唐文西, 隋勇, 车金鑫, 等. 大豆分离蛋白纤维与红曲色素复合物结构表征及其色泽稳定性探究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 57−64. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030326

TANG Wenxi, SUI Yong, CHE Jinxin, et al. Structural Characterization of Soybean Protein Isolate Fiber and *Monascus* Pigment Complex and Its Color Stability[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 57−64. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030326

· 研究与探讨 ·

大豆分离蛋白纤维与红曲色素复合物结构表征及其色泽稳定性探究

唐文西[1,2], 隋　勇[1,*], 车金鑫[2], 施建斌[1], 文俊仁[1], 陈学玲[1], 蔡　芳[1], 熊　添[1], 梅　新[1,*]

（1.农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 特色农产品资源挖掘与高质利用湖北省重点实验室, 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064;
2.湘潭大学化工学院, 湖南湘潭 411105）

摘　要: 本研究旨在探究大豆分离蛋白纤维（SPF）与红曲色素（Mps）复合机制及在不同条件下对 Mps 稳定性的影响。通过光谱学手段，表征复合物结构特性，并评估复合物中 Mps 的热、pH 和光稳定性。结果表明，复合物中 SPF 与 Mps 相互作用以氢键和疏水作用力为主，加入 Mps，改变 SPF 的微环境，降低 SPF 中色氨酸（Trp）和酪氨酸（Tyr）残基附近的疏水性，改变了蛋白质的二级结构；相较于 SPF，浓度为 3 mg/mL 的 SPF-Mps 复合物（SPM3.0）中 SPF 的 α-螺旋和 β-折叠相对含量分别下降 52.35% 和 11.95%，β-转角和无规卷曲相对含量分别增加 19.04% 和 69.56%。SPF 可提高 Mps 稳定性，不同温度、pH 及光照条件下，复合物中 Mps 保留率均显著高于游离 Mps；相较于游离 Mps，在 385 nm 和 410 nm 的吸光度下，4 ℃ 条件，复合物中 Mps 保留率分别提高 19.03% 和 38.46%；pH9.0 时，Mps 保留率上升幅度最大，分别为 79.21% 和 230.41%；光照 6 h 后，Mps 浓度为 20 mg/mL 的复合物中 Mps 保留率上升幅度最大，分别为 104.69% 和 149.89%。本研究结果为植物基肉制品的色泽改良和质量控制提供理论依据。

关键词: 大豆分离蛋白纤维, 红曲色素, 结构特性, 复合机制, 色泽稳定性

中图分类号: TS201.2; TS202.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0057−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030326

本文网刊:

Structural Characterization of Soybean Protein Isolate Fiber and *Monascus* Pigment Complex and Its Color Stability

TANG Wenxi[1,2], SUI Yong[1,*], CHE Jinxin[2], SHI Jianbin[1], WEN Junren[1], CHEN Xueling[1], CAI Fang[1], XIONG Tian[1], MEI Xin[1,*]

（1.Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Key Laboratory of Characteristic Resources and Utilization, Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;
2.School of Chemical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China）

Abstract: The present study aimed to investigate the complexation mechanism between soy protein isolate fibers (SPF) and *Monascus* pigments (Mps), as well as the effects of different conditions on the stability of Mps within the complex. Spectroscopic methods were employed to characterize the structural properties of the complex and to evaluate the thermal, pH, and photostability of Mps within the complex. The results demonstrated that the interaction between SPF and Mps in the complex was primarily driven by hydrogen bonds and hydrophobic forces. The incorporation of Mps altered the microenviron-

收稿日期: 2025−03−25

基金项目: 国家农业科技重大项目。

作者简介: 唐文西（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 生物与医药, E-mail: 2589542436@qq.com。

*** 通信作者:** 隋勇（1987−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 粮食精深加工及副产物综合利用, E-mail: suiyong0429@foxmail.com。

梅新（1978−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 薯类深加工及副产物综合利用, E-mail: 112076404@qq.com。

ment of SPF, reducing the hydrophobicity around tryptophan (Trp) and tyrosine (Tyr) residues and consequently modifying the secondary structure of the protein. Compared to pure SPF, in the SPF-Mps complex with a concentration of 3 mg/mL (SPM3.0), the relative content of α-helix and β-sheet in SPF decreased by 52.35% and 11.95%, respectively, while the relative content of β-turn and random coil increased by 19.04% and 69.56%, respectively. SPF enhanced the stability of Mps, as evidenced by significantly higher retention rates of Mps in the complex under various temperature, pH, and illumination conditions compared to free Mps. Specifically, under a condition of 4 ℃, the retention rates of Mps in the complex increased by 19.03% and 38.46% at absorbance wavelengths of 385 nm and 410 nm, respectively, compared to free Mps. At pH9.0, the largest increase in Mps retention rate was observed, with values of 79.21% and 230.41% at the two wavelengths. After 6 hours of illumination, the complex with a concentration of 20 mg/mL exhibited the highest increase in Mps retention rate, with values of 104.69% and 149.89% at the respective wavelengths. The findings of this study provide a theoretical basis for the color improvement and quality control of plant-based meat products.

Key words: soy protein fiber isolate; *Monascus* pigments; structural characteristic; composite mechanism; color stability

大豆分离蛋白(Soy protein isolate, SPI)是一种从大豆中分离出来且相对稳定的球状蛋白,是一种常见的植物蛋白[1],SPI 营养丰富,蕴含人体所必需氨基酸,长期食用,可有效降低罹患高脂血症和心血管疾病的风险[2]。SPI 经水化、高温挤压及机械剪切处理发生变性,形成具有分层、纤维状的组织结构,即为大豆分离蛋白纤维(Soy protein isolate fiber, SPF)。SPF 具有高纵横比和较大的比表面积,SPI 纤维化展开了其蛋白质结构,提高了乳化活性、乳化稳定性等,因此蛋白质自组装形成的纤维化结构作为功能因子的潜在载体引起了广泛关注[3]。

