DOI:10.12441/spyswjs.20241225001 [文章编号] 1673-1689(2025)12-0043-09

卵白蛋白-羧甲基纤维素钠胶体颗粒对鱼油乳液的保护作用

潘伟春 温 娅 廖华斌 顾斐娜 张秋萍 牛付阁*

(浙江工商大学食品与生物工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要:【目的】研究负载姜黄素的卵白蛋白(OVA)-羧甲基纤维素钠(CMC)(OVA-CMC-Cur)胶体颗粒对鱼油乳液稳定性的影响。**【方法】**通过调控OVA与CMC的质量比和体系pH,制备不同的OVA-CMC-Cur胶体颗粒,并以此为稳定剂构建鱼油乳液,系统分析不同鱼油乳液的结构特征、稳定性及消化行为差异。**【结果】**当OVA与CMC质量比为2∶1时,OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液粒径较小;该颗粒能够在油水界面形成致密紧凑的界面膜,使鱼油乳液液滴分布更均匀。此外,OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液贮存稳定性和抗氧化活性较优,且当OVA与CMC质量比为2∶1时,鱼油乳液在模拟胃肠液中的稳定性得到了显著改善。**【结论】**OVA-CMC-Cur胶体颗粒可显著增强鱼油乳液的稳定性,为其在食品、制药领域的拓展应用提供了理论依据。

关键词:卵白蛋白;羧甲基纤维素钠;姜黄素;鱼油乳液;抗氧化性

Protective Effects of Ovalbumin-Sodium Carboxymethylcellulose Colloidal Particles on Fish Oil Emulsions

*PAN Weichun WEN Ya LIAO Huabin GU Feina ZHANG Qiuping NIU Fuge**

(School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to investigate the impact of curcumin-loaded ovalbumin (OVA)-carboxymethylcellulose (CMC) (OVA-CMC-Cur) colloidal particles on the stability of fish oil emulsions. [**Method**] The OVA-CMC-Cur colloidal particles were prepared with OVA and CMC at varying mass ratios and pH. The colloidal particles were then used as the stabilizer to prepare fish oil emulsions. The structural characteristics, stability, and digestive behaviors of the emulsions were investigated. [**Result**] At the OVA-CMC mass ratio of 2∶1, the OVA-CMC-Cur particle-stabilized fish oil emulsions exhibited smaller particle sizes. These particles formed a dense, compact interfacial film at the oil-water interface, resulting in more uniform emulsion droplets. Furthermore, the OVA-CMC-Cur particle-stabilized fish oil emulsions demonstrated enhanced storage stability and antioxidant activity. Notably, when the OVA-CMC mass ratio was 2∶1, the fish oil emulsions exhibited significantly improved stability in simulated gastrointestinal fluids. [**Conclusion**] OVA-CMC-Cur colloidal particles significantly enhance the stability of fish oil emulsions, which provides a theoretical basis for their applications in the food and pharmaceutical fields.

Keywords: ovalbumin; sodium carboxymethylcellulose; curcumin; fish oil emulsion; antioxidant property

鱼油中富含ω-3脂肪酸,尤其是二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)[1]。DHA是婴儿生长发育所需的必需营养素,在大脑与视网膜的发育中发挥着至关重要的作用[2-3]。但人体自身

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31171713);国家自然科学基金青年基金项目(31701650)。

通信作者:牛付阁(1983—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事禽蛋制品研究与开发。E-mail:niufg123@hotmail.com

收稿日期:2024-12-25 **修回日期:**2025-02-18

无法合成多不饱和脂肪酸[4]，且DHA主要来源于海洋鱼类，难以通过日常膳食足量获取[5]；另外，DHA分子中含有丰富的不饱和双键，对氧气、光照和温度极为敏感，这导致鱼油易发生氧化并丧失其生理功能与营养价值[6]。因此，开发稳定且高效的DHA递送体系对拓展DHA在食品领域的应用具有重要意义。

