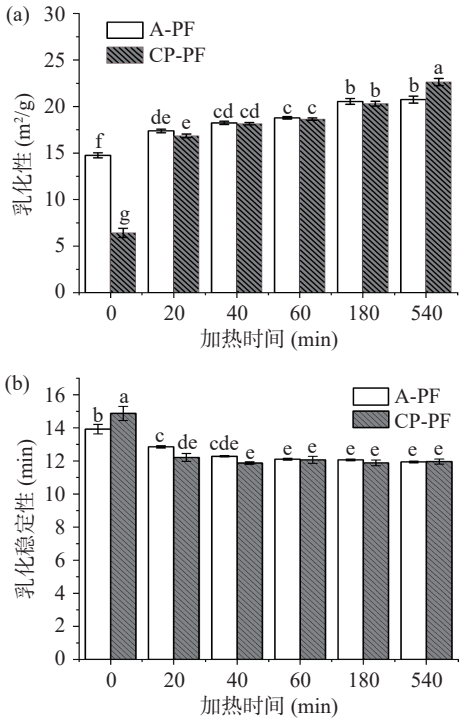


图 9 不同加热时间形成 PPI 淀粉样纤维制备乳液的乳化特性

Fig.9 Emulsifying ability of PPI amyloid fibrils fabricated at different heating times

注：(a)和(b)分别为 EAI 和 ESI。

A-PF 和 CP-PF 的 EAI 显著增加（P<0.05），表明纤维化处理可显著改善 PPI 的乳化性，这得益于蛋白纤维在油-水界面发生不可逆界面吸附，并形成具有复杂微观结构排列的粘弹性层[54]。A-PF 和 CP-PF 的 ESI 略微下降。其中，热处理 540 min，CP-PF 的 EAI 相较于 A-PF 提高 9.1%，表明在成纤时间较长的条件下，CP 诱导形成的 PPI 淀粉样纤维能有效提升蛋白的乳化性能。该结果与 Liu 等[28] 的研究结果一致，低频磁场预处理诱导的豌豆球蛋白（PG）淀粉样纤维同样显著增强了 PG 的乳化性能。

2.10　起泡性和起泡稳定性分析

在成纤过程中，A-PF 和 CP-PF 起泡性变化规律如图 10 所示。结果表明，热处理 540 min，A-PF 和 CP-PF 的 FC 显著增加（P<0.05），表明 PPI 淀粉样纤维状聚集可显著改善其起泡性，这得益于 A-PF 和 CP-PF 加速了空气-水界面的吸附动力学，从而使 PC 增加[38,55]。A-PF 和 CP-PF 的 FS 显著降低（P<0.05），其原因可能是蛋白纤维无法在空气-水界面形成致密层来抵抗聚结和排液[56]。在成纤过程中，CP-PF 的 FC 始终高于 A-PF，表明 CP 诱导形成的 PPI 淀粉样纤维具备更好的起泡性提升效果。Pi 等[57] 的研究也发现，适度的胰蛋白酶修饰有利于卵清蛋白淀粉样纤维的形成，并显著提升卵清蛋白起泡能力和稳定性。

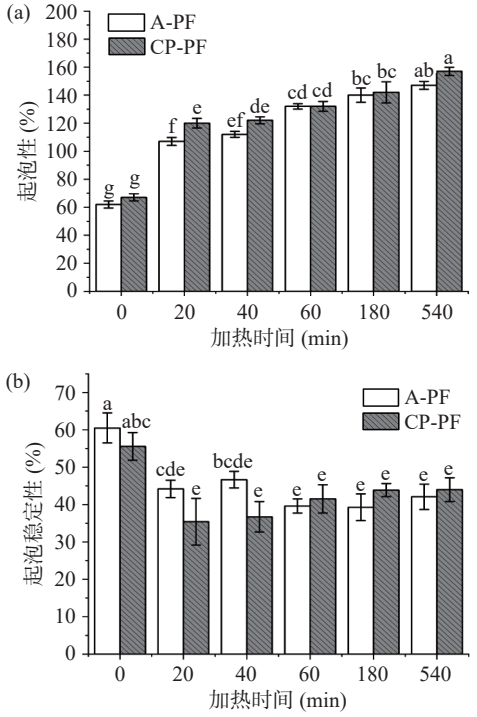


图 10　不同加热时间形成 PPI 淀粉样纤维起泡性

Fig.10　Foaming ability of PPI amyloid fibrils fabricated at different heating times

