许博文, 石翀, 周丹丹, 等. 低温等离子体诱导乳清分离蛋白-壳聚糖复合颗粒的结构特性及其花青素负载性能 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 143−152. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040317
XU Bowen, SHI Chong, ZHOU Dandan, et al. Structural Characteristics and Anthocyanin Loading Performance of Whey Protein Isolate-Chitosan Composite Particles Induced by Cold Plasma[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 143−152. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040317

· 研究与探讨 ·

低温等离子体诱导乳清分离蛋白-壳聚糖复合颗粒的结构特性及其花青素负载性能

许博文[1,2], 石　翀[1,2,3], 周丹丹[1,2], 王意程[1,3,4], 李维林[1,3,4], 方东路[1,3,4,*]
（1.南京林业大学, 森林食物资源挖掘与利用全国重点实验室, 江苏南京 210037;
2.南京林业大学轻工与食品学院, 江苏南京 210037;
3.南京林业大学瑞华经济林研究院, 江苏南京 210037;
4.南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037）

摘　要: 为考察介质阻挡放电冷等离子体（Dielectric barrier discharge cold plasma，DBD-CP）技术（处理放电电压：30、90、150 kV；处理时长：30、60、90 s）对乳清分离蛋白（Whey protein isolate，WPI）-壳聚糖（Chitosan，CS）复合颗粒构象变化的诱导作用，及其对花青素（Anthocyanins，ACNs）负载性能的调控作用。该研究采用双因素全因子实验，通过系统评估复合颗粒对 ACNs 的包埋效率（Encapsulation efficiency，EE）、负载量（Loading capacity，LC）、ζ-电位及粒径分布，筛选 DBD-CP 最佳处理参数。利用傅里叶变换红外光谱（Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR）、X 射线衍射（X-ray diffraction，XRD）、扫描电镜（Scanning electron microscope，SEM）、荧光光谱（Fluorescence spectroscopy，FS）和圆二色谱（Circular dichroism，CD）等多尺度表征技术，深入解析 DBD-CP 诱导的 WPI-CS 分子构象变化规律。基于上述系统评估结果，筛选获得 DBD-CP 最佳处理参数为放电电压 90 kV，处理时长 60 s。基于此最优参数，ACNs 的 EE 和 LC 分别提升至 91.93% 和 4.59%，较未处理组显著提高（$P<0.05$）；ζ-电位增加，颗粒间静电排斥增强，体系稳定性显著改善；粒径分析显示分布均一性，颗粒分散性改善。结构表征揭示：DBD-CP 的活性粒子（如电子、离子）通过氧化修饰促使 WPI 疏水基团暴露并降低 CS 脱乙酰化程度，增强氢键与静电交联网络形成；同时，等离子体刻蚀作用优化了复合物孔隙均一性，形成致密包埋结构。DBD-CP 处理通过协同作用（活性粒子诱导的氧化修饰与刻蚀作用）有效调控了 WPI-CS 复合颗粒的结构，显著提高了其对 ACNs 的负载性能及体系稳定性，为低温等离子体技术在生物活性成分稳态化递送体系中的应用提供了理论依据。

关键词: 低温等离子体, 乳清分离蛋白, 壳聚糖, 花青素, 负载性能
中图分类号: TS201.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0143−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040317
本文网刊:

Structural Characteristics and Anthocyanin Loading Performance of Whey Protein Isolate-Chitosan Composite Particles Induced by Cold Plasma

XU Bowen[1,2], SHI Chong[1,2,3], ZHOU Dandan[1,2], WANG Yicheng[1,3,4], LI Weilin[1,3,4], FANG Donglu[1,3,4,*]
（1.National Key Laboratory for the Development and Utilization of Forest Food Resources, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2.College of Light Industry and Food Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

收稿日期: 2025−04−25
基金项目: 国家重点研发计划项目（2024YFD2101003）; 江苏省优秀青年基金项目（BK20240140）; 南京林业大学瑞华经济林研究院经济林创新研究项目（510010003）。
作者简介: 许博文（2003−）, 男, 本科, 研究方向: 生物活性递送系统设计, E-mail: xubowen@njfu.edu.cn。
*** 通信作者:** 方东路（1989-）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 林产品保鲜与加工, E-mail: fangdonglu@njfu.edu.cn。

3.Ruihua Economic Forest Institute of Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
4.Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To investigate the inducing effect of dielectric barrier discharge cold plasma (DBD-CP) technology (treatment voltages: 30, 90, 150 kV, treatment times: 30, 60, 90 s) on the conformational changes of whey protein isolate (WPI)-chitosan (CS) composite particles and its regulatory effect on the loading performance of anthocyanins (ACNs), this study employed a two-factor full factorial experimental design. By systematically evaluating the encapsulation efficiency (EE), loading capacity (LC), ζ-potential, and particle size distribution of the composite particles for ACNs, the optimal DBD-CP treatment parameters were screened. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), fluorescence spectroscopy (FS), and circular dichroism (CD) were utilized as multi-scale characterization techniques to deeply analyze the DBD-CP-induced molecular conformational changes in WPI-CS. Based on the results of the above systematic evaluation, the optimal DBD-CP treatment parameters were screened and determined as voltage 90 kV and time 60 s. Under this optimal parameter set, the EE and LC of ACNs increased to 91.93% and 4.59%, respectively, significantly higher than those of the untreated group (P<0.05). The ζ-potential increased, enhancing electrostatic repulsion between particles and significantly improving system stability. Particle size analysis showed that distribution uniformity and particle dispersibility were improved. Structural characterization revealed that: Reactive species (e.g., electrons, ions) in DBD-CP promoted the exposure of hydrophobic groups in WPI and decreased the deacetylation degree of CS through oxidative modification, thereby enhancing the formation of hydrogen bonding and electrostatic cross-linking networks, simultaneously, the plasma etching effect optimized the pore uniformity of the complex, forming a dense encapsulation structure. DBD-CP treatment effectively modulated the structure of WPI-CS composite particles through synergistic effects (oxidative modification induced by reactive species and the etching effect), significantly improving their loading performance for ACNs and the system stability. This provides a theoretical basis for the application of cold plasma technology in stabilized delivery systems for bioactive components.