红曲色素(*Monascus* pigments, Mps)是以大米、大豆为主要液体培养基料经红曲菌液态发酵培养、提取、浓缩、精制而成;或以红曲米为原料,经萃取、浓缩、精制而得到的聚酮类复合物[3]。Mps 组分复杂,已鉴别的组分主要包括红色素、橙色素、黄色素等,具有降血脂、抗氧化、降血糖及抗阿尔兹海默症等功效[4−7]。Mps 具有较高的安全性,相关国标规定红曲红作为食品添加剂在食品生产中可按需适量添加[3]。然而,在食品体系中,Mps 色泽稳定性受温度、pH、光照、金属离子等多种因素影响,在加工过程中易损失降解,极大降低着色性能,限制其在食品中应用,提高 Mps 在食品加工过程中色泽稳定性可扩展其在食品加工领域应用范围。

近年来,蛋白质与色素的互作逐渐成为食品科学研究的热点领域,构建包含生物大分子如蛋白质和多糖的复合体系负载食源性活性小分子,是提升色素等小分子稳定性的有效方法[8]。Yang 等[9] 采用由卵清蛋白-osa 修饰果胶-芦丁构建的纳米载体包封 Mps,结果显示,包封后 Mps 光、热及贮存稳定性显著增强。Cao 等[10] 研究表明 SPI 与叶绿素间互作结合是基于疏水作用力,且结合后叶绿素热稳定性显著提升。Ali 等[11] 研究表明酪蛋白酸钠与 Mps 形成复合物,提高酸性条件下 Mps 溶解度和热稳定性。Hu 等[12] 研究由大米蛋白和 SPI 组成的复合蛋白对甜菜素热保护效果及保护机制,发现复合蛋白通过氢键与甜菜素结合,以非共价方式提高甜菜素热稳定性。在已有文献中,Zhao 等[13] 研究了 SPF 与甜菜碱的相互作用并评估了甜菜碱的热稳定性,发现 SPF 通过疏水相互作用与甜菜碱结合,并可提高甜菜碱的热稳定性。而有关 SPF 与 Mps 复合物结构特性及色泽稳定性的研究,鲜有报道。

目前,国内外植物基肉制品研究方兴未艾,色泽仿真度是植物基肉制品研发领域重点研究内容,SPI 是制作植物基肉制品主要原料,Mps 作为优良天然色素可应用于改善植物基肉制品色泽。相比 SPI,SPF 具有多孔结构,且比表面积大,热、化学稳定性高,在与各种小分子相互作用过程中可提供更多结合位点,更适合作为生物活性分子的稳定递送载体[14−15]。本研究旨在表征 SPF 与 Mps 复合物结构特性,探究 SPF 与 Mps 复合机制,并评价复合物中 Mps 在不同体系中稳定性变化规律,为 Mps 作为大豆蛋白为原料植物基肉制品色泽改良剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆分离蛋白　山东禹王生态食业有限公司;Mps(色价为 100)　广东科隆生物科技有限公司;氢氧化钠、乙酸、乙酸钠、无水乙醇、无水甲醇、石油醚、盐酸　国药集团化学试剂有限公司;实验所用试剂均为分析纯。

XU-AZ2K-R 型离心机　上海析牛莱伯仪器有限公司;KS-700TDV 型超声波清洗机　昆山洁力美超声仪器有限公司;ZLGJ-12 型真空冷冻干燥机　河北盈盛仪器有限公司;Nicolet 型傅里叶变换红外色谱仪　赛默飞世尔有限公司;JASCO-810 型圆二色光谱仪　佳斯科(上海)贸易有限公司;F-4700 型荧光分光光度计　日立科学仪器有限公司;Infinite M200 PRO 型酶标仪　瑞士 Tecan 公司;nano zs90 型激光纳米粒度仪　马尔文帕纳科公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SPF-Mps 复合物制备　参照 Zhao 等[16] 的方法进行制备并进行了细微修改。取 12 g SPI 与蒸馏水充分混合,以 2 mol/L 的 HCl 调节混合液 pH 至 2.0,后定容至 400 mL,继续搅拌 30 min,于 3500 r/min 下离心 10 min,取上清液于 85 ℃ 下磁力

搅拌 20 h 得原丝混合液，冻干得 SPF 粉末。取一定量 SPF、Mps 分别与蒸馏水充分混合，持续搅拌 3 h，制备 6 mg/mL SPF 溶液和不同浓度的 Mps 溶液，按体积比 1∶1 将 SPF 与 Mps 溶液混合，充分搅拌均匀得 SPF-Mps 复合物，记为 SPM，复合物中 SPF 的质量浓度始终固定为 3 mg/mL，复合物 SPM 的浓度以所含 Mps 浓度表示。0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 mg/mL SPM 溶液是由 6.0 mg/mL SPF 溶液分别与 1.0、2.0、3.0、4.0、6.0 mg/mL Mps 溶液 1∶1 混合，分别记为 SPM0.5、SPM1.0、SPM1.5、SPM2.0、SPM3.0，以此类推。

1.2.2　SPM 复合物结构表征

1.2.2.1　荧光光谱分析　同步荧光：分别配制含有 5、7.5、10、12.5、15 mg/mL Mps 的 SPM 溶液，记为 SPM5、SPM7.5、SPM10、SPM12.5、SPM15，以 SPF（3 mg/mL）为对照在 298 K 条件下扫描样品同步荧光，波长范围为 220~400 nm（酪氨酸，$\Delta\lambda$=15 nm）和 200~340 nm（色氨酸，$\Delta\lambda$=60 nm）[17]。三维（3D）荧光：分别制备 5、7.5、10、12.5、15 mg/mL SPM 溶液，以 SPF（3 mg/mL）为对照测定 3D 荧光光谱，参数为：激发波长 200~320 nm，发射波长 270~500 nm，狭缝 5 nm，扫描速率 12000 nm/min[18]。

1.2.2.2　红外光谱分析　分别配制含有 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 mg/mL Mps 的 SPM 溶液并冻干得粉末，并以 SPF 为对照。SPM 与 SPF 冻干粉末与 KBr 按 1∶100（w/w）比例混合，研磨均匀、压片，于 1000~3600 cm^{-1} 扫描，分辨率 4 cm^{-1}[19]。

1.2.2.3　圆二（CD）色谱　分别配制含有 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 mg/mL Mps 的 SPM 溶液，按 1 nm 步长采用 CD 色谱仪测定其在 190~260 nm 范围内的 CD 光谱，采用 DICHROWEB 网站计算 SPM 二级结构。

