DOI:10.12441/spyswjs.20260113002 [文章编号] 1673-1689(2026)03-0080-09

# 黑木耳蛋白质-多糖复合体系构建负载白藜芦醇的Pickering乳液及特性分析

冯 嫣 李慧杰 王 莉

(吕梁学院生物与食品工程系,山西 吕梁 033001)

**摘要:【目的】**以黑木耳(*Auricularia auricula*)为原料制备黑木耳蛋白质-多糖复合物(APPC),以此为基础制备负载白藜芦醇的Pickering乳液并对其进行结构表征,探究APPC负载白藜芦醇的Pickering乳液的稳定性及作用机制。**【方法】**采用水提醇沉法制备APPC,并对其组成和结构进行分析;进一步制备负载白藜芦醇的Pickering乳液,通过测定Zeta电位、三相接触角、流变特性及粒径等指标,探究该乳液的稳定性及作用机制。**【结果】**APPC具有独特的球-链结构且界面稳定性较强。以APPC制备的白藜芦醇Pickering乳液可形成稳定的蛋白质-多糖三维网络结构,因此该乳液具有界面膜增强和空间位阻协同稳定机制,且表现出良好的pH稳定性、热稳定性和贮存稳定性。**【结论】**APPC可通过界面膜增强和空间位阻效应抑制液滴聚集,提高Pickering乳液的稳定性。该研究可为天然多糖类Pickering乳化稳定剂的开发与应用提供参考。

**关键词:**黑木耳;蛋白质-多糖复合体系;Pickering乳液;白藜芦醇

# Construction and Characterization of Resveratrol-loaded Pickering Emulsions Based on *Auricularia auricula* Protein-polysaccharide Complex

*FENG Yan LI Huijie WANG Li*

(Department of Biological and Food Engineering, Lyuliang University, Lyuliang 033001, China)

**Abstract:** [**Objective**] The present study prepared the *Auricularia auricula* protein-polysaccharide complex (APPC) with *Auricularia auricula* as the raw material and then prepared and characterized resveratrol-loaded Pickering emulsions based on APPC, aiming to investigate the stability and functioning mechanisms of resveratrol-loaded Pickering emulsions based on APPC. [**Method**] APPC was obtained *via* the water extraction and alcohol precipitation method, and its composition and structure were systematically analyzed. Furthermore, resveratrol-loaded Pickering emulsions were fabricated. The stability and functioning mechanisms of the emulsions were investigated based on the Zeta potential, three-phase contact angle, rheological properties, and particle size distribution. [**Result**] APPC possessed a unique sphere-chain structure with high interfacial stability. The resveratrol-loaded Pickering emulsions based on APPC exhibited a stable 3D network structure formed by proteins and polysaccharides. Therefore, the emulsions showed a synergistic stabilization mechanism of enhanced interfacial film and steric hindrance, with favorable pH stability, thermal stability, and storage stability. [**Conclusion**] APPC stabilizes Pickering emulsions through interfacial film reinforcement and steric hindrance effects. This study can provide a reference for the development and application of polysaccharide-based Pickering emulsions as stabilizers.

**Keywords:** *Auricularia auricula*; protein-polysaccharide complex; Pickering emulsion; resveratrol

---

**基金项目:**山西省基础研究计划自然科学研究青年项目(202303021212283)。

**通信作者:**冯嫣(1986—),女,硕士,副教授,硕士研究生导师,主要从事功能性活性成分研究。E-mail:422644129@qq.com

**收稿日期:**2026-01-13 **修回日期:**2026-03-04

白藜芦醇是一种非黄酮类天然多酚化合物[1]，具有抗炎、诱导癌细胞凋亡、保护神经、清除自由基以及改善缺血性损伤等多种药理活性[2]。由于分子间氢键作用力较强，白藜芦醇在纯水中的溶解度仅为0.03 g/L，且自身稳定性较差，极大限制了其在功能食品领域的应用。

黑木耳（*Auricularia auricula*）是一种富含多糖、蛋白质、黑色素、微量元素的可食用菌[3]。其中，黑木耳多糖具有降血糖、降血脂、抗菌、抗辐射、抗氧化等多种生物活性。刘楠楠[4]采用水提醇沉法提取黑木耳多糖，并证实其具有显著的降血糖作用。李雪等[5]制备磷酸化黑木耳多糖脂质体，并验证了其具有体外抗氧化能力。黑木耳蛋白质则具有免疫调节功能和抗病毒潜力。已有研究表明，当单一多糖作为乳液稳定剂时，因界面保护作用较弱，易导致乳液货架期缩短[6]；而当单一蛋白质作为乳液稳定剂时，两相界面相互作用会引发乳液结构展开、重排与脱附，造成油相析出，乳液稳态结构崩塌[7]。黑木耳蛋白质与多糖可通过非共价相互作用形成稳定复合物，较强的静电相互作用能够暴露疏水基团、提高表面活性，赋予复合物良好的稳定性，在食品加工中可作为乳化剂应用。因此黑木耳蛋白质与多糖复合形成的物质具有良好的生物相容性，可有效负载和保护疏水性物质[8]。