近年来，乳液体系凭借其优良的载体性能在食品和制药领域得到了广泛应用。但乳液属于热力学不稳定体系，通常需要借助表面活性剂降低界面张力以维持其稳定性[7]。蛋白质是食品工业中常用的乳化剂与稳定剂[8]，其中OVA作为蛋清蛋白的主要成分，具有良好的乳化性和发泡性，且安全性高，是制备Pickering稳定剂的理想选择。然而，单一蛋白质的乳化效果有限，在其等电点附近易聚集和絮凝[9-10]。CMC作为一种优良的稳定剂，可通过静电相互作用提升OVA在油水界面的吸附能力和稳定性，但OVA与CMC形成的复合凝聚物对pH、盐浓度等环境胁迫较为敏感，导致OVA与CMC易发生解离，从而降低乳液的稳定性[11]。为提高界面吸附的蛋白质与多糖的稳定性，研究者常采用交联剂对其进行化学或酶法交联固化，可显著增强乳液界面膜对外界环境的耐受能力[12]。化学交联剂存在一定的安全隐患，酶交联剂则对反应条件要求较高且成本较高。相比之下，适度加热处理（温度高于蛋白质变性温度）可促进蛋白质与多糖分子进一步交联，形成稳定的胶体颗粒[13]，进而改善颗粒在乳液界面的吸附能力[14]，该方法具有显著的优势与广阔的应用前景。Gu等[15]利用儿茶素、葡聚糖、蛋清蛋白制备双功能抗氧化乳化剂，证实蛋白质-多糖-多酚偶联物具备作为新型表面活性抗氧化剂的潜力，可有效改善乳液类食品的物理化学稳定性。姜黄素是从天然植物姜黄根茎中提取的多酚类化合物，可通过改变蛋白质与多糖结构、界面性质及抗氧化活性来调控复合物乳液的氧化稳定性。若负载姜黄素的蛋白质/多糖胶体颗粒既能起到隔绝防护作用，又具备抗氧化功能，则有望提高鱼油乳液的稳定性。

因此，作者以OVA-CMC-Cur胶体颗粒为乳化剂，构建鱼油乳液递送体系，系统分析OVA-CMC-Cur在鱼油乳液界面的吸附行为和鱼油稳定性，为构建DHA高效递送载体提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

OVA（纯度≥90%）、CMC（平均相对分子质量2.5×10^5，取代度0.9）：国药集团化学试剂有限公司；姜黄素（纯度≥94%）、DHA甲酯标准品（纯度≥90%）、胰脂肪酶（100~500 U/mg）：美国Sigma公司；鱼油：上海鼓臣生物技术有限公司；磷酸氢二钠、氯化钙、氢氧化钾等：均为分析纯，西陇化工股份有限公司。

1.2 仪器与设备

扩散波光谱仪（DWS）：DWS-RheoLab型，瑞士LS公司；台式高速离心机：ROTINA-380R型，德国Hettich公司；Zeta电位仪：Nano-ZS型，英国Malvern公司；高效液相色谱仪：LC20A型，日本岛津公司；电子分析天平：ME-204E型，美国Mettler Toledo公司；偏光显微镜：BM2100POL型，江南仪器股份有限公司；pH计：FE20型，美国Mettler Toledo公司；超纯水仪：Millipore-Q型，美国Millipore有限公司；旋涡振荡混合器：Vortex-2型，上海沪析仪器公司；循环水多用真空泵：SHB-III型，菏泽市鑫源仪器仪表有限公司。

1.3 方法

1.3.1 OVA-CMC胶体颗粒的制备

将含有一定量CMC的溶液于60 ℃加热并温和搅拌6 h，冷却至室温，加入适量OVA，使体系中的OVA质量浓度达到0.6 mg/mL，且OVA与CMC质量比分别调为1∶2、1∶1、2∶1。随后用盐酸溶液调节体系的pH，其中OVA与CMC质量比1∶2、1∶1、2∶1时对应的pH梯度分别设置为4.4、4.0、3.8，4.4、4.1、3.9与4.8、4.4、4.2。将上述体系在80 ℃下加热30 min，制备得到不同的OVA-CMC胶体颗粒溶液，冷却后备用。

1.3.2 OVA-CMC-Cur胶体颗粒的制备

称取一定量的姜黄素，加入乙醇溶液中，于50 ℃搅拌30 min使其充分溶解，用乙醇定容使其质量浓度为1.0 mg/mL。量取10 mL姜黄素乙醇溶液与60 mL OVA-CMC胶体颗粒溶液混合均匀，旋转蒸发去除体系中的乙醇，得到OVA-CMC-Cur胶体颗粒溶液，备用。

1.3.3 OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液的制备

向OVA-CMC-Cur胶体颗粒溶液中加入体积

分数5%的鱼油，搅拌2 min使其充分混合。采用两步乳化法制备乳化液：首先，使用高速分散器，以16 000 r/min的转速处理混合体系6 min；然后，使用超声波细胞破碎仪在810 W功率下超声乳化15 min。制备完成的乳液样品转移至4 ℃冰箱冷藏备用。

1.3.4　鱼油乳液粒径的测定

采用DWS测定鱼油乳液的粒径，仪器设定为背散射模式，测试温度保持在25 ℃。测试前将样品静置1 min，每个样品的单次测试时间为30 s，重复测试5次。

1.3.5　鱼油乳液表面电荷的测定

使用与乳液pH相同的去离子水将鱼油乳液样品稀释500倍，调节仪器测定温度为25 ℃。取适量稀释后的样品装入专用样品池，在样品室中平衡60 s后进行测定，每个样品平行测定3组，每组重复运行12次。