注：(a)和(b)分别为 FC 和 FS。

3　结论

本研究通过多维度分析技术，评估了 CP 处理相较于传统酸热法促进 PPI 淀粉样纤维形成的潜力及其功能特性演变规律。研究表明，CP 处理可显著促进 PPI 淀粉样纤维的形成。与 A-PF 相比，CP-PF 的 ThT 荧光强度更高，成熟纤维形成时间更短，纤维长度更长。疏水性、游离巯基和二硫键结果表明，疏水相互作用和二硫键是形成 PPI 淀粉样纤维的主要驱动力。另外，与天然 PPI 相比，PPI 淀粉样纤维的 EAI 和 FC 显著提高。而且，与 A-PF 相比，CP-PF 表现出更高的 EAI 和 FC。与传统酸热法相比，CP 介导 PPI 淀粉样纤维状聚集克服了高酸性环境和制备时间长的局限，实现了蛋白淀粉样纤维高效快速的制备。然而，当前国内关于 CP 诱导蛋白成纤方面的系统性研究相对匮乏，仍存在许多有待解决的问题。一方面，CP 处理介导 PPI 构象转变的精准分子机制尚未完全明晰，尤其是高能活性粒子与蛋白关键结构域的作用位点仍需进一步确定；另一方面，蛋白淀粉样纤维在复杂食品体系，如高盐、高糖、不同 pH 环境中的长期稳定性及与其他成分的相互作用规律尚不明确，这限制了其大规模工业化应用。未来研究需进一步结合分子动力学模拟和 AFM，揭示活性粒子与 PPI 分子相互作用的动态过程，明确氧化位点对 β-折叠结构形成的影响机制；同时开展中试规模研究，探索蛋白淀粉样纤维在不同食品体系中的稳定化策略，为 CP 技术在食品生物加工领域的产业化应用奠定更坚实的基础。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] AKHARUME F U, ALUKO R E, ADEDEJI A A. Modification of plant proteins for improved functionality: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(1): 198−224.

[2] BI Shuang, PAN Xin, ZHANG Wentao, et al. Non-covalent interactions of selected flavors with pea protein: Role of molecular structure of flavor compounds[J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133044.

[3] HADIDI M, BOOSTANI S, JAFARI S M. Pea proteins as emerging biopolymers for the emulsification and encapsulation of food bioactives[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107474.

[4] BOUKID F, ROSELL C M, CASTELLARI M. Pea protein ingredients: A mainstream ingredient to (re)formulate innovative foods and beverages[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 729−742.

[5] SHANTHAKUMAR P, KLEPACKA J, BAINS A, et al. The current situation of pea protein and its application in the food industry[J]. Molecules, 2022, 27(16): 5354.

[6] BURGER T G, ZHANG Y. Recent progress in the utilization of pea protein as an emulsifier for food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 25−33.

[7] GE J, SUN C X, CORKE H, et al. The health benefits, functional properties, modifications, and applications of pea (*Pisum sativum* L.) protein: Current status, challenges, and perspectives[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19