Pickering乳液是一类以固体颗粒替代传统表面活性剂的新型乳液体系[9]，具有无表面活性剂、毒性低、抗聚结、稳定性强等优势[10]。传统Pickering乳液常利用无机粒子、有机合成粒子等非食品级胶体颗粒作为乳化稳定剂，存在一定的食品安全隐患[11]。杨丽等[12]通过构建岩藻多糖修饰的小麦醇溶蛋白纳米载体系统，成功实现了紫檀芪的高效包封，为开发疏水性活性成分的纳米递送体系提供了参考。白海娜等[13]通过考察白藜芦醇与黑木耳多糖复合体系的$ABTS^+$自由基清除能力，证实两者之间存在显著的协同抗氧化效应。李庆伟等[14]系统综述了黑木耳多糖的提取方法、分子结构、保健功能等，为黑木耳多糖的基本性质和药理作用研究提供了理论支撑。Wu等[15]研究发现，黑木耳富含膳食纤维，其水提取物具有高黏度特性，可有效抑制$\alpha$-淀粉酶活性，对调节餐后血糖水平具有积极作用。基于此，作者以高稳定性、高安全性的黑木耳蛋白质-多糖复合物为固体乳化颗粒，探究该复合物对油相白藜芦醇的保护效果，以及乳液的稳定性与作用机制，为天然多糖类Pickering乳化稳定剂的开发与应用提供理论参考。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与试剂

中链甘油三酯：广州瑞林生物科技有限公司；白藜芦醇、考马斯亮蓝G250：上海源叶生物科技有限公司；无水乙醇、溴化钾：天津市致远化学试剂有限公司；尼罗蓝染色剂：山东科源生化有限公司；尼罗红染色剂：上海士峰生物科技有限公司。

### 1.2　仪器与设备

全自动酶标仪：Sepctramaxi3X型，美国Molecular Devices公司；磁力搅拌器：85-1型，常州国华电器有限公司；高速冷冻离心机：HC-3018R型，安徽中科中佳科学仪器有限公司；真空冷冻干燥机：SCINTZ-10YD/A型，宁波新芝冻干设备有限公司；流变仪：RH-10型，美国TA仪器公司；高剪切均质乳化机：HR-500D型，上海沪析实业有限公司；光学显微镜：DM2700P型，北京顺能电子仪器有限公司；旋转蒸发仪：RE-52AA型，上海亚荣生化仪器厂；超声波清洗仪：LC-MUC-300型，上海力承西仪器科技有限公司；荧光光谱仪：FL970型，上海天美科学仪器有限公司；激光共聚焦显微镜（CLSM）：TCS SP8型，德国徕卡有限公司；激光粒度分析仪：Nano-ZS型，英国Malvern公司；傅里叶红外光谱（FTIR）仪：FTIR-850型，天津港东科技发展股份有限公司；多功能粉碎机：800A型，永康市红太阳机电有限公司；视频光学接触角测量仪：DSA100型，美国科诺公司。

### 1.3　APPC的制备

将干燥的黑木耳去除杂质、粉碎后过60目筛，按料液比1 g∶30 mL配制黑木耳与蒸馏水的混合液。于90 ℃水浴加热2 h，离心后取上清液，取滤渣进行重复浸提，将合并后的滤液浓缩至原体积的1/4，随后进行乙醇沉淀处理，冷冻干燥后得到APPC。

### 1.4　APPC理化特性测定

#### 1.4.1　基本成分测定

以葡萄糖为标准品，采用苯酚-硫酸法测定样

品中多糖质量分数[15]。以牛血清白蛋白为标准品，采用考马斯亮蓝G250法测定样品中蛋白质质量分数[16]。采用加热干燥法测定样品中水分质量分数[17]。采用干灰化法测定样品中灰分质量分数[17]。

1.4.2 FTIR检测

取1 mg磨碎的APPC冻干粉，与100 mg溴化钾粉末充分研磨后压片。先采集背景光谱，再将样品放入仪器中采集光谱数据[18]。检测范围为4 000~400 $cm^{-1}$，分辨率为2 $cm^{-1}$。

### 1.5 APPC的微观形貌与结构表征

1.5.1 冷冻扫描电镜(Cryo-SEM)观察

取0.2 g APPC，加入20 mL去离子水，于60 ℃通过磁力搅拌器充分溶解。将新制备的溶液置于液氮中快速冷冻，制备超薄切片，随后将切片升温至−90 ℃，冷冻干燥处理20 min。将干燥后的样品表面喷涂10 nm厚金箔，在10.0 kV的加速电压下观察并采集图像[19]。

1.5.2 荧光光谱(FL)测定

为研究APPC的内源荧光，将APPC溶于去离子水中，调节溶液pH至7.0~12.0，采用对应pH的去离子水将样品稀释为0.05 mg/mL。最后将样品置于F-7000荧光光谱仪下于25 ℃扫描得到荧光谱线[16]。设置激发波长为280 nm，发射波长为300~450 nm。

1.5.3 Zeta电位测定

将APPC溶于去离子水中，调节溶液pH至2.0~12.0，采用对应pH的去离子水将样品稀释为1 mg/mL。在25 ℃下，用马尔文电位仪测定APPC溶液的Zeta电位，每组样品重复测定3次[19]。

1.5.4 三相接触角(TPCA)测定

将APPC溶液的pH分别调至3.0、5.0、7.0、9.0，冷冻干燥后获得不同pH处理的冻干粉，将冻干粉压制成圆饼状样品。将样品浸泡在花生油中20 min，采用微量注射器精确量取2 μL去离子水，均匀滴加于圆饼样品表面，立即采集图像，计算样品的TPCA[19]。

### 1.6 负载白藜芦醇的Pickering乳液的制备

1.6.1 白藜芦醇油相制备

采用体积分数90%中链甘油三酯与体积分数10%无水乙醇复配的混合溶剂体系，配制5 mg/mL的白藜芦醇溶液。在避光条件下用高剪切均质乳化机均质3 min，使白藜芦醇充分溶解。

1.6.2 负载白藜芦醇的Pickering乳液的制备

将1.6.1中制备的白藜芦醇油相溶液与APPC水溶液(1.5 mg/mL)按体积比3∶7混合，采用高剪切均质乳化机，以10 000 *g*转速均质5 min，制得负载白藜芦醇的Pickering乳液[20-21]。