1.3.6　鱼油乳液微观结构的观察

采用偏光显微镜观察鱼油乳液的微观结构。观察前将样品滴加至载玻片上，静置2 min后观察乳液液滴的形态与分布。每个样品观察3个不同区域，同一乳液重复取样3次。

1.3.7　鱼油乳液DWS微流变特性的测定

采用DWS的透射模式测定鱼油乳液的微流变行为，调节仪器测定温度为25 ℃。取适量样品装入专用样品池，在685 nm、45 mW的激光下进行检测。计算场自相关函数和粒子在滞后时间内移动距离平方的平均值（MSD）。乳液的弹性模量（G'）和损耗模量（G''）可由MSD的拉普拉斯变换得到。

样品在测量前先由仪器计算光子传播平均自由程，样品的光子传播平均自由程根据式（1）计算。

$$l^* = l\frac{R_s}{R_r} \tag{1}$$

式中：

l^*——光子传播平均自由程，μm；

l——参考光子传播平均自由程，μm；

R_s——样品的光强，kHz；

R_r——参考样品的光强，kHz。

1.3.8　乳液的体外模拟消化及分析

1）乳液体外模拟消化：取6 mL乳液样品，用pH 7.0的磷酸盐缓冲液（PBS）按体积比1∶5稀释，调节体系pH至7.0。随后依次加入1.0 mL氯化钙溶液（187.5 mmol/L）、5.0 mL胆盐（37.5 mg/mL）及5.0 mL胰脂肪酶溶液（40 mg/mL），用pH 7.0的PBS定容至37.5 mL。将混合体系置于37 ℃恒温水浴中振荡消化2 h。试验过程中持续用0.2 mol/L的NaOH溶液实时调控体系pH，确保酶促反应环境的pH稳定在7.0。

2）消化液中脂质的提取：参照Chen等[16]的方法并稍加修改，取37 mL消化液，加入74 mL正己烷-异丙醇混合液（体积比3∶1），振荡15 min后于10 000 g离心10 min。收集上层有机相转移至试管中，氮吹干燥至恒质量。

3）脂肪酸的甲酯化：参照Chen等[16]的方法，取70 mg油脂样品，置于10 mL带盖离心管中。加入2 mL乙醚-正己烷混合液（体积比2∶1），充分振荡后静置15 min。再加入2 mL 0.8 mol/L氢氧化钾甲醇溶液，摇匀后置于60 ℃恒温水浴中反应15 min。反应结束后，沿管壁缓慢加入蒸馏水至10 mL刻度线，静置分层。吸取上层清液至专用容器，经氮吹干燥至恒质量，称量并记录脂肪酸甲酯的质量。

4）DHA质量浓度的测定：参照Wang等[17]的方法并稍加修改，将甲酯化后的样品用乙腈充分溶解。采用InertSustain C18色谱柱（250 mm×4.6 mm×5 μm），检测波长200 nm，柱温38 ℃。流动相为乙腈-水混合液（体积比85∶15），流量1.0 mL/min，进样量10 μL。依据校准曲线计算DHA质量浓度，回归方程为：y=5.239 61×10^6x+57 977.8，R^2=0.999 15，其中x为DHA质量浓度，y为相对强度。

1.3.9　鱼油乳液氧化稳定性的测定

参照Niu等[18]的方法检测鱼油乳液的氧化稳定性。取3 mL鱼油乳液转移至离心管中，置于55 ℃的黑暗环境下进行加速氧化处理，分别测定样品在0、2、4、6、8 d的过氧化值（POV）。取0.1 mL鱼油乳液样品，加入1 mL异丙醇-异辛烷混合液（体积比1∶3），充分混匀后于6 000 r/min离心10 min。吸取400 μL有机相转移至洁净试管中，依次加入5.6 mL 1-丁醇-甲醇混合液（体积比1∶2）、30 μL 3.97 mol/L的硫氰酸铵及30 μL氯化亚铁溶液，振荡反应20 min。反应结束后，在室温下于510 nm处测定吸光度。

1.3.10 统计与分析

所有试验均重复3次。采用SPSS进行方差分析，并使用Duncan多元极差检验确定均数差异，$P<0.05$表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 鱼油乳液的粒径分布