Key words: cold plasma; whey protein isolate; chitosan; anthocyanin; loading performance

近年来,基于天然高分子的蛋白-多糖复合物因其优异的生物相容性与可定制化结构特性,逐渐成为功能因子递送领域的研究热点[1]。这类载体不仅能通过分子间作用力精确调控活性成分释放位点,其可食用特性更避免了合成材料的代谢风险[2]。当前递送体系构建主要依赖脂质体、微胶囊及纳米复合物等技术,但普遍存在载药效率低、缓释靶向性差及化学交联剂残留等共性缺陷[3−4]。在纳米复合物递送体系中,乳清分离蛋白(Whey protein isolate, WPI)凭借两亲性结构可有效包封疏水活性成分,而壳聚糖(Chitosan, CS)的阳离子特性则赋予其良好的蛋白质结合能力[5]。通过静电复合、共价偶联等分子组装策略构建的 WPI-CS 复合物递送载体虽能实现对活性成分的高效包封与可控释放[6],但传统制备工艺仍面临双重挑战:其一,热诱导法可能导致蛋白质变性失活;其二,化学交联法易引入残留毒性物质,同时颗粒粒径均一性难以精准控制。因此,如何实现 WPI-CS 载体结构的精准调控,已成为提升其递送效率的关键问题。

针对传统技术缺陷,低温等离子体(Cold plasma, CP)作为一种用于食品成分功能修饰的非热加工技术,凭借其环保、无化学添加和可持续的特性,为 WPI-CS 递送载体结构调控提供了新思路[6]。作为 CP 技术的一种重要形式,介质阻挡放电冷等离子体(Dielectric barrier discharge cold plasma, DBD-CP)技术利用介质阻挡层促进在大气压下的放电,显著提高了经济效率和实用性[7]。此外,DBD-CP 处理过程通常快速高效,且能在接近室温的温和条件下进行,有效避免了生物活性物质的热变性风险。其产生的活性粒子具有良好的穿透性,能够深入材料内部实现均匀改性,为蛋白-多糖复合物的功能化改性提供了新的可能[8]。研究表明,DBD-CP 处理可显著改变蛋白质二级结构,增强多糖链的交联密度,从而改善复合物的包埋性能[9]。然而,DBD-CP 作用参数(放电电压、处理时长)对提升蛋白质-多糖复合物的包埋性能、负载量的机制尚未明晰,亟需系统性研究。

聚焦递送对象需求,花青素(Anthocyanins, ACNs)作为天然植物源性色素,在抗氧化、抗炎及心血管保护等领域展现出重要生物活性[10]。然而,其实际应用面临双重挑战:其一,该类成分对环境条件高度敏感,易受温度波动、光照及 pH 变化引发显著降解;其二,口服递送过程中存在生物利用度严重不足的固有缺陷[11]。尽管现有的递送系统,如脂质体/微囊,在一定程度上提升了其稳定性,但其对 ACNs 的包埋效率(Encapsulation efficiency, EE)和负载量(Loading capacity, LC)普遍偏低,限制了递送体系的实用性与经济性[12]。

基于此,本研究创新性地采用 DBD-CP 技术对 WPI-CS 复合颗粒进行改性处理,系统调控放电参数(放电电压:30、90、150 kV;处理时长:30、60、90 s),构建 ACNs 高效负载体系。通过系统评估复合颗粒对 ACNs 的包埋效率、负载量、ζ-电位及粒径分布,筛选 DBD-CP 最佳作用参数。进一步结合傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy,

FTIR）、X 射线衍射（X-ray diffraction, XRD）、荧光光谱（Fluorescence spectroscopy, FS）、圆二色谱（Circular dichroism, CD）及扫描电镜（Scanning electron microscope, SEM）等多尺度结构表征技术，深入解析 DBD-CP 诱导的 WPI-CS 分子构象变化规律及其与 ACNs 的相互作用机制，为阐明低温等离子体技术在生物活性物质稳态化递送中的作用原理提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

WPI（食品级样品装）　河南中辰生物科技有限公司；CS（脱乙酰度 90%）、ACNs（来源蓝莓 ACNs）　上海麦克林生化科技股份有限公司；无水乙醇、盐酸、氢氧化钠、磷酸、醋酸　分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

CPCS-I 高压低温等离子体表面处理机　南京苏曼等离子科技有限公司；Mastersizer 3000 马尔文激光粒度仪　英国马尔文仪器有限公司；Lambda 950 紫外分光光度计　美国 PerkinElmer 公司；Ultima IV 组合式多功能 X 射线衍射仪　日本理学株式会社；Quanta 200 环境扫描电子显微镜　美国赛默飞世尔科技公司；VERTEX 80 V 红外光谱仪　德国布鲁克公司；FluoroMax-4 瞬态稳态荧光光谱仪、FluoroMax-4 荧光分光光度计　法国 HORIBA 公司；MOS-500 多功能圆二色谱仪　法国 Bio-Logic 公司；IKA Topolino 磁力搅拌器　艾卡（德国）仪器设备有限公司；ZF-800DE 超声波清洗机　上海喆孚实业有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　实验设计流程　该研究的实验流程图及方法如图 1 所示。

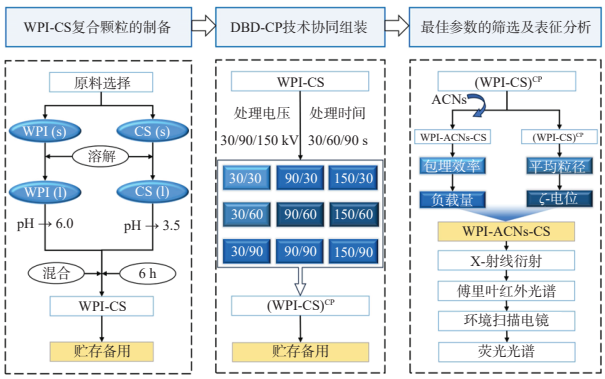


图 1　实验流程图

Fig.1　Experimental layout

1.2.2　WPI-CS 复合颗粒制备工艺　参考李双健等[13]的方法并稍作修改。称取一定量的 CS，用 1%（w/v）的醋酸溶解，磁力搅拌器连续搅拌过夜，直至液体变得澄清透明，制成 5 mg/mL 的壳聚糖溶液。称取一定量的 WPI，用去离子水溶解并充分搅拌，配制成相同质量分数的乳清分离蛋白溶液。用 1 mol/L 的盐酸溶液分别将 CS 和 WPI 溶液的 pH 调至 3.5 和 6.0 后，将制备好的 CS 溶液缓慢滴加至 WPI 溶液中，室温搅拌 6 h，使带正电的 CS 溶液和带负电的 WPI 溶液充分混合制备 WPI-CS 复合物。将制得的复合物置于 4 ℃ 的冰箱中储存以供后续使用。

1.2.3　DBD-CP 技术协同组装　对 WPI-CS 复合物进行 DBD-CP 处理。具体操作流程如下：将 WPI-CS 复合颗粒溶液均匀倒入玻璃基板后，转移至 DBD-CP 反应腔中，设定电极间距为 30 mm、放电频率 145 Hz、基板移动速度 20 mm/s，通入空气作为工作气体。通过双因素全因子试验设计，以放电电压（30、90、150 kV）与处理时长（30、60、90 s）为自变量，共形成 9 组处理条件，同时设置未处理 WPI-CS 复合颗粒作为空白对照（CK），具体分组见表 1。

表 1　放电电压与处理时长试验分组

Table 1　Experimental grouping of discharge voltage and treatment time

组别	因素	
	放电电压（kV）	处理时长（s）
0	–	–
1	30	30
2	30	60
3	30	90
4	90	30
5	90	60
6	90	90
7	150	30
8	150	60
9	150	90

注：–表示无处理。

1.2.4　最佳 DBD-CP 处理参数的筛选　基于 WPI-CS 复合颗粒自身特性及其对 ACNs 的递送效能，选取四项评估指标筛选最佳 DBD-CP 处理参数：ACNs 包埋效率、ACNs 负载量、WPI-CS 的 ζ-电位以及 WPI-CS 的粒径分布。通过测定上述指标数据，结合直观分析与方差分析，综合评估不同 DBD-CP 处理参数的效能差异，最终确定最优参数组合。