1.2.2.4　SPF-Mps 粒径、PDI、电位测定　分别配制含有 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 mg/mL Mps 的 SPM 溶液，采用激光纳米仪测定 SPM 平均粒径、聚合物分散性指数（Polydispersity index，PDI）、ζ 电位。

1.2.3　SPM 复合物中 Mps 稳定性测定

1.2.3.1　热稳定性　采用许雨晗等[8]的方法测定 SPM 热稳定性，将含有 3 mg/mL Mps 的 SPM 溶液分别置于 4、25、50 ℃ 下避光孵育 6 h，以相同浓度（以 SPM 中 Mps 浓度计）的 Mps 溶液为对照，间隔 2 h 取样一次，分别于 385 nm（红曲黄色素检测波长）和 410 nm（红曲红色素检测波长）处测定样品吸光度，依据公式计算 Mps 保留率。

$$\text{Mps保留率}(\%)=\frac{A_n}{A_0}\times 100$$

式中：A_n 表示不同处理后吸光度值，A_0 表示初始吸光度值。

红曲色素在 385 nm 处的标曲为：y=0.004x+0.0002，R^2=0.9995。在 410 nm 处的标曲为：y=0.0059x−0.0001，R^2=0.9999。式中，y 表示吸光度值，x 表示红曲色素质量浓度，mg/L。

1.2.3.2　pH 稳定性　参照许雨晗等[8]的方法测定 Mps pH 稳定性，将 SPF 冻干粉末与 Mps 分别溶于 pH 为 3、5、7、9、11 的 PBS 溶液（0.1 mol/L）中配制含有 3 mg/mL Mps 的 SPM 溶液，充分混匀后室温避光孵育 6 h，以相同浓度（以 SPM 中 Mps 浓度计）Mps 溶液为对照，测定样品在波长 385 nm 和 410 nm 处的吸光度，依据 1.2.3.1 中公式计算 Mps 保留率。

1.2.3.3　光稳定性　参照郭佳[20]的方法测定 Mps 光稳定性，分别配制含有 5.0、10.0、20.0 mg/mL Mps 的 SPM 溶液，分别置于恒温光照（光照强度为 3000 Lux，温度 25 ℃）培养箱中照射 12、24、36、48、60 h，以相同浓度（以 SPM 中 Mps 浓度计）的 Mps 溶液作为对照，间隔 12 h 取样一次，测定样品在波长 385 nm 和 410 nm 处的吸光度，依据 1.2.3.1 中公式计算 Mps 保留率。

1.3　数据处理

所有实验均独立重复三次，采用 SPSS27 软件进行单因素 ANOVA 检验，采用邓肯多重检验法比较数据的显著性，P<0.05 表示存在显著性差异，使用 Origin2024 软件进行图表绘制。

2　结果与分析

2.1　SPF 与 Mps 相互作用对 SPF 的荧光光谱分析

从图 1 中可以看出，随着波长增大，Tyr 和 Trp 的荧光强度均呈先增强后减弱的变化趋势，Tyr 的荧光强度弱于 Trp，表明 Trp 是 SPF 荧光的主要贡献

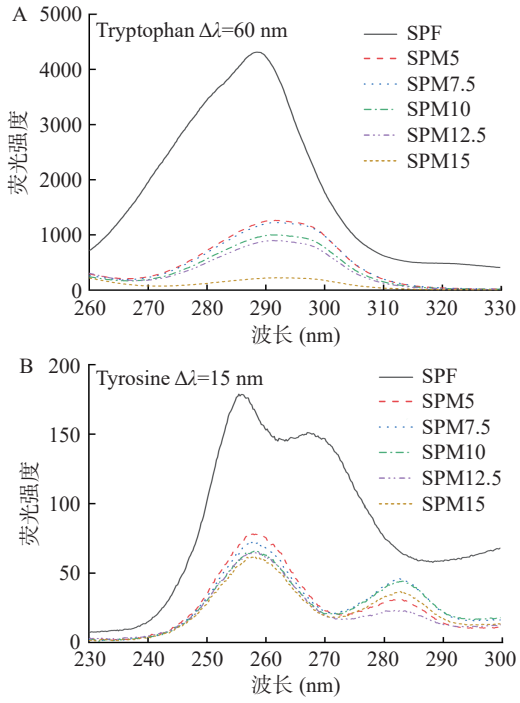


图 1　不同浓度 SPM 的同步荧光光谱

Fig.1　Simultaneous fluorescence spectra of different concentrations of SPM

者。随着复合物中 Mps 浓度的增加，Trp 和 Tyr 残基最大发射波长均发生不同程度的红移，表明加入 Mps，改变溶液中 SPF 微环境，降低 Trp 和 Tyr 残基附近的疏水性，增强残基周围环境的极性，导致蛋白质二级结构发生变化。相比于 SPF，SPM15 的 Trp 和 Tyr 荧光强度分别降低了 94.84% 和 65.66%，表明 Trp 和 Tyr 残基共同参与 SPF 和 Mps 非共价键结合过程[21]。Liu 等[22] 研究表明，与天然色素结合导致了大豆蛋白结合位点的荧光淬灭，且荧光强度随色素浓度增加而降低；随着胭脂树橙浓度增加，其与蛋白质的相互作用导致酪蛋白酸钠、乳清蛋白分离物和 SPI 的荧光强度均降低[23]。

峰 a 和 c 处的激发波长（λex）等于发射波长（λem），可视为瑞利散射峰，而峰 b（λem=2λex）为二阶散射光谱，这主要是由仪器伪影造成的[24]。峰 1（λex=280 nm，λem=340 nm）主要揭示蛋白质中 Trp 和 Tyr 残基的荧光强度，峰 2（λex=230 nm，λem=350 nm）源自于肽链骨架结构[11]。图 2A~图 2F 分别为不同浓度 Mps 下 SPF 的 3D 荧光光谱，由图可知，随着 Mps 浓度升高，峰 1 的高度显著降低（P<0.05），这与同步荧光结果相吻合，加入 Mps 掩盖了 SPF 中 Tyr 和 Trp 的疏水基团[25]；与峰 1 相似（λex=230 nm，λem=330 nm），随着 Mps 浓度升高，峰 2 高度亦显著降低，表明 Mps 改变了 SPF 的二级结构。在所有 Mps 浓度下，峰 1 的荧光强度均高于峰 2，因芳香族氨基酸处于高度激发态[25]，在 230 nm 处提供给肽主链的能量强度大于 280 nm。通常情况下，蛋白质荧光是由芳香族氨基酸的原子产生，其吸收能量后成为激发态，后通过非辐射跃迁（发射荧光）迅速松弛到最低能级[26]。光谱的形状与波长无关，这解释了峰 1 和峰 2 形状和变化趋势相似的原因。