1.6.3 乳液中白藜芦醇包埋率的测定

取适量负载白藜芦醇的乳液置于离心管中，于4 ℃、10 000 *g*离心30 min，收集下层清液，在306 nm测定白藜芦醇的吸光度。依据白藜芦醇的标准曲线($y$=0.030 3$x$+0.227 1，$R^2$=0.997 7)计算游离白藜芦醇质量浓度[21]。白藜芦醇包埋率按式(1)计算。

$$\eta=\frac{A-B}{A} \tag{1}$$

式中：

$\eta$——白藜芦醇包埋率，%；

$A$——白藜芦醇质量浓度，μg/mL；

$B$——游离白藜芦醇质量浓度，μg/mL。

### 1.7 乳液流变学测定

采用RH-10流变仪测定Pickering乳液的流变学性质[19]。设定好测量参数后，用胶头滴管取5 mL新制备的乳液滴到载物台上，测定温度恒定在25 ℃，GAP间隙设定为1 mm[22]。

### 1.8 乳液粒径测定

将新制备的乳液分散于一定量的超纯水中，采用激光粒度分析仪在适宜折光率参数下对乳液体系进行粒径表征，得到粒径分布图，同步采集平均粒径[19]。

### 1.9 乳液的微观形貌表征

1.9.1 光学显微镜观察

将光学显微镜置于平稳、无阳光直射的试验台面上，用移液枪移取50 μL新制备的乳液，迅速滴到载玻片表面并用盖玻片盖好。调节显微镜至图像清晰，观察乳液微观形貌并拍照记录。

1.9.2 CLSM观察

以乙醇为溶剂，分别配制0.1 mg/mL的尼罗蓝染液和尼罗红染液，用锡箔纸包裹避光，置于冰箱冷藏保存。取1 mL新制备的Pickering乳液置于避光试管中，分别加入40 μL尼罗红染液和尼罗蓝染液，振荡混匀，置于冰箱避光反应15 min。吸取少量混合液滴于载玻片上，在激发波长为552 nm和633 nm下进行拍摄，获得CLSM图[21]。

### 1.10　乳液稳定性测定

#### 1.10.1　pH稳定性

取等体积乳液，分别调节pH至3.0、5.0、7.0、9.0，室温静置5 h。采用相同pH的超纯水将乳液稀释1 000倍，测定各乳液的平均粒径，分析乳液的pH稳定性[18]。

#### 1.10.2　热稳定性

将乳液分别置于50 ℃和90 ℃水浴锅中加热10 min，用超纯水将乳液稀释1 000倍后测定各乳液的平均粒径，分析乳液的热稳定性[18]。

#### 1.10.3　贮存稳定性

将乳液置于4 ℃贮存15 d，观察乳液是否出现分层或油滴析出现象，再看乳液能否通过倒置试验[21]。

### 1.11　数据分析

所有试验均重复测定3次，结果以平均值±标准差表示。采用SPSS软件进行数据分析，采用Duncan多重比较进行显著性分析，$P<0.05$表示差异显著。采用Origin 2021软件绘图。

## 2　结果与讨论

### 2.1　APPC的基本成分结果

APPC基本成分检测结果表明，样品中蛋白质质量分数为21.7%，多糖质量分数为65.1%，水分质量分数为3.9%，灰分质量分数为2.8%。

### 2.2　FTIR结果

APPC的FTIR结果见图1。在3 389.7 $cm^{-1}$附近出现的宽吸收峰归属于N—H伸缩振动，是蛋白质结构中氢键的特征吸收峰[22]；2 921.5 $cm^{-1}$处的吸收峰对应C—H伸缩振动[23]；1 645.2 $cm^{-1}$处的吸收峰为蛋白质C=O伸缩振动[24]；1 537.5 $cm^{-1}$处的吸收峰为苯环的特征吸收峰[25]；1 367.6 $cm^{-1}$和1 243.3 $cm^{-1}$处的吸收峰为糖类C—H变角振动所致[26]；1 048.6 $cm^{-1}$处的吸收峰归属于C—O—C伸缩振动，为呋喃糖的特征吸收峰[27]。综上，APPC的FTIR结果同时出现了多糖与蛋白质的特征吸收峰，证实经水提醇沉法制备的黑木耳提取物为黑木耳蛋白质-多糖复合物。