不同OVA与CMC质量比和体系pH下制备的OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液粒径分布见图1。结果显示，随着OVA与CMC质量比的升高，OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液液滴的粒径明显减小，尤其在pH 4.4时，3种鱼油乳液液滴的粒径差异更为突出，这主要与不同条件下形成的胶体颗粒的结构特性有关。当OVA与CMC质量比为1∶2或1∶1时，OVA-CMC-Cur胶体颗粒的粒径较大且结构松散，这是由于CMC糖链的位阻效应，胶体颗粒难以有效吸附于油水界面，最终形成的界面膜结构较松散。未负载姜黄素和负载姜黄素的OVA-CMC-Cur胶体颗粒均呈球状或椭球状毛线团结构，但负载姜黄素的颗粒表面结构更加均匀。随着体系pH的降低，乳液液滴粒径分布曲线向更小粒径方向移动，这是因为在此pH范围内，蛋白质分子携带较多正电荷，而多糖分子携带较多负电荷，两者间的静电相互作用较强，促使其形成更加致密的蛋白质/多糖胶体颗粒，该颗粒更易吸附于油水界面，从而形成稳定性更强的乳液。当OVA与CMC质量比为2∶1时，OVA-CMC-Cur胶体颗粒的粒径更小、结构更致密，更有利于在油水界面形成致密的界面膜；同时，该质量比下不同pH的鱼油乳液液滴粒径无明显变化。已有研究证实，当添加的颗粒数一定时，乳液液滴粒径与颗粒乳化剂的粒径呈正相关，即乳化剂颗粒粒径越小，所形成的乳液液滴粒径也越小[19]。

2.2 鱼油乳液的微观结构

不同OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液的微观结构见图2。当OVA与CMC质量比为1∶2时，鱼油乳液在pH 4.4时有明显的絮凝现象，且随着pH降低，絮凝现象逐渐减弱；当pH降至3.8时，鱼油乳液液滴分布趋于均匀。当OVA与CMC质量比为1∶1时，所有pH下的鱼油乳液液滴在光学显微镜下均清晰可见，且随着pH的变化，鱼油乳液液滴无明显变化，这与鱼油乳液液滴粒径分布结果一致。当OVA与CMC质量比为2∶1时，鱼油乳液液滴的粒径更小且分散均匀性进一步提升，不同pH下鱼油乳液液滴无明显变化。该质量比下制备的胶体颗粒具有较好的乳化性能，能够在油水界面形成致密的界面膜，液滴可自由分散，并能有效抑制絮凝行为，从而维持乳液的稳定性。

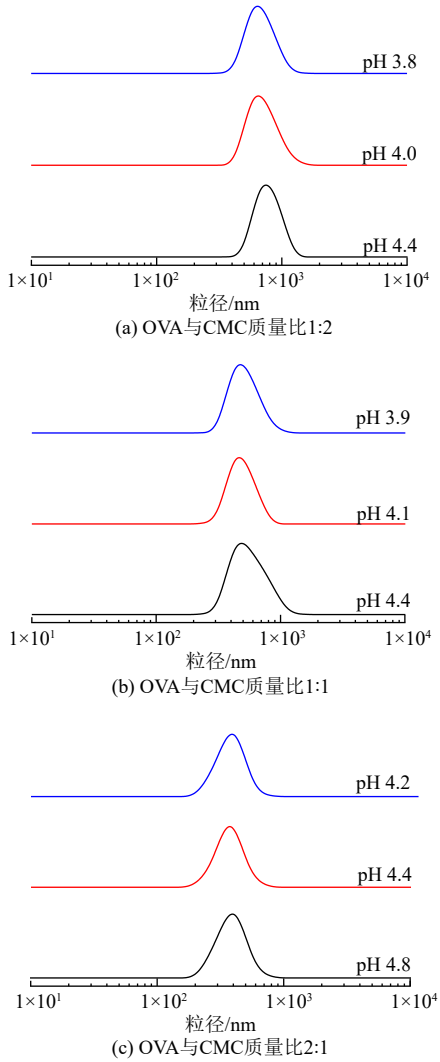


图1 不同OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of fish oil emulsions stabilized by different OVA-CMC-Cur colloidal particles

2.3 鱼油乳液的微流变学特性

由图3可知，不同OVA与CMC质量比下，鱼油乳液的G''曲线均表现为对角频率的高度依赖性；且在相同角频率下，随着OVA与CMC质量比的上升，鱼油乳液的G''持续增加，表明化学交联作用是弱凝胶结构形成的主要原因[20]。随着角频率的升高，鱼油乳液的黏度逐渐下降，表现出剪切变稀特性，且该黏度变化趋势与微流变学参数具有良好的对应关