1.2.4.1　ACNs 标准曲线的绘制　准确称量 ACNs 标准样品，用去离子水溶解并定容，配制成浓度为 1 mg/mL 的 ACNs 标准储备液。随后，将此储备液进行系列稀释，获得浓度梯度为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mg/mL 的标准溶液。在 520 nm 波长下，使用紫外分光光度计测定各浓度标准溶液的吸光度值。以 ACNs 标准溶液浓度（X，mg/mL）为横坐标，吸光度值（Y）为纵坐标，绘制标准曲线。经线性回归分析，得到标准曲线方程 Y=0.8393X+0.0102，决定系数 R^2=0.99。

1.2.4.2　WPI-ACNs-CS 复合物的制备　参考 Li 等[14]的方法并稍作调整。将 5 mg ACNs 溶解于 5 mL pH 为 3.0 的去离子水中，置于超声波清洗机中，超声功率设定为 800 W，超声处理 30 min，直至完全溶

解，制得 ACNs 溶液。随后，将 ACNs 溶液与制备完成的 WPI-CS 复合溶液混合，以 600 r/min 的转速搅拌 6 h，获得 WPI-CS 与 ACNs 的质量比为 4∶1 的复合颗粒溶液。将部分溶液置于 4 ℃ 冰箱中储存备用，剩余溶液进行真空冷冻干燥处理后，置于干燥器中备用，以进行后续的结构特征分析。

1.2.4.3 包埋效率及负载量的测定 参考 Wang 等[15]的方法并稍作修改，将新制备的复合物分散液于低温离心机（4 ℃）中以 8000 r/min 转速离心 3 min，离心结束后迅速取上清液，用去离子水稀释 50 倍，在室温下用紫外分光光度计在 520 nm 处测定游离 ACNs 的吸光度，同时结合绘制的 ACNs 的标准曲线图进行分析。最后根据式（1）和式（2）计算包埋效率及负载量。

$$包埋效率(\%)=\frac{m_0-m_1}{m_0}\times 100 \quad 式（1）$$

$$负载量(\%)=\frac{m_0-m_1}{m_2}\times 100 \quad 式（2）$$

式中：m_0 为总 ACNs 添加量（g）；m_1 为游离 ACNs 添加量（g）；m_2 为蛋白质和多糖添加量。

1.2.4.4 粒径和 ζ-电位的测定 颗粒大小和 ζ-电位均使用马尔文激光粒度仪在 25 ℃ 的环境下测量，所有测量都基于至少三个新制备的样品进行。

1.2.5 WPI-ACNs-CS 多尺度表征分析 基于多指标优化筛选结果（1.2.4 节），确定最佳 DBD-CP 处理参数后，采用该最佳参数对 WPI-CS 复合颗粒进行 DBD-CP 改性，并依据 1.2.4.2 所述方法包埋 ACNs，制备得到 WPI-ACNs-CS 复合体系。通过傅里叶变换红外光谱、X 射线衍射、荧光光谱、圆二色谱及扫描电镜多尺度结构表征，研究 WPI、ACNs、CS、WPI-CS 以及最佳参数下制备的 WPI-ACNs-CS 复合体系，以探究递送性能强化机制。

1.2.5.1 XRD 晶体结构分析 样品的晶体结构通过组合型多功能水平 X-射线衍射仪以 5°/min 的扫描速率，记录 5°~90°扫描范围的 XRD 图谱。

1.2.5.2 FT-IR 光谱解析 将真空冷冻干燥后的样品与溴化钾以 1∶11 比例进行混合，然后用研钵研磨成细小均匀的粉末。使用红外光谱仪在 4000~400 cm^{-1} 的光谱范围内对样品扫描 32 次，以溴化钾压片作为空白对照。

1.2.5.3 SEM 形貌观察 将固体样品置于 5 mm×5 mm 抛光硅片上，固定于样品台后，用扫描电子显微镜在 10.0 kV 的加速电压下进行观察。

1.2.5.4 FS 测定 将待测样品与去离子水按比例混合配制适量浓度的悬浊液，经充分振荡混匀后，采用荧光分光光度计进行检测分析。仪器参数设定如下：发射波长扫描范围设定为 560~580 nm 区间，激发波长固定为 520 nm，光谱通带宽度设置为 5 nm。

1.2.5.5 CD 测定 在室温条件下，将样品用磷酸盐缓冲液稀释至 0.1 mg/mL 后，采用 1 mm 石英比色皿进行测定。圆二色谱仪的波长扫描范围设定为 190~270 nm，扫描速率为 50 nm/min，扫描步长为 1 nm。

1.3 数据处理

所有测量至少进行三次重复，结果以平均值±标准差的形式呈现。绘图采用标准绘图软件 Origin 2025 进行。统计分析采用数据分析软件 IBM SPSS 27.0 进行，包括单因素方差分析，随后进行邓肯氏多重比较检验，$P<0.05$ 表明差异显著。

2 结果与分析

2.1 最佳 DBD-CP 处理参数的筛选结果

2.1.1 DBD-CP 处理对复合颗粒包埋效率及负载量的影响 结合绘制的 ACNs 标准曲线对包埋效率及负载量进行测定。图 2 比较了不同放电电压（30、90、150 kV）及处理时长（30、60、90 s）下 WPI-CS 复合颗粒中 ACNs 的包埋效率和负载量。实验表明，在 90 kV，60 s 条件下，ACNs 的包埋效率和负载量分别达到峰值 91.93% 和 4.59%，较对照组（72.17% 和 3.61%）显著提升（$P<0.05$）。这一现象可归因于 DBD-CP 处理诱导的分子构象动态调控：一方面，等离子体产生的活性氧和活性氮促使 WPI 二级结构展开，暴露内部疏水基团，增强与 ACNs 的疏水结合；另一方面，CS 的乙酰化程度在适度等离子体处理下降低，表面阳离子电荷密度增加，通过静电作用与带负电的 ACNs 形成稳定复合物[16]。此条件下，DBD-CP 处理的能量密度恰处于 WPI-CS 复合颗粒的结构优化区间，既能打破蛋白质内部氢键促进疏水区域暴露，又避免过度交联导致的结合位点掩埋。Zhou 等[9]的研究也证实了等离子体处理的优化效应，他们发现低温等离子体可以将玉米醇溶蛋白对姜黄素的包封效率从 52.83% 提高到 76.31%，并表明等离子体可以增强分子间相互作用（如疏水作用、静电吸

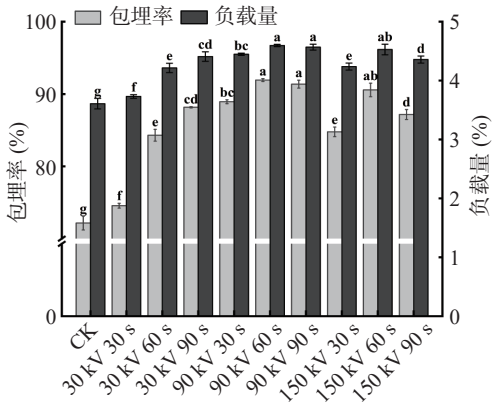


图 2 不同 DBD-CP 处理参数下复合颗粒对 ACNs 的包埋效率和负载量

Fig.2 Encapsulation efficiency and loading capacity of composite nanoparticles for anthocyanin under different DBD-CP processing parameters