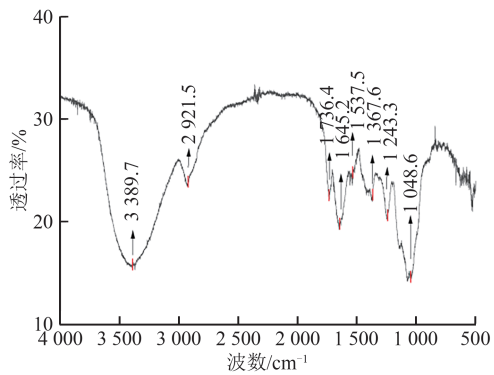



图1　FTIR结果

Fig. 1　FTIR results

### 2.3　APPC的微观形貌与结构表征结果

#### 2.3.1　Cryo-SEM结果

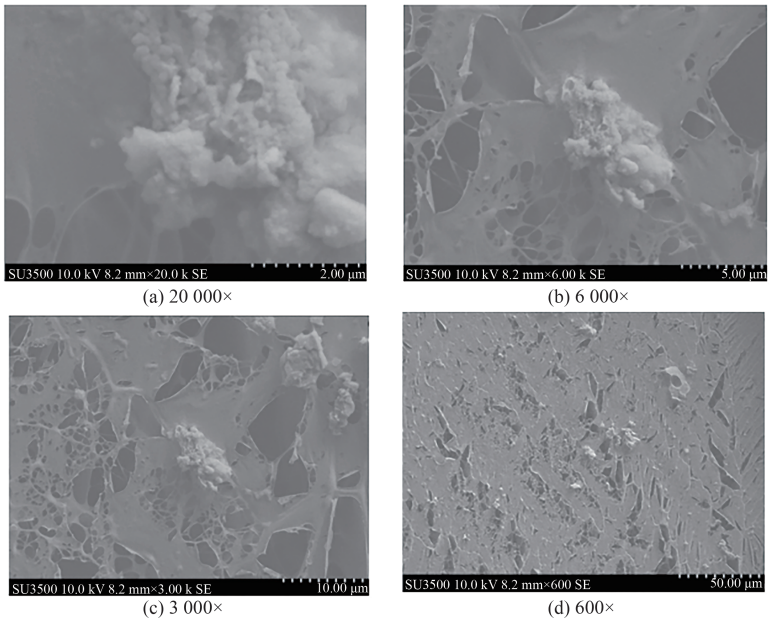
APPC的Cryo-SEM结果见图2。高倍视野下可观察到样品呈絮状团聚结构，主体颗粒直径为1.5~2.0 μm，表面凹凸不平且具有多孔结构，见图2(a)。中倍视野下可观测到多孔网络结构，孔径分布在1.0~10.0 μm，符合溶胶-凝胶转变特征，见图2(b)~(c)。部分纤维末端锚定于孔壁结构，表明样品表层结构由内部纤维网络延伸构建而成。低倍视野下样品整体呈海绵状多孔结构，大孔(>10.0 μm)与小孔(<1.0 μm)共存，这可能与APPC的高持水性相关，见图2(d)。

#### 2.3.2　FL结果

芳香族氨基酸能够在280 nm激发波长下产生内源荧光[17]。作者通过FL对不同pH处理的APPC样品进行结构表征，见图3。在280 nm激发波长下，不同pH处理的样品均在350 nm处出现特征荧光发射峰。随着溶液pH升高，相对荧光强度呈先增强后减弱的趋势。当pH为7.0~8.0时，APPC因发生质子化与聚集行为，破坏了分子间的静电相互作用，使得相对荧光强度增强；当pH>9.0时，分子发生去质子化并引发电子转移，荧光光谱发生红移，APPC所处的微环境极性增强，亲水性提高。pH升高诱导的荧光强度变化，表明APPC分子构象逐渐展开。这种构象变化可暴露更多潜在的白藜芦醇结合位点，有利于负载更多的白藜芦醇分子，为其稳定包埋白藜芦醇提供了结构基础。

#### 2.3.3　Zeta电位结果

Gref等[28]研究发现，Zeta电位的绝对值越高，体系静电相互作用越强，溶液稳定性越好。不同pH条件下APPC溶液的Zeta电位均为负值，这是由于多糖带有负电荷，或其分子结构中含有可在水中解离出负电荷的基团，见图4。当pH>6.0时，溶液的Zeta电位绝对值接近20，此时多糖溶液稳定性较好；当pH<6.0时，溶液的Zeta电位绝对值随pH降低呈下降趋势，在pH为4.0时降至10 mV以下，表明此时APPC溶液稳定性显著降低[21]。




(a) 20 000×　(b) 6 000×

(c) 3 000×　(d) 600×

图 2　Cryo-SEM 结果

Fig. 2　Cryo-SEM results

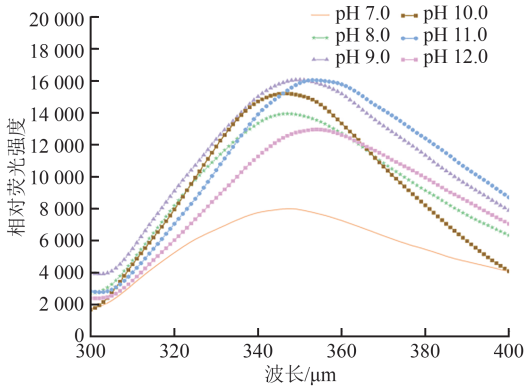
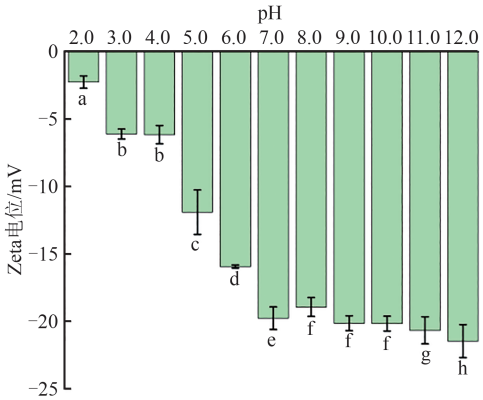



图 3　APPC 在不同 pH 下的相对荧光强度

Fig. 3　Relative fluorescence intensity of APPC at different pH levels



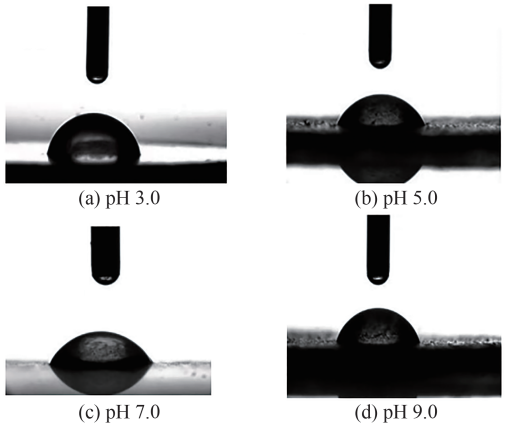

不同字母表示差异显著（$P$<0.05）。

图 4　APPC 在不同 pH 下的 Zeta 电位

Fig. 4　Zeta potential of APPC at different pH levels

### 2.3.4　TPCA 结果

如图 5 所示，随着 pH 的升高，APPC 的 TPCA 呈现先升高后降低的趋势。酸性条件下，蛋白质发生质子化，导致分子收缩、接触角增大；而分子间氢键网络增强又会使接触角减小。两者共同作用导致 TPCA 呈现规律性变化，该现象可能与 APPC 中多糖质量分数较高有关。当 pH 为 7.0 时，APPC 的 TPCA 为 57.26°，此时的界面稳定性较高。