(4): 1835−1876.
[8] LU Z X, HE J F, ZHANG Y C, et al. Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(15): 2593−2605.
[9] QU Zihan, CHEN Guiyun, WANG Jiake, et al. Preparation, structure evaluation, and improvement in foaming characteristics of fibrotic pea protein isolate by cold plasma synergistic organic acid treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108057.
[10] XU Yue, MA Chunmin, YANG Yang, et al. Food-derived protein amyloid-like fibrils: Fibrillation mechanism, structure, and recent advances for the stabilization of emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109146.
[11] LAMBRECHT M A, JANSENS K J A, ROMBOUTS I, et al. Conditions governing food protein amyloid fibril formation. part II: Milk and legume proteins[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(4): 1277−1291.
[12] PANG Shuxian, SHAO Ping, SUN Qingjie, et al. Relationship between the emulsifying properties and formation time of rice bran protein fibrils[J]. Lwt, 2020, 122: 108985.
[13] TONG Xiaohong, CAO Jia, TIAN Tian, et al. Changes in structure, rheological property and antioxidant activity of soy protein isolate fibrils by ultrasound pretreatment and EGCG[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107084.
[14] HERNEKE A, LENDEL C, KARKEHABADI S, et al. Protein nanofibrils from fava bean and its major storage proteins: Formation and ability to generate and stabilise foams[J]. Foods, 2023, 12(3): 521.
[15] ZHANG Y R, DEE D R. Morphology, formation kinetics and core composition of pea and soy 7S and 11S globulin amyloid fibrils[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(11): 4755−4765.
[16] LIU Chaoran, WU Di, WANG Pengjie, et al. Study on the formation mechanism of pea protein nanofibrils and the changes of structural properties of fibril under different pH and temperature[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109735.
[17] LI T, ZHOU J T, PEYDAYESH M, et al. Plant protein amyloid fibrils for multifunctional sustainable materials[J]. Advanced Sustainable Systems, 2023, 7(4): 2200414.
[18] DONG Wanyi, ZHANG Xinyue, DING Lixian, et al. Enhancement of emulsification properties by modulation of egg white protein fibril structure with different heating times[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108203.
[19] ZHANG Weiwei, LIU Changqi, ZHAO Jing, et al. Modification of structure and functionalities of *Ginkgo* seed proteins by pH-shifting treatment[J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129862.
[20] MONGE-MORERA M, LAMBRECHT M A, DELEU L J, et al. Heating wheat gluten promotes the formation of amyloid-like fibrils[J]. ACS Omega, 2021, 6(3): 1823−1833.
[21] SO M, KIMURA Y, YAMAGUCHI K, et al. Polyphenol-solubility alters amyloid fibril formation of α-synuclein[J]. Protein Science, 2021, 30(8): 1701−1713.
[22] LIU Qingqing, YANG Qin, WANG Yaru, et al. Formation and structural characteristics of pea globulin amyloid-like fibrils pretreated with low-frequency magnetic field[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109331.
[23] TRIMUKHE A M, PANDIYARAJ K N, PATEKAR M, et al. Perspectives and advances of nonthermal plasma technology in cancers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(8): 2489−2515.
[24] LIU Zhiwei, ZHOU Yingxue, TAN Yicheng, et al. Influence of mild oxidation induced through DBD-plasma treatment on the structure and gelling properties of glycinin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 1454−1463.
[25] TANG Panpan, ZHANG Linlin, XIONG Yuxin, et al. Reduction of antigenicity and emulsibility improvement of ovalbumin by dielectric-barrier discharge plasma treatment induced structure modification[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 92: 103602.
[26] LIU Zhiwei, ZHANG Linlin, ZHOU Yingxue, et al. Characteristics of cold plasma treatment and enzymatic hydrolysis on IgG/IgE-binding ability of β-lactoglobulin[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102161.
[27] LIU Zhiwei, TANG Panpan, ZHANG Yixuan, et al. Preventing thermal aggregation of ovalbumin through dielectric-barrier discharge plasma treatment and enhancing its emulsification properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131578.
[28] LIU Qingqing, YANG Qin, WANG Yaru, et al. Pretreatment with low-frequency magnetic fields can improve the functional properties of pea globulin amyloid-like fibrils[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138135.
[29] LIU Zhiwei, LIU Lianjie, ZHOU Yingxue, et al. Dielectric-barrier discharge (DBD) plasma treatment reduces IgG binding capacity of β-lactoglobulin by inducing structural changes[J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129821.
[30] LIU Zhiwei, TANG Panpan, LIU Chang, et al. Promoting ovalbumin amyloid fibrils formation by cold plasma treatment and improving its emulsifying properties[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110531.
[31] QI Xin, LI Yulin, LI Jinwang, et al. Fibrillation modification to improve the viscosity, emulsifying, and foaming properties of rice protein[J]. Food Research International, 2023, 166: 112609.
[32] MA Baoliang, ZHANG Fan, WANG Xiaofei, et al. Investigating the inhibitory effects of zinc ions on amyloid fibril formation of hen egg-white lysozyme[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 98: 717−722.
[33] 白露, 李志明, 张舒, 等. 绿豆球蛋白淀粉样纤维的形成、结构表征及乳化特性[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 43−51. [BAI L, LI Z M, ZHANG S, et al. Formation, structural characterization, and emulsifying properties of mung bean globulin amyloid fibrils[J]. Food Science, 2024, 45(7): 43−51.]
[34] MUNIALO C D, MARTIN A H, VAN DER LINDEN E, et al. Fibril formation from pea protein and subsequent gel formation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(11): 2418−2427.
[35] XU Jinzhao, TANG Mengqi, WANG Danping, et al. Exploring the self-assembly journey of oat globulin fibrils: From structural evolution to modified functionality[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109587.
[36] MYKOLENKO S, SOON W L, MEZZENGA R. Production and characterization of amaranth amyloid fibrils from food protein waste[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109604.
[37] MOHAMMADIAN M, MADADLOU A. Characterization of fibrillated antioxidant whey protein hydrolysate and comparison with fibrillated protein solution[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 221−230.
[38] LI Ting, WANG Li, GENG Han, et al. Formation, structural