2.2 SPF 与 Mps 相互作用对 SPF 的红外光谱分析

蛋白质傅里叶变换红外光谱中，酰胺Ⅰ（C=O 拉伸振动，1657.72 cm^{-1}）、酰胺Ⅱ（C-N 伸缩和 N-H 弯曲振动，1545.00 cm^{-1}）和酰胺Ⅲ（C-O 和 C-O-C 振动，1241.09 cm^{-1}）的峰位变化与其二级结构的变化相关[27]。图 3 为加入不同浓度 Mps 后 SPM 的 FT-IR 光谱，由图可知，SPF 的 N-H 拉伸振动的特征峰值为 3291.55 cm^{-1}[28]，加入 Mps 后，该特征峰发生偏移，且随着 SPM 中 Mps 浓度升高，该特征峰从 3290.28 cm^{-1} 移位至 3282.20 cm^{-1}，表明氢键是 SPF 和 Mps 之间主要相互作用方式。2963.18 cm^{-1} 和 1450.42 cm^{-1} 是复合物中 C-H 不对称拉伸特征峰，

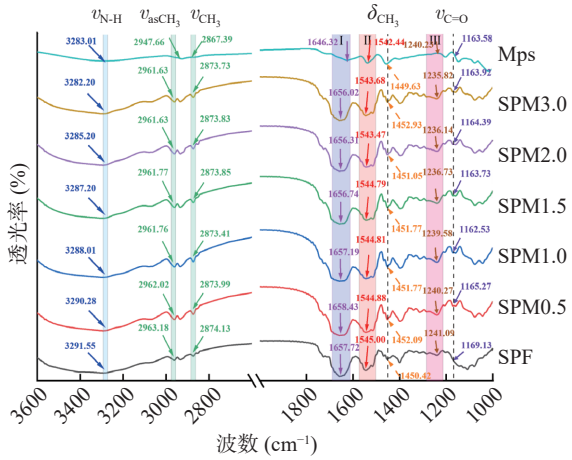


图 3 不同浓度 SPM 的红外光谱

Fig.3 Infrared spectra of different concentrations of SPM

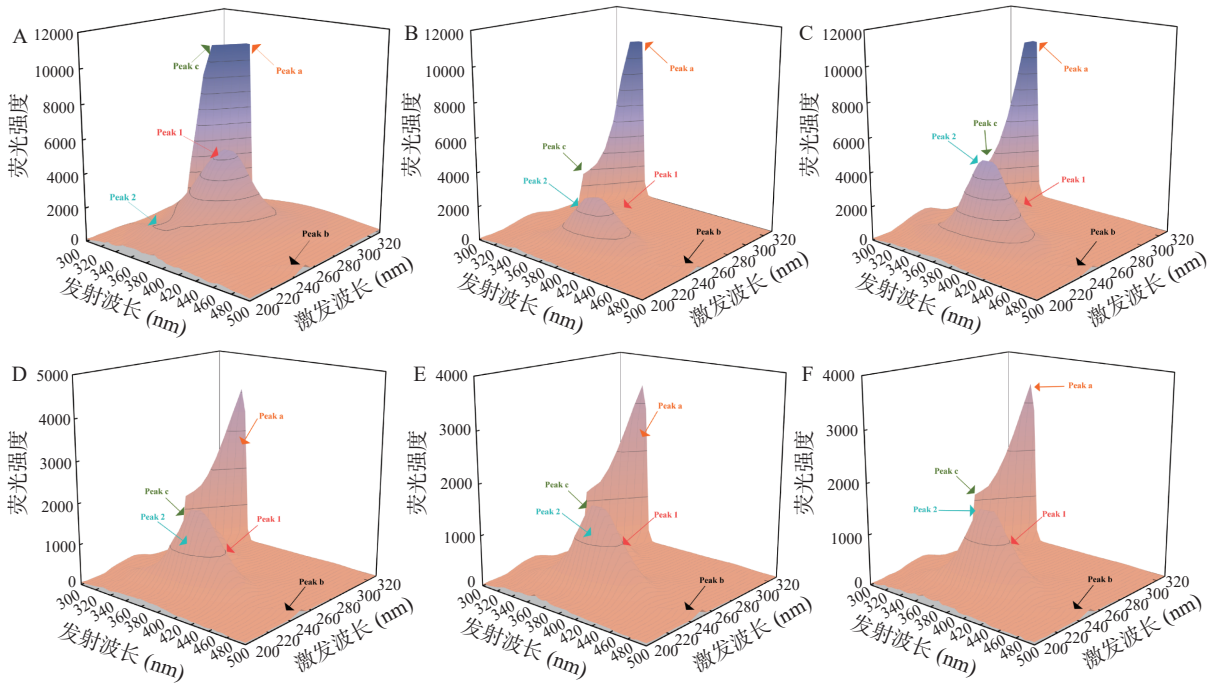


图 2 不同浓度 SPM 的 3D 荧光光谱

Fig.2 3D Fluorescence spectra of different concentrations of SPM

注：A~F 分别表示 SPF 和浓度为 5、7.5、10、12.5、15 mg/mL SPM 的荧光光谱。

随着 SPM 中 Mps 浓度升高，该特征峰出现轻微偏移；位于 2874.13 cm^{-1} 的 C-H 对称拉伸峰位置也发生了不同程度变化[29]；此外，在添加 Mps 后，位于 1169.13 cm^{-1} 附近的 C=O 拉伸振动峰从 1169.13 cm^{-1} 偏移到 1163.92 cm^{-1}。上述结果表明，添加 Mps 后，复合物中多个官能团的峰值位置发生移动，且随着 SPM 中 Mps 浓度升高，位移程度增大，证实 Mps 与 SDF 形成了非共价复合物，且二者间结合力以氢键作用为主。