(a) pH 3.0　(b) pH 5.0

(c) pH 7.0　(d) pH 9.0

图 5　TPCA 结果

Fig. 5　TPCA results

## 2.4　APPC 负载白藜芦醇的 Pickering 乳液性质

### 2.4.1　乳液中白藜芦醇包埋率及流变学结果

研究结果表明，乳液中白藜芦醇包埋率为

75.4%。从图6可以看出，随着角频率的升高，乳液的储能模量（$G'$）与损耗模量（$G''$）呈现出不同的变化规律，表明Pickering乳液表现出不同的黏弹性[29]。在角频率逐渐升高的过程中，$G''>G'$；当角频率达到62 rad/s时，$G'$和$G''$曲线出现交点，该交点为体系的凝胶点，标志着乳液从液体状态过渡至弹性主导的弱凝胶状态[28]。这些结果表明，液滴间非共价相互作用增强，局部形成了弱凝胶网络。

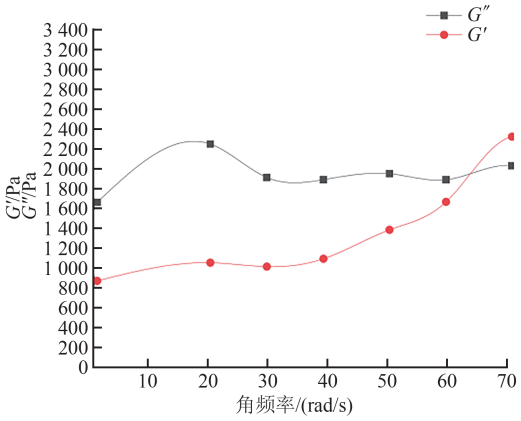



图6　乳液的流变学结果

Fig. 6　Rheological results of emulsions

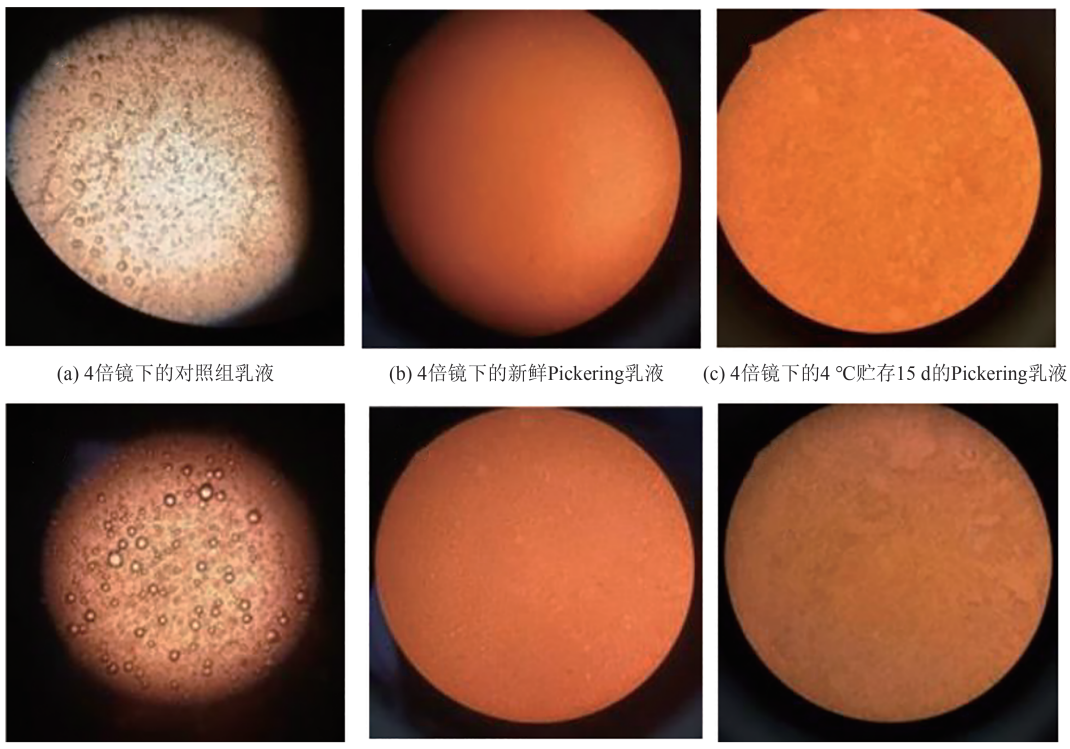
2.4.2　乳液粒径结果

激光粒度分析仪结果显示，该乳液粒径分布范围为0.100~1.000 μm，平均粒径为0.671 μm，多分散指数为0.76。整体来看，制备的乳液粒径较小且分布均匀，具备良好的稳定性。

## 2.5　乳液的微观形貌结果

### 2.5.1　光学显微镜结果

乳液的光学显微镜结果见图7。其中，对照组乳液的液滴分布不均匀，大量小液滴发生聚集，乳液稳定性较差。新鲜Pickering乳液的液滴分布均匀、结构致密、轮廓清晰，形成了致密的油包水的三维网络结构。贮存15 d的Pickering乳液部分液滴颗粒发生聚集、液滴增大，分布状况略有变化，但整体仍保持相对稳定的状态。贮存15 d的Pickering乳液液滴增大，可能是由于乳液液滴大小与其内部液滴相互挤压程度有关。挤压程度越强，单个液滴体积越小，乳液性能更优，长时间放置后，乳液液滴受到的挤压程度减小，部分小液滴汇聚成大液滴，而其他液滴未出现明显的聚集现象，进一步证明乳液状态较稳定。