注：不同小写字母代表各组间差异显著（$P<0.05$），图 3 同。

引），促进更强的自组装动力学和更多的结合位点来捕获姜黄素。然而，等离子体处理的效果高度依赖于能量输入强度，存在显著的阈值效应：当处理强度较弱时，能量不足以完全打破蛋白质内部氢键，疏水基团暴露有限，包埋效率和负载量提升幅度较小；而强度过高则会导致 WPI 发生不可逆聚集，形成致密结构，掩盖疏水区域并减少有效结合位点，包埋效率和负载量则有所下降[17−18]。

2.1.2　DBD-CP 处理对复合颗粒 ζ-电位及粒径的影响

2.1.2.1　ζ-电位　ζ-电位作为胶体体系稳定性的核心指标，其绝对值直接反映颗粒间静电排斥力的强弱。电位绝对值越大，表示颗粒之间的排斥力越大，意味着聚集的颗粒越少，溶液越稳定[19]。如图 3 所示，经 DBD-CP 处理的 WPI-CS 复合颗粒 ζ-电位呈现先增后降的非单调变化趋势。除 30 kV, 30 s 和 30 kV, 60 s 两组低强度处理外，其余各处理组的 ζ-电位较未处理对照组均显著提高，表明在一定强度的 DBD-CP 处理条件下，能够有效增强纳米颗粒间的静电排斥作用，从而改善体系稳定性。具体而言，随着放电电压与处理时长的增加，复合颗粒 ζ-电位在 150 kV, 30 s时达到峰值（45.7±0.66 mV），随后在更高能量输入（150 kV, 60 s、150 kV, 90 s）时出现下降。这与高宝宇等[20] 的研究一致，他们发现随着低温等离子体放电电压的增加，海藻酸钠-核桃分离蛋白的 ζ-电位绝对值显示出先增后降的趋势。本研究中，该现象的产生机制可从以下三个层面进行解析：首先，DBD-CP 特有的高能放电过程诱导产生大量活性带电物种（包括电子、离子、自由基及激发态分子）[21−22]，这些物质通过物理吸附与化学修饰作用富集于颗粒表面，显著提高了表面电荷密度。其次，等离子体处理引发的能量沉积导致 WPI 与 CS 分子构象改变，使得原本被包埋的带电官能团（如氨基、羧基）暴露[23]，同时增强的蛋白质链柔性促进了分子间相互作用的重排，从而优化表面电荷分布[24]。上述带电物种迁移、粒子结构重组与官能团暴露的协同效应，共同解释了处理初期 ζ-电位的显著提升。值得注意的是，当过处理（≥150 kV, 60 s）时，ζ-电位的下降提示存在临界能量阈值效应。此时，等离子体引发的高密度能量输入既可能导致过量带电物种引发电荷屏蔽效应，还可能促使蛋白质-多糖复合物发生不可逆聚集，形成可溶性聚集体[25]。这为处理参数过度时 ζ-电位的衰减现象提供了合理解释。

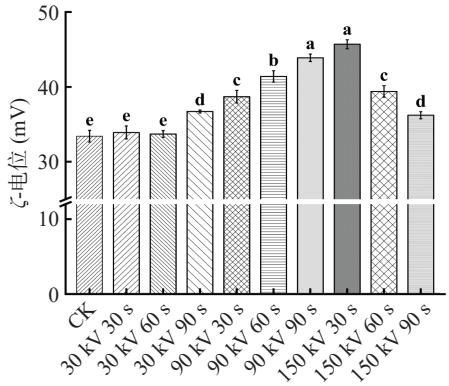


图 3　不同 DBD-CP 处理参数下 WPI-CS 的电位变化

Fig.3　ζ-Potential changes of WPI-CS under different DBD-CP processing parameters

2.1.2.2　粒径　不同 DBD-CP 处理手段对复合颗粒粒径的影响如图 4 所示。随着放电电压及处理时长的增大，WPI-CS 的粒径呈现出先减小后增大的趋势。这与 Chen 等[21] 的研究一致，他们发现随着低温等离子体放电电压的增强，玉米醇溶蛋白-壳聚糖复合物的粒径先减小后增大，并将该现象归因于不同电压处理下蛋白质的结构和比表面积的差异以及化学键的形成等作用。本研究中，在较低放电电压和处理时长下复合颗粒粒径的减小可归因于 DBD-CP 处理过程中产生的高能物质与复合物的物理碰撞，该碰撞导致颗粒的分散和重排，从而实现更小颗粒尺寸[26]。此外，高电压条件下增强的蚀刻能量与高密度氧化性化合物可破坏 WPI 或 CS 亚基内的共价键与非共价键[27]，最终导致颗粒粒径减小。较小的颗粒尺寸通常意味着更大的比表面积，这为疏水性生物活性成分提供了更多的潜在结合位点，因此有望提高其包埋效率，并可能提升颗粒的溶解度[21]。然而，随着处理参数的进一步增大，当样品过度暴露于 DBD-CP 后，DBD-CP 产生的高密度活性物质很可能通过游离巯基的氧化形成二硫键，在复合物内产生交联，从而导致颗粒尺寸呈逆向增加。Gupta 等[28] 和 Ekezie 等[29] 也描述了蛋白质中类似的交联现象。

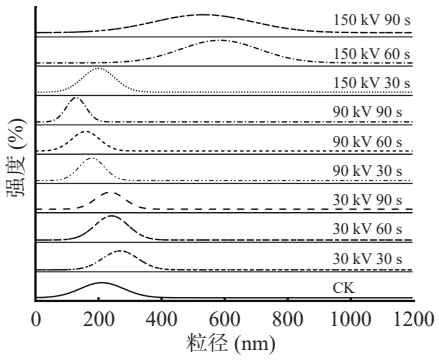


图 4　不同 DBD-CP 处理参数下 WPI-CS 的粒径变化

Fig.4　Particle size changes of WPI-CS under different DBD-CP processing parameters

2.1.3　参数优选结果分析　上述四个指标的分析试验结果如表 2 所示，通过综合分析筛选最佳组合，确定 DBD-CP 的最佳处理参数。

基于表 2 数据的综合分析，发现在放电电压为 90 kV，处理时长为 60 s（组 5）的改性参数下制得的复合颗粒性能优势显著：包埋效率和负载量作为核心指标，在组 5（90 kV, 60 s）达到实验最高值（包埋效率：91.93%±0.20%；负载量：4.59%±0.02%），仅与组