2.3　SPF 与 Mps 相互作用对 SPF 的圆二色谱分析

加入不同浓度 Mps 后 SPM 的圆二色谱如图 4 所示，由图可知，SPF 中 α-螺旋(α-helix)、β-折叠(β-sheet)、β-转角(β-turn)和无规卷曲(random coil)的相对含量分别为 34.19%、21.18%、20.19% 和 23.44%。加入 Mps 后，随着 SPM 中 Mps 浓度升高，α-螺旋的相对含量呈下降变化趋势，相比 SPF，SPM3.0 中 α-螺旋相对含量降低 52.35%，β-折叠相对含量下降 11.95%，β-转角和无规卷曲相对含量分别增加 19.04% 和 69.56%，进一步证实 Mps 对 SPF 二级结构有显著影响(P<0.05)。此外，随着 SPM 中 Mps 浓度的增加，SPF 二级结构的变化速率逐渐降低，α-螺旋变化速率从 30.89% 下降至 6.43%，β-折叠、β-转角和无规卷曲分别从 11.09%、4.67%、6.87% 降至 2.68%、4.17%、3.22%。可能是溶液中 Mps 浓度升高，二者间相互作用趋于饱和。Dai 等[30] 认为，α-螺旋相对含量降低表明蛋白质氢键结构被破坏，Mps 可进入蛋白质的疏水口袋。Lang 等[31] 研究也表明，添加 M3G 后，α-酪蛋白 α-螺旋相对含量从 23.7% 下降至 20.1%，β-折叠相对含量从 17.3% 下降到 16.7%，β-转角及无规卷曲的相对含量增加。这些结果都表明添加色素破坏了蛋白质的二级结构，这印证了本研究中同步荧光分析结果。

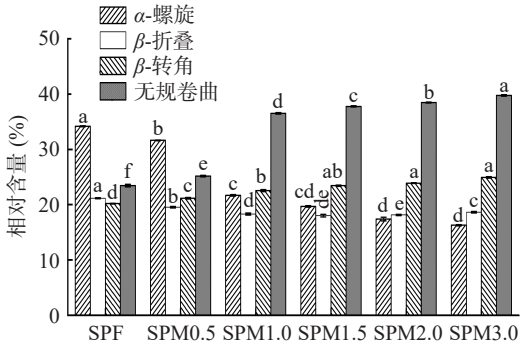


图 4　不同浓度 SPM 的二级结构相对含量

Fig.4　Secondary structure relative content of different concentrations of SPM

注：不同小写字母表示有显著性差异(P<0.05)，图 5~图 8 同。

2.4　SPF 与 Mps 相互作用对 SPF 的粒径及电位分析

图 5 显示了加入不同浓度 Mps 后 SPM 的粒径分布以及 ζ 电位。从图中可以看出，SPF 的平均粒径为 497.9 nm，高于 SPM，随着 SPM 中 Mps 浓度升高，其平均粒径呈下降变化趋势，相比于 SPF，SPM3.0 平均粒径降低 77.06%(图 5A~图 5C)；随着 SPM 中 Mps 浓度升高，其 PDI 呈先上升后下降的变化趋势，当 Mps 浓度为 2.0 mg/mL，PDI 最高，达 0.577；SPM 的 ζ 电位绝对值呈先上升后下降变化趋势，SPM2.0 其绝对值最高达 35.33 mV。SPM 复合物平均粒径降低，可归因于靶蛋白与小分子之间的桥接作用形成了紧凑的核心结构[32]。SPM 复合物平均粒径与其配体和受体的浓度密切相关，随着配体相对浓度升高，二者相互作用加剧，复合物平均粒径减小[33]。当 SPM 中 Mps 浓度大于 1 mg/mL 时，粒径分布曲线中出现了粒径远高于 SPF 的峰，这也导致了 PDI 的增加。SPM 复合物粒径与其 ζ 电位密切相

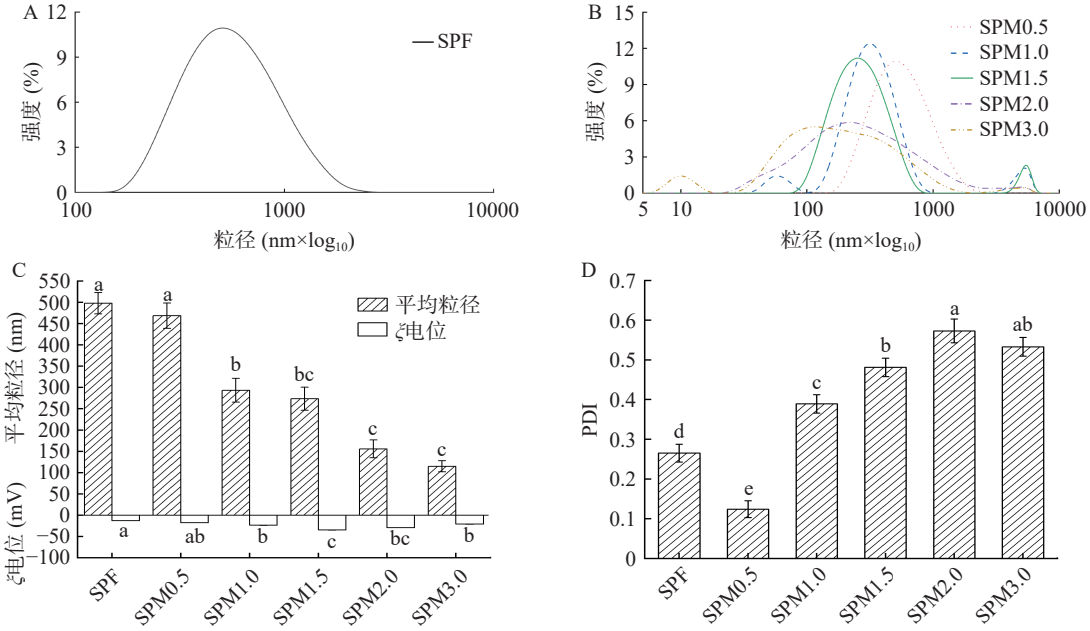


图 5　不同浓度 SPM 的粒径和电位

Fig.5　Particle size and zeta potential of different concentrations of SPM

关, 随着复合物形成, 复合物表面带负电荷量增加导致颗粒间排斥力增强, 一定程度阻止了颗粒间聚集, 促使 SPM 在溶液中分布更均匀, 减小了复合物的粒径[34]。此外, 所有 SPM 的 ζ 电位绝对值均不超过 40 mV, 推测可能有其他非极性结合力(如疏水相互作用)在 SPM 复合物的形成中起着重要作用[35]。