(a) 4倍镜下的对照组乳液　(b) 4倍镜下的新鲜Pickering乳液　(c) 4倍镜下的4 ℃贮存15 d的Pickering乳液

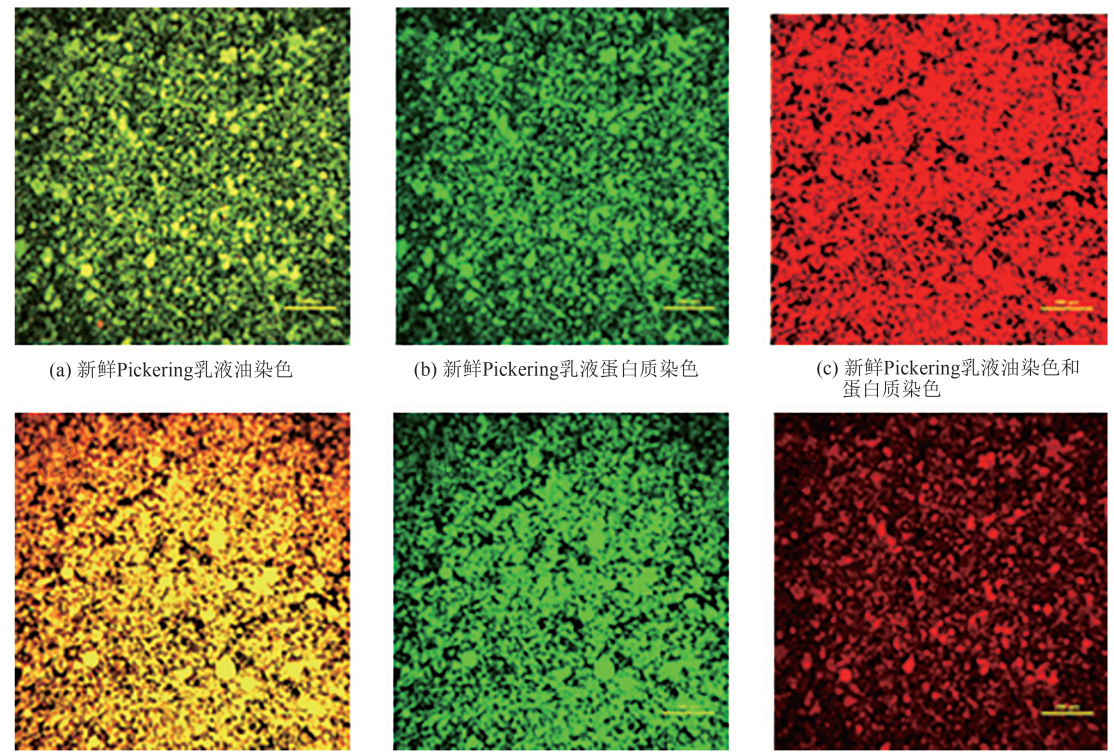
(d) 10倍镜下的对照组乳液　(e) 10倍镜下的新鲜Pickering乳液　(f) 10倍镜下的4 ℃贮存15 d的Pickering乳液

图7　光学显微镜结果

Fig. 7　Optical microscopy results

### 2.5.2 CLSM 结果

由图 8 可以看出，新鲜 Pickering 乳液的油水界面形成了较为完整的界面膜，可有效抑制油滴上浮；油滴之间相互挤压，呈现出不规则的多边形结构。APPC 可吸附于油滴表面，表明 APPC 可构筑稳定的油水界面，对乳液体系起到良好的稳定作用。Pickering 乳液在 4 ℃贮存 15 d 后，少量小液滴发生絮凝，出现较大的颗粒，这可能是由于乳液体系空间位阻下降、静电斥力减弱导致的。但体系中大多数小液滴仍保持独立分散状态，界面膜维持较为完整的形态，证实该乳液的贮存稳定性较好。



(a) 新鲜Pickering乳液油染色　(b) 新鲜Pickering乳液蛋白质染色　(c) 新鲜Pickering乳液油染色和蛋白质染色

(d) 4 ℃贮存15 d的Pickering乳液油染色　(e) 4 ℃贮存15 d的Pickering乳液蛋白质染色　(f) 4 ℃贮存15 d的Pickering乳液油染色和蛋白质染色

标尺均为 200 μm。

图 8　CLSM 结果

Fig. 8　CLSM results

## 2.6　乳液稳定性结果

### 2.6.1 pH 稳定性结果

由图 9 可知，当 pH 为 3.0~7.0 时，随着 pH 的升高，乳液平均粒径逐渐增大。这可能是由于体系 pH 接近等电点时，Zeta 电位下降，颗粒间静电斥力减弱；同时低 pH 环境下 APPC 表面基团发生质子化，颗粒疏水性增强。当 pH 为 7.0~9.0 时，乳液平均粒径随 pH 升高逐渐减小，这可能是由于碱性条件下 APPC 表面基团发生去质子化，高分子链段充分伸展，体系空间位阻增强。其中，当 pH 为 7.0 时乳液粒径呈单峰分布，颗粒尺寸均一、比表面积波动较小，可有效保障白藜芦醇的包埋率。