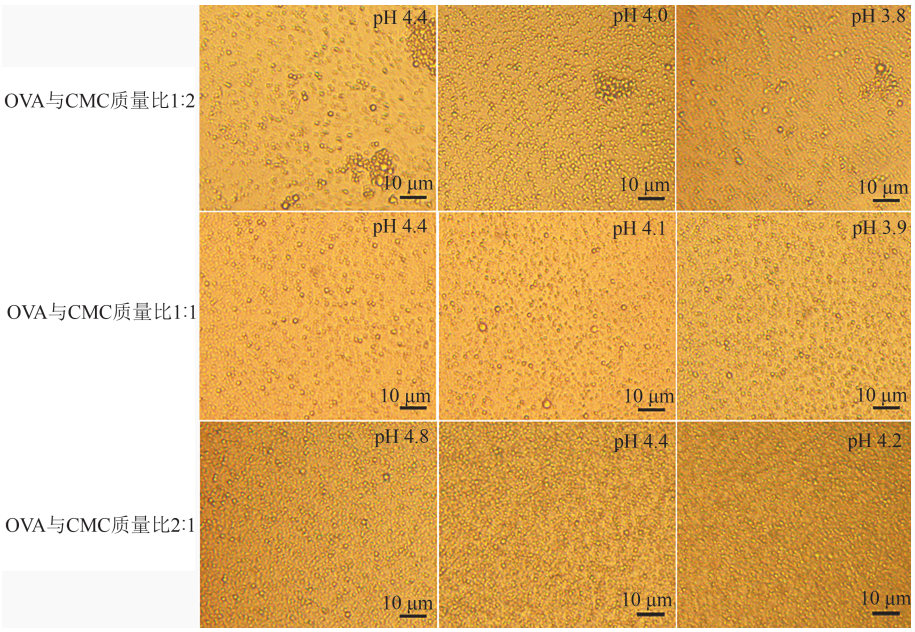


图 2　不同 OVA-CMC-Cur 胶体颗粒稳定的鱼油乳液的微观结构图

Fig. 2　Micrographs of fish oil emulsions stabilized by different OVA-CMC-Cur colloidal particles

系。当 OVA 与 CMC 质量比为 2∶1 时，鱼油乳液粒径较小，扩散速率较快，因此体系黏度较低。尽管较低的黏度会增加乳液液滴之间的碰撞频率，但该比例下形成的致密胶体颗粒能够在油水界面处形成致密的界面膜，有效抵御频繁碰撞带来的界面膜破裂风险[21]，从而维持乳液稳定。而当 OVA 与 CMC 质量比为 1∶2 时，鱼油乳液粒径较大，扩散速率较慢，导致体系黏度较高。即使乳液液滴碰撞频率因高黏度而显著降低，乳液仍难以克服液滴聚集引发的不稳定，出现明显的乳析现象。这一现象主要源于该质量比下胶体颗粒结构松散，在油水界面形成的界面膜致密性不足，使得乳液液滴在碰撞后易黏连絮凝，进而逐步聚结，最终导致乳液失稳分层。

2.4　鱼油乳液的贮存稳定性

l^* 反映样品的光学性质，其数值主要取决于液滴大小与浓度[22]，通过探究 l^* 随贮存时间的变化规律，可了解乳液的贮存稳定机制。随着贮存时间的延长，所有鱼油乳液的 l^* 均略有上升，见图 4(a)。表明贮存期间鱼油乳液的液滴粒径仅发生微小增长，证实鱼油乳液具有良好的贮存稳定性。当 OVA 与 CMC 质量比为 2∶1 时，pH 4.8 与 pH 4.4 时鱼油乳液的 l^* 相近，明显低于 pH 4.2 时制备的鱼油乳液，但 3 组鱼油乳液的粒径无显著差异。这是因为 l^* 的变化与分散相的体积分数呈负相关，随着贮存时间的延长，体系中液滴散射中心浓度降低，进而导致 l^* 上升，且该效应的影响程度超过了乳液液滴尺寸的微小变化[22]。

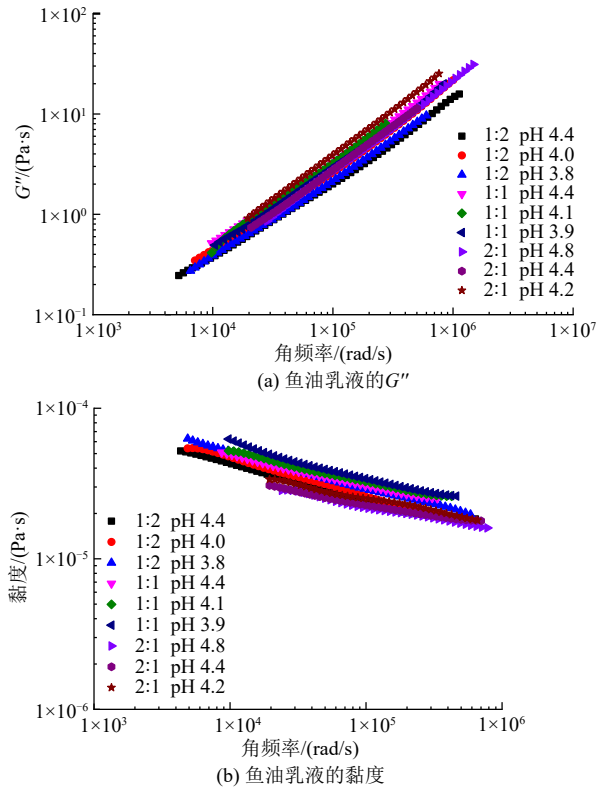


图 3　不同 OVA-CMC-Cur 胶体颗粒稳定的鱼油乳液的 G'' 和黏度

Fig. 3　G'' and viscosity of fish oil emulsions stabilized by different OVA-CMC-Cur colloidal particles