2.5 红曲色素稳定性分析

2.5.1 红曲色素热稳定性分析 不同温度下复合物在 385 nm(图 6A)和 410 nm(图 6B)处吸光值的变化表征 Mps 保留率, 如图 6 所示。从图中可以看出, 在不同温度下, 随着处理时间延长, SPM 中 Mps 保留率均呈下降趋势, SPM 中 Mps 下降速率均低于游离 Mps; 相同处理时间下, SPM 中 Mps 保留率显著高于游离 Mps(P<0.05), 且随着温度升高, Mps 保留率下降。相较于游离 Mps, 4、25、50 ℃ 分别处理 6 h 后, 在 385 nm 处, 复合物中 Mps 保留率较游离 Mps 保留率分别提高了 19.03%、14.86%、17.15%, 在 410 nm 处分别提高了 38.46%、16.67%、9.92%, 表明低温有利于维持 Mps 稳定性, SPF 与 Mps 复合以及复合物低温贮藏可有效减缓 Mps 降解, 提高其稳定性。Ali 等[11] 研究酪蛋白酸钠与 Mps 复合对 Mps 稳定性的影响, 结果表明, 复合物溶液吸光度较游离 Mps 溶液提升 0.32, 表明酪蛋白酸钠与 Mps 通过疏水相互作用及氢键等作用力提高了 Mps 的稳定性。

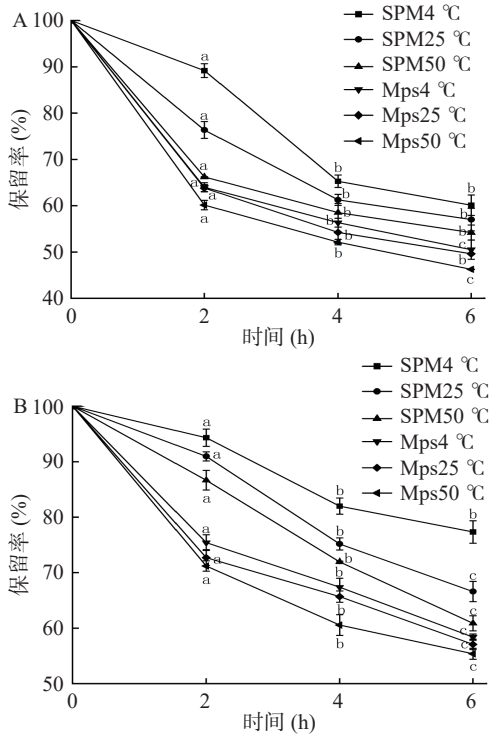


图 6 不同温度条件下游离 Mps 和 SPM 中 Mps 的保留率

Fig.6 Retention of Mps in free Mps and SPM at different temperatures

注: A 为 385 nm 吸光度, B 为 410 nm 吸光度; SPM 和 Mps 后数字均为温度。

2.5.2 红曲色素酸碱稳定性分析 不同 pH 下 SPM 中 Mps 保留率如图 7 所示, 从图中可以看出, 游离 Mps 和 SPM 中 Mps 保留率分别介于 20%~50% 和 50%~70% 之间, 且 SPM 中 Mps 保留率显著高于游离 Mps(P<0.05); 相比于 Mps, pH3、5、7、9、11 时, 在 385 nm 下 SPM 中 Mps 保留率分别提高 19.88%、62.32%、49.79%、79.21%、123.98%, 在 410 nm 下 SPM 中 Mps 保留率分别提高 48.62%、89.06%、80.78%、230.41%、147.39%。pH 为酸性时, pH5 SPM 中 Mps 的保留率大于 pH3; 碱性条件下 SPM 中 Mps 保留率高于酸性和中性条件。可能是 pH5 接近于蛋白的等电点, 改变了蛋白结构, 导致了蛋白的聚集。而碱性条件下蛋白质的溶解性较高, 有利于 Mps 的结合和保留。上述结果说明, SPF 与 Mps 复合可提升 Mps 酸碱稳定性, 可能是 Mps 与 SPF 结合后进入了其疏水腔中, 被 SPF 包裹, 使得 Mps 酸碱稳定性提升[36]。

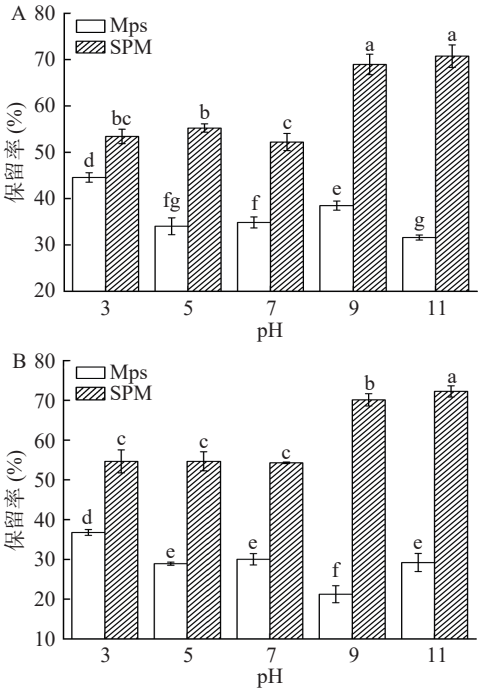


图 7 不同 pH 条件下 Mps 和 SPM 中 Mps 保留率

Fig.7 Mps retention in Mps and SPM under different pH conditions

注: A 为 385 nm 吸光度, B 为 410 nm 吸光度。

2.5.3 红曲色素光稳定性分析 在光照射下, 色素中最不稳定的脂肪族侧链易发生断裂, 出现 Norrish Ⅰ型分解, 此过程破坏了色素中发色基团及共轭体系, 导致色素溶液颜色变浅[37]。如图 8 所示, 随着光照时间延长, 游离 Mps 和 SPM 中 Mps 保留率均呈下降趋势; 相同光照时间下, SPM 中 Mps 保留率高于游离 Mps, 且 SPM 中 Mps 保留率随 SPM 浓度升高而增大。相比于游离的 Mps, 光照 60 h 后, 在 385 nm(图 8A)下, 随着 SPM 浓度升高, SPM 中 Mps 保留率分别提高 24.76%、34.75%、104.69%; 在 410 nm(图 8B)下, SPM 中 Mps 保留率分别提高