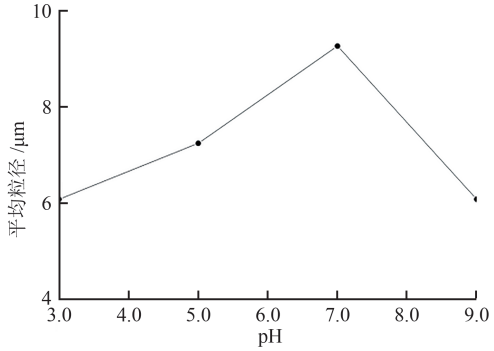



图 9　pH 稳定性结果

Fig. 9　Results of pH stability

### 2.6.2 热稳定性结果

由图 10 可知，热处理对乳液粒径的影响较小。

当温度从50 ℃升至90 ℃时，负载白藜芦醇的Pickering乳液的平均粒径由23.463 μm提高至26.640 μm，仅发生小幅变化。高温条件下仅有极少数小颗粒团聚成大颗粒，乳液整体粒径分布基本保持稳定，表明Pickering乳液的热稳定性较好。

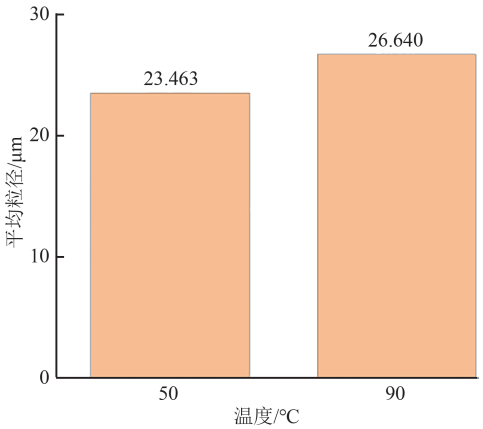
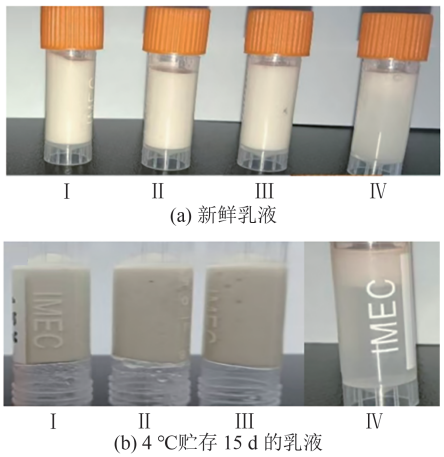



图10　热稳定性结果

Fig. 10　Results of thermal stability

### 2.6.3　贮存稳定性结果

由图11可以看出，乳液贮存15 d后可顺利通过倒置试验，未出现破乳、油滴渗出等现象，且乳液色泽与新鲜Pickering乳液无明显色差；而未添加APPC作为稳定剂的对照组出现明显的分层现象，未通过倒置试验。结果表明，基于APPC负载白藜芦醇的Pickering乳液具有较强的稳定性。




I~III—Pickering乳液；IV—对照组乳液。

图11　贮存稳定性结果

Fig. 11　Results of storage stability

## 3　结论

作者以黑木耳水提醇沉法制备的APPC为稳定剂，将白藜芦醇油相与APPC水溶液按体积比3∶7混合，构建负载白藜芦醇的Pickering乳液，并对其进行表征。结果表明，APPC中蛋白质量分数为21.7%、多糖质量分数为65.1%，具有独特的球-链结构；利用APPC负载白藜芦醇制备的Pickering乳液其蛋白质与多糖可形成稳定的三维网络结构，依靠界面膜增强与空间位阻的协同作用稳定Pickering乳液；Pickering乳液经50、90 ℃分别加热处理10 min后粒径未发生明显变化，4 ℃贮藏15 d后未出现分层现象，表明其具有较高的热稳定性和贮存稳定性；另外，Pickering乳液具有良好的凝胶性。本研究制备的Pickering乳液可用于功能性饮品、酸奶、低脂酱料、人造奶油等产品，亦可作为3D食品打印原料，具有广阔的应用前景。但本研究仅进行了短期稳定性评价，乳液长期贮存稳定性仍有待后续研究。

## 参考文献

[1] 刘战霞，李斌斌，赵月，等. 核桃蛋白/肉苁蓉多糖稳定白藜芦醇Pickering乳液的制备及其稳定性[J]. 食品科学，2024，45(23)：28-34.
LIU Z X，LI B B，ZHAO Y，et al. Preparation and stability of resveratrol-loaded Pickering emulsion stabilized by walnut protein/*Cistanche deserticola* polysaccharide composite nanoparticles[J]. Food Science，2024，45(23)：28-34.(in Chinese)

[2] 田艳杰，石爱民，刘红芝，等. 白藜芦醇的生物活性及其运载体系研究进展[J]. 食品科学，2023，44(1)：371-379.
TIAN Y J，SHI A M，LIU H Z，et al. Progress in research on biological activities and delivery systems of resveratrol [J]. Food Science，2023，44(1)：371-379.(in Chinese)

[3] 卞春. 黑木耳多糖的分离鉴定及抗凝血功能[M]. 北京：化学工业出版社，2022：115-134.

[4] 刘楠楠. 黑木耳多糖的提取纯化、结构表征及降糖活性研究[D]. 西安：陕西科技大学，2022.

[5] 李雪，李琢伟，李爽，等. 磷酸化黑木耳多糖脂质体的表征和抗氧化能力[J]. 食品研究与开发，2023，44(1)：68-75.
LI X，LI Z W，LI S，et al. Characterization and antioxidant capacity of phosphorylated *Auricularia auricula* polysaccharide liposome [J]. Food Research and Development，2023，44(1)：68-75.(in Chinese)

[6] 宗昱丞. 香菇中蛋白-多糖复合物的分离鉴定及其在Pickering乳液中的应用研究[D]. 无锡：江南大学，2022.