表 2 双因素全因子试验设计及结果分析

Table 2 Two-factor full factorial experimental design and result analysis

组别	放电电压（kV）	处理时长（s）	包埋效率（%）	负载量（%）	ζ-电位（mV）	粒径（nm）
0	–	–	72.17±0.95^{g}	3.61±0.23^{g}	33.4±0.78^{e}	208.94±2.11^{e}
1	30	30	74.56±0.33^{f}	3.73±0.03^{f}	33.9±0.87^{e}	267.02±3.23^{c}
2	30	60	84.30±0.81^{e}	4.21±0.08^{e}	33.7±0.45^{e}	243.82±1.09^{d}
3	30	90	88.17±0.08^{cd}	4.41±0.08^{cd}	36.7±0.19^{d}	241.28±3.32^{d}
4	90	30	88.93±0.27^{bc}	4.45±0.02^{bc}	38.7±0.85^{c}	177.95±2.01^{f}
5	90	60	91.93±0.20^{a}	4.59±0.02^{a}	41.4±0.76^{b}	158.65±2.99^{g}
6	90	90	91.36±0.54^{a}	4.57±0.05^{a}	43.9±0.50^{a}	128.85±1.03^{h}
7	150	30	84.76±0.66^{e}	4.24±0.06^{e}	45.7±0.60^{a}	197.26±0.99^{e}
8	150	60	90.56±0.93^{ab}	4.53±0.09^{ab}	39.4±0.78^{c}	587.38±5.62^{a}
9	150	90	87.16±0.68^{d}	4.36±0.06^{d}	36.2±0.47^{d}	563.92±4.93^{b}

注：同一列中不同字母表示不同数据之间存在统计学上的显著差异（P<0.05）；–表示无处理。

6（90 kV, 90 s）无显著差异。在包埋效率和负载量相近的高水平组中，组 5 展现出更均衡的综合性能：其粒径（158.65±2.99 nm）显著低于除组 6 外的所有处理组（P<0.05）；同时维持理想纳米尺度（<200 nm）；ζ-电位绝对值（41.4±0.76 mV）保持较高水平，虽略低于组 6（43.9±0.50 mV）和组 7（45.7±0.60 mV），但优于绝大多数实验组。因此，在首要保证包埋效率和负载量最大化的前提下，组 5（90 kV, 60 s）因其优异的粒径分布与足够高的稳定性被确定为最佳条件。此参数下制得的 WPI-CS 复合颗粒性能表现为：包埋效率 91.93%±0.20%，负载量 4.59%±0.02%，ζ-电位绝对值 41.4±0.76 mV，粒径 158.65±2.99 nm。因此确定 90 kV, 60 s 为 DBD-CP 最佳改性参数。

为验证实验结果的可靠性，采用 SPSS 27.0 对数据进行双因素全因子方差分析（表 3）。结果表明：放电电压对包埋效率、负载量、ζ-电位及粒径的影响均达极显著水平（P<0.001），处理时长对包埋效率和负载量的影响极显著（P<0.001），对粒径影响高度显著（P<0.01），对 ζ-电位的影响显著（P<0.05）；电压与处理时长的交互作用对包埋效率（P<0.01）的影响高度显著。基于上述统计结果并综合表 2 实验数据，选定 90 kV, 60 s 作为优化参数组：90 kV 电压对所有指标均表现极显著主效应优化（P<0.001），60 s 处理时长对关键指标（包埋效率，负载量，粒径）呈现强主效应（P<0.001）。后续研究将针对此参数组制备的 WPI-ACNs-CS 复合体系开展多尺度结构表征与负载机制解析。

表 3 双因素全因子试验方差分析结果

Table 3 Results of two-factor full factorial ANOVA

指标	方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F值	显著性
包埋效率	放电电压	1204.56	2	602.28	48.11	***
	处理时长	456.32	2	228.16	18.23	***
	放电电压×处理时长	320.15	4	80.04	6.40	**
	误差	225.29	18	12.52		
负载量	放电电压	3.21	2	1.605	29.72	***
	处理时长	1.87	2	0.935	17.31	***
	放电电压×处理时长	0.52	4	0.13	2.41	ns
	误差	0.97	18	0.054		
ζ-电位	放电电压	256.78	2	128.39	19.80	***
	处理时长	62.45	2	31.23	4.82	*
	放电电压×处理时长	45.80	4	11.45	1.77	ns
	误差	116.66	18	6.48		
粒径	放电电压	432109.40	2	216054.70	50.25	***
	处理时长	78456.80	2	39228.40	9.12	**
	放电电压×处理时长	15320.50	4	3830.13	0.89	ns
	误差	77345.1	18	4296.95		

注：***差异极显著（P<0.001）；**差异高度显著（P<0.01）；*差异显著（P<0.05）；ns不显著。

2.2 WPI-ACNs-CS 多尺度表征分析

2.2.1 XRD 图谱分析 XRD 是通过晶体结构与入射 X 射线的相互作用来解析材料结晶特性的表征技术。当体系中不同组分仅存在微弱相互作用或无明显化学键合时，各组分将保持独立的结晶区域，此时 XRD 图谱会显现各组分对应的特征峰。若组分间形成强相互作用，则会导致部分聚合物组分的特征衍射峰强度显著减弱甚至消失[30]。如图 5 所示。纯 ACNs、CS 和 WPI 的 XRD 图谱均呈现独立半结晶特征，其特征峰分别位于 19.59°（ACNs）、10.92°/20.12°（CS）和 8.89°/19.45°（WPI）。值得注意的是，当构建 WPI-CS 及 WPI-ACNs-CS 复合体系时，体系结晶度显著降低，特别是经 DBD-CP 处理后制备的 WPI-ACNs-CS 样品中特征峰接近消失。这一现象可从分子相互作用与结构调控机制深入解析。首先，WPI 与 CS 的强分子相互作用（如静电吸引与疏水作用）破坏了二者原有的有序结构：WPI 的 β-折叠构象与 CS 分子链的规则排列因复合物形成而解离，导致其独立结晶特征峰减弱[31]。进一步地，DBD-CP 处理通过氧化修饰与活性粒子（如自由基）作用，暴露 WPI 疏水基团并诱导 CS 分子链断键重组，从而增强 WPI-CS 间的氢键及静电交联网络[23,27]。该现象证实：WPI 与 CS 通过强分子相互作用形成复合结构；复合物对 ACNs 的包埋作用诱导其从半结晶态向无定形态转变；DBD-CP 处理可有效增强 WPI-CS 复合颗粒对 ACNs 的包埋能力与负载能力，同时

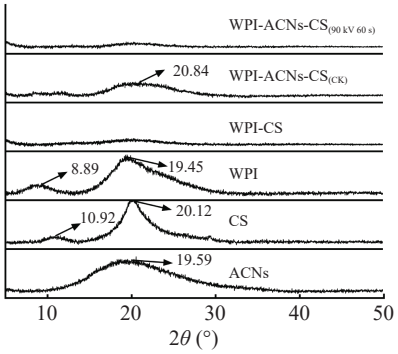


图 5 不同样品的 XRD 图谱分析图

Fig.5 XRD pattern analysis of different samples

显著增强颗粒间相互作用。值得注意的是，这些结论与粒径分布及 ζ-电位分析结果相吻合，共同阐明了 WPI-CS 复合颗粒的相互作用机制，并进一步凸显 DBD-CP 处理在调控 WPI-CS 结构重排及分子间作用力方面的独特优势与潜在应用价值。