characteristics, foaming and emulsifying properties of rice glutelin fibrils[J]. Food Chemistry, 2021, 354: 129554.
[39] ERICKSON D P, OZTURK O K, SELLING G, et al. Corn zein undergoes conformational changes to higher β-sheet content during its self-assembly in an increasingly hydrophilic solvent[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 232−239.
[40] WANG Yaru, YANG Qin, DU Yanan, et al. Evaluation of the impact of stirring on the formation, structural changes and rheological properties of ovalbumin fibrils[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 128: 107615.
[41] LI Ting, WANG Li, ZHANG Xinxia, et al. Assembly behavior, structural characterization and rheological properties of legume proteins based amyloid fibrils[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106396.
[42] YANG Qin, WANG Yaru, DU Yanan, et al. Comparison of the assembly behavior and structural characteristics of arachin and conarachin amyloid-like fibrils[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 138: 108479.
[43] HU Anna, LI Liang. Effect mechanism of ultrasound pretreatment on fibrillation Kinetics, physicochemical properties and structure characteristics of soy protein isolate nanofibrils[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 78: 105741.
[44] SONG Yujie, LI Ting, ZHANG Xinxia, et al. Investigating the effects of ion strength on amyloid fibril formation of rice proteins[J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102068.
[45] YANG Xiaotong, GUAN Chen, MA Caihong, et al. Nuclei-induced formation of amyloid fibrils in whey protein: Effects of enzyme hydrolysis on the ability of nuclei to induce fibril formation [J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135433.
[46] MITRA A, SARKAR N. The role of intra and inter-molecular disulfide bonds in modulating amyloidogenesis: A review[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2022, 716: 109113.
[47] ALAVI F, EMAM-DJOMEH Z, MOHAMMADIAN M, et al. Physico-chemical and foaming properties of nanofibrillated egg white protein and its functionality in meringue batter[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105554.
[48] OUYANG K, XIE H X, WANG Y F, et al. Whey protein isolate nanofibrils formed with phosphoric acid: Formation, structural characteristics, and emulsion stability[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108170.
[49] JI Hui, DONG Shuang, HAN Fei, et al. Effects of dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma treatment on physicochemical and functional properties of peanut protein[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(2): 344−354.
[50] SINGH H, LI S. Functional properties of caseins and whey proteins[M]. Encyclopedia of Dairy Sciences. Amsterdam: Elsevier, 2022: 579−585.
[51] PENG J F, CALABRESE V, VEEN S J, et al. Rheology and microstructure of dispersions of protein fibrils and cellulose microfibrils[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82: 196−208.
[52] MOHAMMADIAN M, MADADLOU A. Technological functionality and biological properties of food protein nanofibrils formed by heating at acidic condition[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 115−128.
[53] YU Zhichao, LI Ning, LIU Yian, et al. Formation, structure and functional characteristics of amyloid fibrils formed based on soy protein isolates[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127956.
[54] GAO Zhiming, ZHAO Junjun, HUANG Ying, et al. Edible Pickering emulsion stabilized by protein fibrils. Part 1: Effects of pH and fibrils concentration[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 76: 1−8.
[55] YANG Qin, WANG Yaru, LIU Qingqing, et al. Ultrasound-regulated fibrillation of arachin: Structural characteristics, foaming and emulsifying properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109695.
[56] PENG Dengfeng, YANG Jinchu, LI Jing, et al. Foams stabilized by β-lactoglobulin amyloid fibrils: Effect of pH[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(48): 10658−10665.
[57] PI Jingzi, WANG Jia, LÜ Jiran, et al. Modification of ovalbumin by the enzymatic method: Consequences for foaming characteristics of fibrils[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108492.