为进一步验证鱼油乳液的贮存稳定性，对不同贮存时间下鱼油乳液的液滴扩散行为进行分析，见图4(b)。结果显示，所有鱼油乳液液滴均表现为亚扩散运动，这是由于液滴之间的引力或疏水相互作用限制了液滴的自由运动。总体而言，当OVA与CMC质量比为1∶2时，鱼油乳液液滴的扩散速率最慢；而当OVA与CMC质量比为2∶1时，MSD斜率最大，表明该条件下乳液液滴之间的吸引力较弱，运动受限程度较小[23]。这些结果表明，由结构松散的OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的乳液更易发生聚结与乳析，而结构致密的OVA-CMC-Cur胶体颗粒能够在乳液界面形成弹性和稳定性更优的界面膜，从而有效抑制液滴聚集，维持乳液长期稳定。

2.5　鱼油乳液消化液的特性

当OVA与CMC质量比为1∶2或2∶1时，消化液中DHA质量浓度随体系pH的降低而显著升高，见图5。这一现象表明，随着pH降低，OVA-CMC-Cur胶体颗粒形成的界面膜对乳液的稳定作用减弱，其抵抗消化酶与胆盐破坏的能力降低，从而促进了DHA的释放。相较于OVA与CMC质量比2∶1、pH 4.8条件下稳定的乳液，其他pH条件下稳定的乳液消化后的液滴数量明显减少，这一结果也说明了大量脂肪被降解，进而释放出更多DHA，见图6。在OVA与CMC质量比1∶2、pH 4.4条件下OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液中，脂肪与消化酶的接触面积因乳液聚集体的存在而减小，导致酶解速率进一步减慢；而在OVA与CMC质量比2∶1、pH 4.8条件下OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液中，其界面膜具有良好的稳定性，可有效抵御消化液的破坏，从而降低消化速率[24]，且该条件下鱼油乳液在消化前后均保持均匀分散状态，液滴之间无明显聚结现象，仅粒径略有减小。这一差异表明，上述2种鱼油乳液对脂肪酶酶解的抑制机制不同，前者依赖乳液聚集体减少酶与底物的接触，后者则通过稳定的界面膜直接抑制消化酶的作用。此外，当OVA与CMC质量比为1∶2或2∶1时，DHA释放率均随pH的降低而升高。这可能是由于随着pH降低，消化前鱼油乳液表面的负电荷减少，在一定程度上减弱了消化酶与乳液表面的静电排斥作用，从而提高了脂肪的消化率，见图7。当OVA与CMC质量比为1∶2时，随着pH降低，DHA质量浓度从6.68 mg/mL提升至9.15 mg/mL；当OVA与CMC质量比为2∶1时，随着pH降低，DHA质量浓度从6.64 mg/mL提升至9.73 mg/mL。

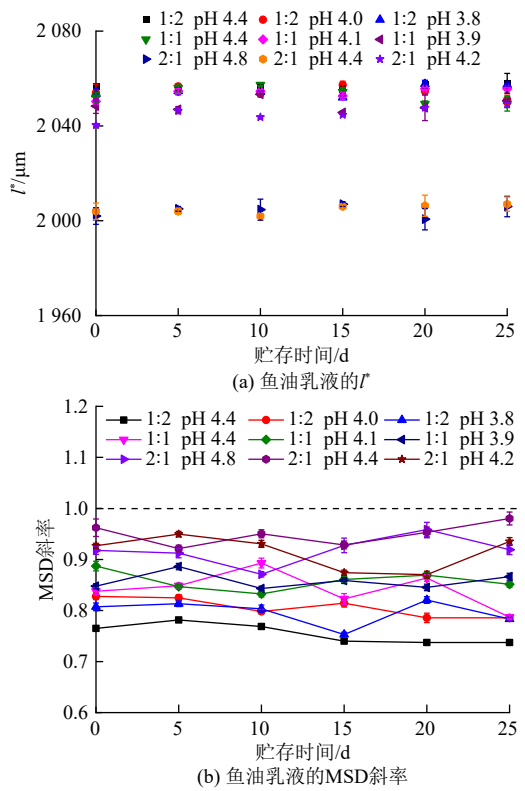
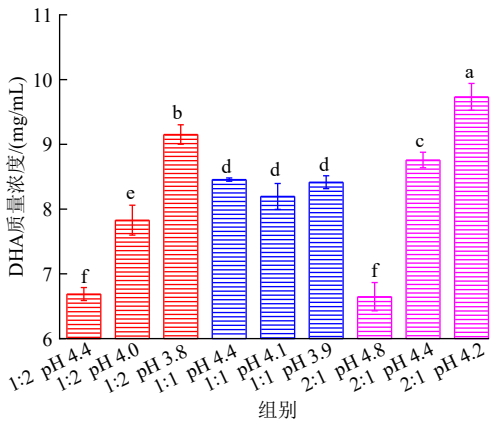