2.2.2　FTIR 分析　采用傅里叶变换红外光谱对 WPI-ACNs-CS 复合体系中的 ACNs 与 WPI-CS 的相互作用进行分析，官能团的位置变化能有效反映出 WPI-CS 对 ACNs 的包埋效果[32]。如图 6 所示，单组分特征峰归属显示：ACNs 的 1278.26 cm^{-1}（C-O-C 振动）和 1016.34 cm^{-1}（C-O 振动）表明其表面亲水/疏水基团共存。CS 的 3348.34 cm^{-1}（O-H/N-H 伸缩振动）和 1025.13 cm^{-1}（C-O-C 糖苷键振动）反映其多糖骨架及氢键网络，而 WPI 的 1630.94 cm^{-1}（酰胺 I 带）与 1529.85 cm^{-1}（酰胺 II 带）则对应蛋白质二级结构特征；复合物中，未处理的 WPI-ACNs-CS 在 3279.14 cm^{-1} 处出现 O-H/N-H 峰红移（相较于 WPI 移动了 9 cm^{-1}），表明 ACNs 通过氢键作用嵌入 WPI-CS 网络[2]。经 DBD-CP 处理后，WPI-ACNs-CS 的 C-O-C 振动峰左移至 1067.26 cm^{-1}，证实等离子体刻蚀作用暴露更多活性基团（-NH_2、-OH），促进多糖-蛋白交联网络致密化[33]；同时，酰胺 II 带（1538.86 cm^{-1}）和 C-H 振动峰（1405.31 cm^{-1}）的峰位保持相对稳定。酰胺 II 带（1538.86 cm^{-1}）主要归属于蛋白质的 N-H 弯曲和 C-N 伸缩振动，其稳定性通常与蛋白质 β-折叠结构的维持相关[2,33]。C-H 振动峰（1405.31 cm^{-1}）的稳定性则反映了疏水微环境的相对恒定[34]。上述结果共同表明，低温等离子体处理显著调控了 WPI-CS 复合物的微观结构，进而优化其对 ACNs 的包埋效果，有效增强 WPI-CS 对 ACNs 的封装稳定性。Xu 等[34] 也描述了低温等离子体处理在提高蛋白质载体对活性成分包埋的潜力与类似机制。

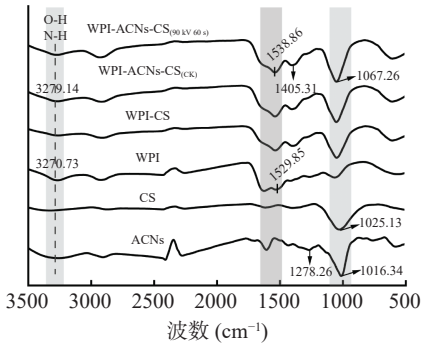


图 6　不同样品的红外光谱图

Fig.6　Infrared spectroscopy graphs of different samples

2.2.3　SEM 图像分析　如图 7 所示，单一组分的形貌特征呈现显著差异。WPI 单体呈近球形形貌（部分为椭圆形），粒径分布较宽且表面存在明显凹凸纹理（图 7A）；CS 单体表现为褶皱状不规则线性结构（图 7B）；ACNs 单体则兼具近球形与块状形貌，表面伴有褶皱特征（图 7C）。值得注意的是，WPI-CS 复合颗粒呈现出高度有序的多孔网络结构—CS 分子链作为三维骨架支撑，WPI 颗粒则作为交联节点锚定于 CS 网络节点处，形成稳定的空间拓扑构型（图 7D）。与之相比，未经处理的 WPI-CS 复合颗粒包埋 ACNs 制得的复合物呈现无序多孔结构（图 7E），与 WPI-CS 复合颗粒形貌特征较为类似。该现象与 Chen 等[35] 的研究结果类似，他们发现槲皮万寿菊素的引入并未引起玉米醇溶蛋白基纳米复合体系整体微观结构的显著改变。然而，经 DBD-CP 处理的 WPI-CS 复合物在引入 ACNs 后的复合物则表现出显著优化的微观形貌：孔隙尺寸均一化且分布有序，形成致密包埋网络，实现对 ACNs 的高效负载（图 7F）。上述现象与 DBD-CP 处理诱导的 ζ-电位提升具有内在关联性。等离子体产生的活性带电物种（如电子、离子）通过吸附与化学修饰增加颗粒表面电荷密度[22-23]，增强的静电排斥力不仅抑制颗粒聚集，还促进 WPI-CS 骨架的均匀扩展，形成规则孔隙网络。同时，与 FTIR 光谱分析结果一致，DBD-CP 处理引发的分子间作用力强化进一步佐证了 SEM 观察到的 CS 骨架致密化现象。

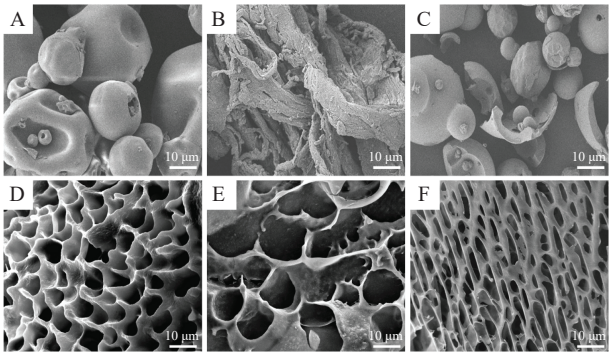


图 7　不同样品的环境扫描电镜图像

Fig.7　SEM images of different samples

注：A：WPI；B：CS；C：ACNs；D：WPI-CS；E：WPI-ACNs-CS（CK）；F：WPI-ACNs-CS（90 kV，60 s）。

2.2.4　FS 分析　通过荧光光谱技术系统评估了 DBD-CP 处理对 WPI-ACNs-CS 复合体系包埋性能的调控机制。如图 8 所示，在 ACNs 特征激发波长 520 nm 条件下，经 DBD-CP 处理的实验组荧光强度显著优于其他样品组。这一现象源于等离子体处理诱导的多尺度结构优化：DBD-CP 改性后的 WPI-CS 通过增强的分子间交联作用形成致密疏水网络，并从两方面提升 ACNs 的功能特性。首先，包埋微环境极性降低与三维空间限域效应共同抑制了 ACNs 分子的自聚集及溶剂猝灭[36]；其次，改性 WPI 中暴露的活性氨基酸残基与 ACNs 形成定向分子相互作用，通过电子云重排放大荧光信号，表明 DBD-CP 处理通过分子屏蔽效应显著提升了 ACNs 的光稳定性[23]。相比之下，未处理对照组荧光强度与空白载体（WPI-CS）接近，直接印证了 DBD-CP 对载体结

构致密性的关键调控作用。此外，空白载体在检测波长下无显著荧光响应，有效排除了载体自发荧光的干扰。以上结果共同表明，DBD-CP 处理可通过精准调控 WPI-CS 相互作用网络，实现功能成分的稳定包埋与性能强化。