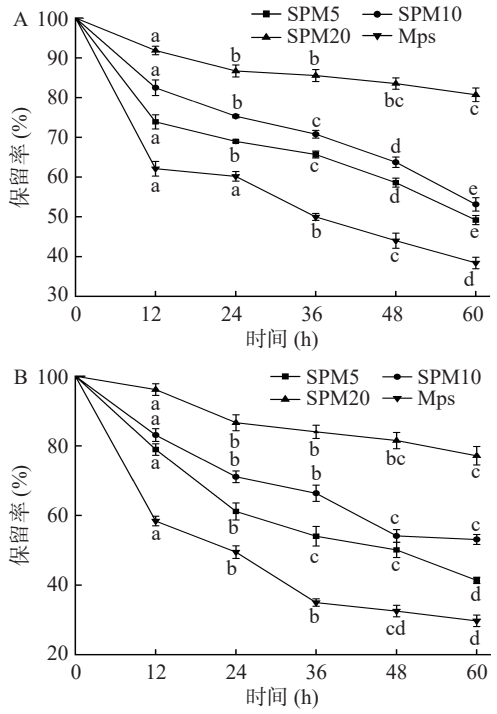


图 8　不同光照条件下 Mps 和 SPM 中 Mps 保留率

Fig.8　Mps retention rate in Mps and SPM under different lighting conditions

注：A 为 385 nm 吸光度，B 为 410 nm 吸光度；SPM 后数字均为 SPM 中 Mps 浓度，mg/mL。

33.83%、71.8%、149.89%。在光照初始阶段，SPM 中 Mps 保留率降低速率高，后随着光照时间延长，Mps 保留率下降速率减缓，可能是起始 Mps 浓度较高，在光照过程中接收到的光量子较多，色素发色团发生光化学反应，破坏了色素本身结构[38]。而后保留率下降趋势减缓，可能是 Mps 与 SPF 发生相互作用，色素稳定性得到提升。

3　结论

本研究借助多重光谱技术解析 SPF 与 Mps 间的互作行为，并对 SPM 中 Mps 的稳定性进行评价。光谱学分析结果表明，Mps 主要通过氢键和疏水相互作用与 SPF 结合，SPF 中 Trp 和 Tyr 残基参与结合过程，Mps 能诱导 SPF 二级结构部分展开，提高 Trp 和 Tyr 残基微环境的疏水性，SPF 与 Mps 复合后，SPM3.0 中其 α-螺旋结构相对含量降低 52.35%，而 β-转角和无规卷曲相对含量上升，随着 SPM 浓度的增加，SPF 中氢键的吸收峰从 3290.28 cm^{-1} 位移至 3282.20 cm^{-1}，平均粒径值下降，ζ 电位绝对值均不超过 40 mV，亦证实 SPF 和 Mps 之间通过非共价结合形成复合物。SPF 与 Mps 复合，可有效减缓 Mps 降解，提高其稳定性。在不同温度、pH 以及光照条件下，SPM 复合物中 Mps 稳定性均优于游离 Mps，4℃、碱性条件下 SPM 中 Mps 保留率较高，光照条件下，SPM 中 Mps 保留率与 SPM 浓度呈正比。本研究结果可为以植物源蛋白原料制作植物基肉制品的色泽改良和质量控制提供借鉴和参考。

© 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] 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.

[2] NISHINARI K, FANG Y, GUO S, et al. Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 301−318.

[3] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂 红曲红: GB 1886.181-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Food additive monascus red: GB 1886.181-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[4] 玛合沙提·努尔江, 包天雨, 张添琪, 等. 红曲色素的生物活性及其作用机制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(6): 347−356. [NUERJIANG Maheshati, BAO Tianyu, ZHANG Tianqi, et al. Advances in research on the biological activity and action mechanism of *Monascus* pigments[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(6): 347−356.]

[5] WU Li, ZHOU Kangxi, CHEN Feng, et al. Comparative study on the antioxidant activity of *Monascus* yellow pigments from two different types of Hongqu-functional Qu and coloring Qu[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 715295.

[6] HSU W H, PAN T M. A novel PPARgamma agonist monascin's potential application in diabetes prevention[J]. Food & Function, 2014, 5(7): 1334−1340.

[7] ZHENG Yunquan, PAN Qisheng, MO Liuda, et al. *Monascus* pigment rubropunctatin derivative FZU-H reduces Aβ(1-42)-induced neurotoxicity in Neuro-2A cells[J]. RSC Advances, 2018, 8(31): 17389.

[8] 许雨晗, 孔宇, 杨本旭, 等. 亚麻籽水溶蛋白与红曲黄色素相互作用及其对色素稳定性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(4): 86−100. [XU Yuhan, KONG Yu, YANG Benxu, et al. Interaction between water-soluble flaxseed protein and *Monascus* yellow pigments and its effect on stability of pigments[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(4): 86−100.]

[9] YANG Chaoran, YU Wei, GAO Boyan, et al. Novel nanoparticle composed by ovalbumin-OSA modified pectin-rutin for improving the stability of *Monascus* pigments[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110467.

[10] CAO Jiarui, LI Fangwei, LI Yuanyuan, et al. Hydrophobic interaction driving the binding of soybean protein isolate and chlorophyll: Improvements to the thermal stability of chlorophyll[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106465.

[11] ALI I, AL-DALALI S, HAO J, et al. The stabilization of *Monascus* pigment by formation of *Monascus* pigment-sodium caseinate complex[J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132480.