[7] LIU F，OU S Y，TANG C H. $Ca^{2+}$-induced soy protein nanoparticles as Pickering stabilizers：fabrication and

characterization [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 65: 175-186.
[8] XIE J, LUO Y J, CHEN Y C, et al. Redispersible Pickering emulsion powder stabilized by nanocrystalline cellulose combining with cellulosic derivatives [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 213: 128-137.
[9] ZHENG Y, WANG Z Q, HUANG Y R, et al. Extraction and preparation of cellulose nanocrystal from Brewer's spent grain and application in Pickering emulsions [J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2024, 31: 100418.
[10] CHEVALIER Y, BOLZINGER M A. Emulsions stabilized with solid nanoparticles: Pickering emulsions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 439: 23-34.
[11] LI Z F, MING T, WANG J F, et al. High internal phase emulsions stabilized solely by microgel particles [J]. Angewandte Chemie, 2009, 48(45): 8490-8493.
[12] 杨丽,许为东,陈晨,等. 负载紫檀芪的岩藻多糖-小麦醇溶蛋白纳米颗粒的制备及体外抗肝癌活性研究[J]. 中国粮油学报,2023,38(12):106-113.
YANG L, XU W D, CHEN C, et al. Preparation and anti-hepatoma activity *in vitro* of pterostilbene loaded with fucoidan-gliadin nanoparticles [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(12): 106-113. (in Chinese)
[13] 白海娜,王振宇,刘瑞海,等. 白藜芦醇与黑木耳多糖协同清除ABTS自由基活性的研究[J]. 现代食品科技,2014,30(3):64-68.
BAI H N, WANG Z Y, LIU R H, et al. Synergistic ABTS radical scavenging activity of resveratrol with *Auricularia auricula*r polysaccharides[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 64-68. (in Chinese)
[14] 李庆伟,周益帆,岳童,等. 黑木耳的功能活性多糖制备及生理活性的研究进展[J]. 分子植物育种,2025,23(1):264-271.
LI Q W, ZHOU Y F, YUE T, et al. Research progress on preparation and physiological activity of functional active polysaccharides from *Auricularia auricula* [J]. Molecular Plant Breeding, 2025, 23(1): 264-271. (in Chinese)
[15] WU N J, CHIOU F J, WENG Y M, et al. *In vitro* hypoglycemic effects of hot water extract from *Auricularia polytricha* (wood ear mushroom) [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2014, 65(4): 502-506.
[16] 张惟杰. 糖复合物生化研究技术[M]. 2版. 杭州:浙江大学出版社,1999:37-76.
[17] 王孝平,邢树礼. 考马斯亮蓝法测定蛋白含量的研究[J]. 天津化工,2009,23(3):40-42.
WANG X P, XING S L. Determination of protein guantitation using the method of coomassie brilliant blue[J]. Tianjin Chemical Industry, 2009, 23(3): 40-42. (in Chinese)
[18] 侯曼玲. 食品分析[M]. 北京:化学工业出版社,2004:41-58.
[19] 王银平. 玉木耳多糖的制备、结构表征及其与乳清蛋白相互作用研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
[20] 肖家伟. 负载白藜芦醇的脂肪结晶颗粒稳定皮克林乳液的构建及其氧化稳定性研究[D]. 广州:华南理工大学,2023.
[21] 石彦国,郭庆启,杨晓婉,等. 大豆蛋白-酪蛋白复合物结构的红外光谱分析[J]. 中国食品学报,2018,18(11):225-231.
SHI Y G, GUO Q Q, YANG X W, et al. FTIR analysis on the structure of soybean-casein protein complex [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(11): 225-231. (in Chinese)
[22] 刘春雷,孙立斌,李相昕,等. 大豆7S和11S蛋白二级结构与表面疏水性相关性的研究[J]. 食品科学,2015,36(17):28-32.
LIU C L, SUN L B, LI X X, et al. Correlation of secondary structures of 7S and 11S soybean proteins and their surface hydrophobicity[J]. Food Science, 2015, 36(17): 28-32. (in Chinese)
[23] ZHANG Y, ZENG Y, MEN Y, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of exopolysaccharides from submerged culture of *Auricularia auricula*-judae [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 978-984.
[24] 程俊文,吴学谦,贺亮,等. 香菇子实体多糖分步酶解法提取研究[J]. 食用菌学报,2009,16(2):67-71.
CHENG J W, WU X Q, HE L, et al. Extraction of polysaccharide from *Lentinula edodes* fruit bodies using stepwise enzymic hydrolysis [J]. Acta Edulis Fungi, 2009, 16(2): 67-71. (in Chinese)
[25] 罗晓莉,张沙沙,严明,等. 云南8种栽培食用菌蛋白质和氨基酸分析及营养价值评价[J]. 食品工业,2021,42(8):328-332.
LUO X L, ZHANG S S, YAN M, et al. Protein and amino acid analysis and nutritional value evaluation of eight cultivation edible fungi in Yunnan Province [J]. The Food Industry, 2021, 42(8): 328-332. (in Chinese)
[26] TORRES M D, HALLMARK B, WILSON D I. Effect of concentration on shear and extensional rheology of guar gum solutions[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 85-95.
[27] WU Y, CUI S W, WU J H, et al. Structure characteristics and rheological properties of acidic polysaccharide from boat-fruited *Sterculia* seeds[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(3): 926-930.
[28] GREF R, LÜCK M, QUELLEC P, et al. 'Stealth' corona-core nanoparticles surface modified by polyethylene glycol (PEG): influences of the corona (PEG chain length and surface density) and of the core composition on phagocytic uptake and plasma protein adsorption [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2000, 18(3/4): 301-313.