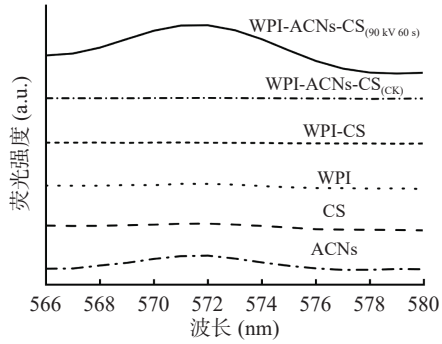


图 8 不同样品的荧光光谱图

Fig.8 Fluorescence spectra of different samples

2.2.5 CD 分析 CD 光谱是分析蛋白质二级结构变化的有效手段，常用于蛋白质二级结构的测定[37]。如图 9 所示，单体 WPI 的 CD 光谱在 201.79 nm 处呈现负峰，在 220.25 nm 处呈现正峰，表明其构象以 β-折叠为主[38]。引入 CS 后，形成的 WPI-CS 复合物光谱发生显著变化：主负峰红移至 207.65 nm，并在 244.03 nm 处出现新的正峰。这表明 CS 的阳离子侧链可能与 WPI 的羧基或羟基发生静电相互作用并形成氢键网络，扰动了 WPI 原有的 β-折叠构象。新正峰的出现可能与 CS 链间的有序堆积或 WPI-CS 界面处形成的新构象有关[39]。在含有 ACNs 的未处理 WPI-ACNs-CS 复合物中，负峰位置（201.41 nm）和正峰位置（220.99 nm）回移至接近 WPI 单体的状态。这表明 ACNs 的羟基可能竞争性地与 WPI 形成氢键，削弱了 WPI 与 CS 之间的相互作用，导致 WPI 的局部 β-折叠结构发生松弛[40]。经 DBD-CP 处理后，WPI-ACNs-CS 复合物的负峰位置蓝移至 199.19 nm，正峰位置蓝移至 219.54 nm，提示 β-折叠片层间的氢键网络可能变得更加致密，且 β-片层堆积有序性得到重建，构象趋于均一化。

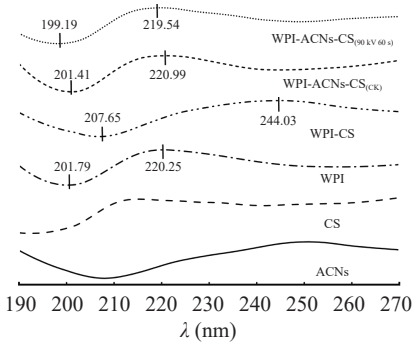


图 9 不同样品的圆二色谱图

Fig.9 Circular dichroism spectra of different samples

3 结论

本研究利用 DBD-CP 技术成功构建了具有高效负载特性的 WPI-CS 复合物载体体系，显著提升了 ACNs 的包埋效率与负载量。在 90 kV，60 s 条件下，ACNs 包埋效率与负载量分别达 91.93% 和 4.59%，粒径分布均匀，ζ-电位显著增大，体系稳定性显著增强。这一提升源于 DBD-CP 诱导的 WPI-CS 分子构象变化：FTIR 分析显示，3279.14 cm^{-1} 处 O-H/N-H 峰红移，表明氢键网络增强；CD 光谱中 β-折叠构象负峰蓝移至 199.19 nm，提示蛋白质二级结构展开并重建；SEM 观察到处理后的复合颗粒形成孔隙均一的致密网络结构，ζ-电位增至 41.4 mV，显著改善了体系稳定性。与现有研究相比，本研究阐明了 DBD-CP 的作用机制：通过降低 CS 脱乙酰化程度增强其阳离子特性，强化静电相互作用；同时暴露 WPI 疏水基团，促进与花青素的疏水结合。这一协同效应有效规避了传统方法导致的蛋白质变性风险及化学交联剂残留问题。基于此，本技术无需化学交联剂即可实现高效包埋，因而兼具环保、无化学添加、可持续等优势，在功能食品、保健品及药物载体领域具有广阔的应用前景，尤其适用于 ACNs 等敏感性生物活性物质的高效负载。为进一步验证体系功能，后续研究将优先开展动物实验，系统评估其体内生物利用度，为生物活性物质在复杂生理环境下的稳态化负载提供理论支撑和技术突破。

© 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] WEI Zihao, HUANG Qingrong. Edible Pickering emulsions stabilized by ovotransferrin–gum Arabic particles[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 590−601.

[2] 陈成, 李蕾, 毕会敏, 等. 紫甘蓝花青素/大豆分离蛋白复合膜的制备与性能研究[J]. 西部林业科学, 2022, 51: 67−73. [CHEN C, LI L, BI H M, et al. Preparation and properties of purple cabbage anthocyanin/soy protein isolate composite film[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51: 67−73.]

[3] 周宇峰, 高馨, 戴文青, 等. 纳米药物递送系统在耐药病原菌防控中的研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(3): 287−300. [ZHOU Y F, GAO X, DAI W Q, et al. Research progress on nano-drug delivery systems in the prevention and control of drug-resistant pathogens[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(3): 287−300.]

[4] 魏淑洁, 何函星, 郝锦涛, 等. 生物大分子药物纳米递送系统在罕见病治疗中的研究进展[J]. 药学学报, 2024, 59: 1952−1961. [WEI S J, HE H X, HAO J T, et al. Research progress of biomacromolecular drug nanodelivery systems in the treatment of rare diseases[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2024, 59: 1952−1961.]

[5] 庞志花, 孙梦雅, 李博睿, 等. 乳清分离蛋白-壳聚糖复合颗粒的构建及其微观结构表征[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(1): 99−105. [PANG Z H, SUN M Y, LI B R, et al. Construction and microstructure characterization of whey protein isolate-chitosan composite particles[J]. Journal of Food Science and Technology,