图4　不同OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液的l^*和MSD斜率

Fig. 4　l^* and MSD slope of fish oil emulsions stabilized by different OVA-CMC-Cur colloidal particles



不同字母代表差异显著(P<0.05)。

图5　不同OVA-CMC-Cur胶体颗粒稳定的鱼油乳液消化液中的DHA质量浓度

Fig. 5　DHA mass concentrations in fish oil emulsions stabilized by different OVA-CMC-Cur colloidal particles after digestion

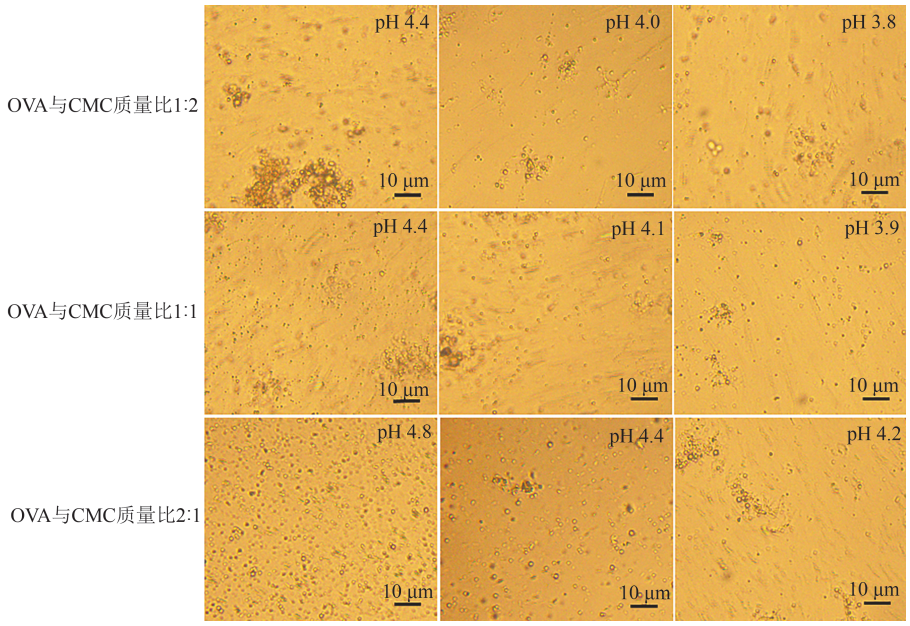
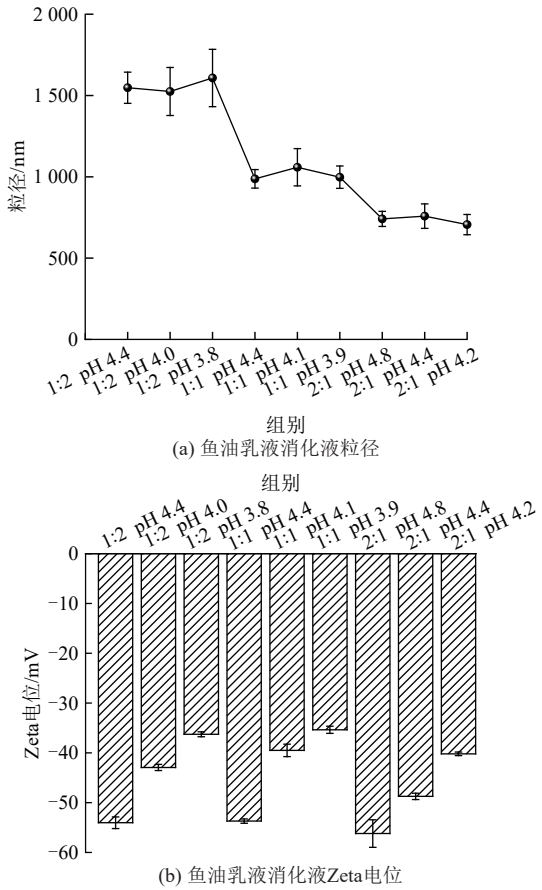