[12] HU Ting, DAI Taotao, HE Xuemei, et al. Non-covalent interaction of complex plant protein and betanin: Mechanism of improving thermal stability of betanin[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 138: 108456.

[13] ZHAO Huishuang, MA Zhen, JING Pu. Interaction of soy protein isolate fibrils with betalain from red beetroots: Morphology,

spectroscopic characteristics and thermal stability[J]. Food Research International, 2020, 135: 109289.
[14] 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.
[15] CAO Y P, MEZZENGA R. Food protein amyloid fibrils: Origin, structure, formation, characterization, applications and health implications[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 269: 334−356.
[16] ZHAO Hekai, WANG Shengnan, ZHAO Guilan, et al. Fabrication and emulsifying properties of non-covalent complexes between soy protein isolate fibrils and soy soluble polysaccharides[J]. Food & Function, 2022, 13(1): 386−397.
[17] ARROYO-MAYA I J, CAMPOS-TERÁN J, HERNÁNDEZ-ARANA A, et al. Characterization of flavonoid-protein interactions using fluorescence spectroscopy: Binding of pelargonidin to dairy proteins[J]. Food Chemistry, 2016, 213: 431−439.
[18] BORTOLOTTI A, WONG Y H, KORSHOLM S S, et al. On the purported "backbone fluorescence" in protein three-dimensional fluorescence spectra[J]. RSC Advances, 2016, 6(114): 112870−112876.
[19] OGUTU F O, MU T H. Ultrasonic degradation of sweet potato pectin and its antioxidant activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 726−734.
[20] 郭佳. 红曲橙色素衍生物抑菌活性和光稳定性的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022. [GUO Jia. Study on bacteriostatic activity and light stability of derivatives of orange *Monascus* pigments[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2022.]
[21] BOHRER B M. An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products[J]. Food Science and Human Wellness, 2019, 8(4): 320−329.
[22] LIU Shi, SUN Na, REN Kunyu, et al. Utilization of self-assembled soy protein nanoparticles as carriers for natural pigments: Examining non-interaction mechanisms and stability[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109491.
[23] LIU Hang, ZHANG Yun, ZHANG Junbing, et al. Utilization of protein nanoparticles to improve the dispersibility, stability, and functionality of a natural pigment: Norbixin[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107329.
[24] 黄国, 陈骐, 池云峰, 等. 矢车菊素-3-葡萄糖苷与大豆蛋白相互作用的多重光谱分析及分子对接[J]. 食品科学, 2022, 43(22): 24−33. [HUANG Guo, CHEN Qi, CHI Yunfeng, et al. Multi-spectroscopic analysis of the interaction and molecular docking between cyanidin-3-glucoside and soy protein[J]. Food Science, 2022, 43(22): 24−33.]
[25] YAN Shizhang, XIE Fengying, ZHANG Shuang, et al. Effects of soybean protein isolate-polyphenol conjugate formation on the protein structure and emulsifying properties: Protein-polyphenol emulsification performance in the presence of chitosan[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 609: 125641.
[26] LAKOWICZ J R, MASTERS B R. Principles of fluorescence spectroscopy, third edition[J]. Journal of Biomedical Optics, 2008, 13(2): 029901.
[27] XU Zejian, HAO Nairong, LI Lianwei, et al. Valorization of soy whey wastewater: How epigallocatechin-3-gallate regulates protein precipitation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(18): 15504−15513.
[28] 刘畅, 吴丹丹, 王宁, 等. 基于二维相关红外光谱对 pH 值影响大豆分离蛋白二级结构含量的快速分析[J]. 食品科学, 2024, 45(17): 26−34. [LIU Chang, WU Dandan, WANG Ning, et al. Two-dimensional correlation infrared spectroscopy for rapid analysis of the effect of pH on the secondary structure content of soybean protein isolate[J]. Food Science, 2024, 45(17): 26−34.]
[29] 李汴生, 曾庆孝, 彭志英, 等. 高压处理后大豆分离蛋白溶解性和流变特性的变化及其机理[J]. 高压物理学报, 1999, 13(1): 22−29. [LI Biansheng, ZENG Qingxiao, PENG Zhiying, et al. Changes of solubility and rheological property of the isolated soybean protein after high pressure treatment and its mechanism[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(1): 22−29.]
[30] DAI T T, CHEN J, MCCLEMENTS D J, et al. Protein-polyphenol interactions enhance the antioxidant capacity of phenolics: Analysis of rice glutelin-procyanidin dimer interactions[J]. Food & Function, 2019, 10(2): 765−774.
[31] LANG Yuxi, GAO Haiyan, TIAN Jinlong, et al. Protective effects of *α*-casein or *β*-casein on the stability and antioxidant capacity of blueberry anthocyanins and their interaction mechanism[J]. LWT, 2019, 115: 108434.
[32] JIN Bei, ZHOU Xiaosong, LIU Yuan, et al. Physicochemical stability and antioxidant activity of soy protein/pectin/tea polyphenol ternary nanoparticles obtained by photocatalysis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116: 1−7.
[33] SU Jiaqi, GUO Qing, CHEN Yulu, et al. Utilization of *β*-lactoglobulin-(−)-Epigallocatechin-3-gallate(EGCG) composite colloidal nanoparticles as stabilizers for lutein Pickering emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105293.
[34] HUANG Yu, LI Aijun, QIU Chaoying, et al. Self-assembled colloidal complexes of polyphenol-gelatin and their stabilizing effects on emulsions[J]. Food & Function, 2017, 8(9): 3145−3154.
[35] 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.
[36] GAMAGE G C V, CHOO W S. Thermal and pH stability of natural anthocyanin colourant preparations from black goji berry[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100236.
[37] 高嘉欣. 红曲橙色素氨基酸衍生物的光稳定性初步评价[D]. 天津: 天津科技大学, 2020. [GAO Jiaxin. Preliminary evaluation of photostability of amino acid derivatives of *Monascus* orange pigment[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020.]
[38] 陈贝贝. 提高红曲米光稳定性的初步研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019. [CHEN Beibei. Preliminary study on improving the light stability of red yeast rice[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2019.]