2023, 41(1): 99−105.］
［6］ 孙爽爽. 低温等离子体调控乳清蛋白-壳聚糖复合体系的构建及其在肉保鲜中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.［SUN S S. Construction of cold plasma-regulated whey protein-chitosan composite system and its application in meat preservation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.］
［7］ ZHANG Yu, ZHOU Hongchi, WANG Xin, et al. Effect of cold plasma synergistic acid induction on the quality characteristics of casein gel[J]. Food Chemistry, 2025, 468: 142401.
［8］ WANG Shuangshuang, ZHANG Jiaying, LI Guowei, et al. Changes of bacterial microbiota and volatile flavor compounds in ewe milk during dielectric barrier discharge cold plasma processing[J]. Food Research International, 2022, 159: 111607.
［9］ ZHOU Junjun, BIAN Yaqing, YANG Tongliang, et al. A non-thermal modification method to enhance the encapsulation efficiency, stability, and slow-release performance of zein-based delivery systems–Cold plasma[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 345: 111415.
［10］ QI Qianqian, CHU Meijun, YU Xiuting, et al. Anthocyanins and proanthocyanidins: Chemical structures, food sources, bioactivities, and product development[J]. Food Reviews International, 2023, 39(7): 4581−4609.
［11］ SINTARA M, LI L, CUNNINGHAM D G, et al. Single-laboratory validation for determination of total soluble proanthocyanidins in cranberry using 4-dimethylaminocinnamaldehyde[J]. Journal of AOAC International, 2018, 101(3): 805−809.
［12］ 杨萌. 共载蛋清肽和姜黄素的两亲性自组装递送体系构建及效用评价[D]. 长春: 吉林大学, 2023.［YANG M. Construction and efficacy evaluation of amphiphilic self-assembled delivery system co-loaded with egg white peptides and curcumin[D]. Changchun: Jilin University, 2023.］
［13］ 李双健, 邸清茹, 龚敏慧, 等. 壳聚糖/玉米醇溶蛋白-花色苷纳米颗粒复合膜的制备及其性能[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 213−222.［LI S J, DI Q R, GONG M H, et al. Preparation and properties of chitosan/zein-anthocyanin nanoparticle composite film[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 213−222.］
［14］ LI Shuangjian, LI Siyuan, GONG Minhui, et al. Development of Zein/tannic acid nanoparticles as antioxidants for oxidation inhibition of blackberry seed oil emulsions[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134236.
［15］ WANG Yuying, SUN Ruitong, XU Xianbing, et al. Structural interplay between curcumin and soy protein to improve the water-solubility and stability of curcumin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193: 1471−1480.
［16］ 罗辑, 戴照琪, 赵航, 等. 等离子体活性水腌制对风干里脊中生物胺含量及感官品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 361−368.［LUO J, DAI Z Q, ZHAO H, et al. Effect of plasma-activated water curing on biogenic amines content and sensory quality of air-dried tenderloin[J]. Food Science, 2022, 43(6): 361−368.］
［17］ 解明浩, 徐献兵, 王震宇, 等. 基于纳豆激酶特性的功能递送载体研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 153−161.［XIE M H, XU X B, WANG Z Y, et al. Research progress on functional delivery carriers based on nattokinase characteristics[J]. Food Science, 2023, 44(3): 153−161.］
［18］ SUN Fuwei, LI Bailiang, GUO Yanan, et al. Effects of ultrasonic pretreatment of soybean protein isolate on the binding efficiency, structural changes, and bioavailability of a protein-luteolin nanodelivery system[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 88: 106075.
［19］ DAS R, BANDYOPADHYAY P P. Processing of solid lubricant doped ceramic powder feedstock using heterocoagulation technique for plasma spraying[J]. Ceramics International, 2022, 48(17): 25592−25609.
［20］ 高宝宇, 鲁燕玲, 邓艳梅, 等. 低温等离子体处理对海藻酸钠-核桃分离蛋白结构及性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(2): 1−12.［GAO B Y, LU Y L, DENG Y M, et al. Effect of cold plasma treatment on the structure and properties of sodium alginate-walnut protein isolate[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(2): 1−12.］
［21］ CHEN Guiyun, DONG Shuang, CHEN Yue, et al. Complex coacervation of zein-chitosan via atmospheric cold plasma treatment: Improvement of encapsulation efficiency and dispersion stability[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105943.
［22］ LAROUSSI M. Cold plasma in medicine and healthcare: The new frontier in low temperature plasma applications[J]. Frontiers in Physics, 2020, 8: 74.
［23］ DAI Taotao, LI Ti, LI Ruyi, et al. Utilization of plant-based protein-polyphenol complexes to form and stabilize emulsions: Pea proteins and grape seed proanthocyanidins[J]. Food Chemistry, 2020, 329: 127219.
［24］ TURASAN H, BARBER E A, MALM M, et al. Mechanical and spectroscopic characterization of crosslinked zein films cast from solutions of acetic acid leading to a new mechanism for the crosslinking of oleic acid plasticized zein films[J]. Food Research International, 2018, 108: 357−367.
［25］ GAO Kun, RAO Jiajia, CHEN Bingcan. Unraveling the mechanism by which high intensity ultrasound improves the solubility of commercial pea protein isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107823.
［26］ SEGAT A, MISRA N N, CULLEN P J, et al. Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of whey protein isolate model solution[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 29: 247−254.
［27］ XIA Tianhang, XUE Changhu, WEI Zihao. Physicochemical characteristics, applications and research trends of edible Pickering emulsions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 107: 1−15.
［28］ GUPTA R K, GUHA P, SRIVASTAV P P. Effect of high voltage dielectric barrier discharge (DBD) atmospheric cold plasma treatment on physicochemical and functional properties of taro (*Colocasia esculenta*) starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126772.
［29］ EKEZIE F C, CHENG J H, SUN D W. Effects of atmospheric pressure plasma jet on the conformation and physicochemical properties of myofibrillar proteins from king prawn (*Litopenaeus vannamei*)[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 147−156.
［30］ LYN F H, PENG T C, RUZNIZA M Z, et al. Effect of oxidation degrees of graphene oxide (GO) on the structure and physical properties of chitosan/GO composite films[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 21: 100373.
［31］ LI Hongcai, SONG Jiangling, LIU Caiyun, et al. Corn starch/*β*-Cyclodextrin composite nanoparticles for encapsulation of tea polyphenol and development of oral targeted delivery systems with pH-responsive properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109823.
［32］ 袁松凯, 周立, 徐园杰, 等. 簇状糊精复合壁材包埋核桃油的工艺过程研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(3): 1−16.［YUAN S K, ZHOU L, XU Y J, et al. Study on the process of walnut oil en-

capsulation using cluster dextrin composite wall material[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(3): 1−16.]

[33] GAO Jing, ZHANG Danyang, WANG Yuejiao, et al. Ethanolamine modified ordered mesoporous silica KIT-6: One-pot and rapid microwave synthesis, and efficient recovery for rhenium (VII)[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 656: 130337.

[34] XU Ting, LI Xiaojing, WU Caie, et al. Improved encapsulation effect and structural properties of whey protein isolate by dielectric barrier discharge cold plasma[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128556.

[35] CHEN Shuai, MA Xihan, HAN Yahong, et al. Effect of chitosan molecular weight on zein-chitosan nano complexes: Formation, characterization, and the delivery of quercetagetin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 2215−2223.

[36] 李文慧, 刘媛媛, 姜金池, 等. 玉米醇溶蛋白-果胶复合纳米颗粒的制备及其在稳定 Pickering 乳液中的应用[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(1): 48−54. [LI W H, LIU Y Y, JIANG J C, et al. Preparation of zein-pectin composite nanoparticles and their application in stabilizing Pickering emulsion[J]. Food Research and Development, 2025, 46(1): 48−54.]

[37] 王晶晶, 徐为民, 王道营. 姜黄素与猪脂肪氧合酶相互作用及对蛋白质结构的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(4): 19−24. [WANG J J, XU W M, WANG D Y. Interaction of curcumin with porcine lipoxygenase and its effect on protein structure[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(4): 19−24.]

[38] LIU Jingwen, JIANG Lun, ZHANG Yunyue, et al. Binding behaviors and structural characteristics of ternary complexes of *β*-lactoglobulin, curcumin, and fatty acids[J]. RSC Advances, 2017, 7(73): 45960−45967.

[39] WANG Linlin, WANG Lilong, WEN Chengrong, et al. Chitosan and chitosan oligosaccharide influence digestibility of whey protein isolate through electrostatic interaction[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 1443−1452.

[40] YAN Yuhan, TANG Rui, LI Feng, et al. Spectral analysis of the impact of various polysaccharides on the entrapment of curcumin by whey protein isolate[J]. Food Chemistry, 2025, 468: 142441.