图 6　不同 OVA-CMC-Cur 胶体颗粒稳定的鱼油乳液消化液的微观结构图（400×）

Fig. 6　Micrographs of fish oil emulsions stabilized by different OVA-CMC-Cur colloidal particles after digestion（400×）



(a) 鱼油乳液消化液粒径

(b) 鱼油乳液消化液Zeta电位

图 7　不同 OVA-CMC-Cur 胶体颗粒稳定的鱼油乳液消化液粒径和 Zeta 电位

Fig. 7　Particle sizes and Zeta potential of fish oil emulsions stabilized by different OVA-CMC-Cur colloidal particles after digestion

2.6　鱼油乳液的抗氧化特性

脂质氢过氧化物的 POV 可反映 OVA-CMC 胶体颗粒与 OVA-CMC-Cur 胶体颗粒对鱼油乳液氧化稳定性的影响。由图 8 可知，纯鱼油的 POV 在整个加速氧化测试期间迅速升高，这主要是因为鱼油中富含不饱和脂肪酸，不饱和脂肪酸易发生氧化反应且缺乏保护机制。在 8 d 的加速氧化期内，经 OVA-CMC 胶体颗粒稳定的鱼油乳液，其 POV 虽持续上升，但鱼油的氧化速率明显低于纯鱼油。这一结果表明，吸附于油水界面的 OVA-CMC 胶体颗粒通过位阻效应，对鱼油乳液起到一定的氧化保护作用[25]。而 OVA-CMC-Cur 胶体颗粒稳定的鱼油乳液，其 POV 在整个试验期间仅略有上升，氧化稳定性明显优于 OVA-CMC 胶体颗粒稳定的鱼油乳液，表明姜黄素的引入可显著提高鱼油乳液的氧化稳定性。随着 OVA 与 CMC 质量比的升高，OVA-CMC-Cur 胶体颗粒稳定的鱼油乳液的稳定性进一步提高，这主要是因为高 OVA 质量比条件下形成的胶体颗粒能在油水界面形成更致密的界面膜。推测其抗氧化机制为：OVA-CMC 胶体颗粒可阻挡油脂氧化引发剂与鱼油的接触，而负载的姜黄素能直接消耗油脂氧化引发剂，两者协同作用抑制氧化反应。综上，负载活性物质（姜黄素）的蛋白质-多糖胶体颗粒是保护易氧化油脂的良好保护剂。

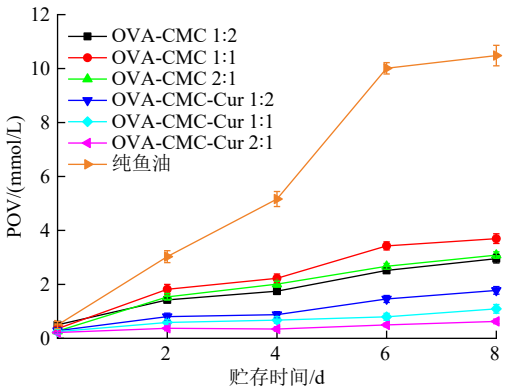


图 8 不同 OVA-CMC-Cur 胶体颗粒稳定的鱼油乳液的抗氧化特性

Fig. 8 Antioxidant properties of fish oil emulsions stabilized by different OVA-CMC-Cur colloidal particles

3 结论

作者采用酸热处理与复合凝聚相结合的方法构建了 OVA-CMC 胶体颗粒，并以负载姜黄素的 OVA-CMC-Cur 胶体颗粒为乳化剂制备鱼油乳液，成功构建了兼具物理稳定性与氧化防御性能的乳液界面膜。结果表明，当 OVA 与 CMC 质量比为 2∶1 时，所制备的鱼油乳液粒径较小、扩散速度较快、体系黏度较低，但该质量比下形成的致密胶体颗粒能够在油水界面形成致密的界面膜，可有效抵御鱼油乳液液滴频繁碰撞引发的界面膜破裂风险，使鱼油乳液表现出良好的贮存稳定性。此外，由于姜黄素被携带至油水界面，形成具有抗氧化活性的鱼油乳液界面膜，显著提高了乳液的氧化稳定性。本研究成功构建了一种新型功能化鱼油乳液递送体系，该体系的构建不仅拓宽了易氧化生物活性物质载体的技术路径，也为食品、药品领域的创新开发及疾病治疗新策略的探索奠定了理论与实践基础。后续可进一步探究姜黄素的负载量、体外释放特性与鱼油乳液抗氧化稳定性之间的关系，为该递送体系的优化与产业化应用提供理论支撑。

参考文献

[1] DAWSON B R, MANTZIORIS E, CONNELL S D, et al. Fish by-products as reliable proxies to evaluate nutritional fatty acid contents in commercial fish fillets[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142223.

[2] ALI S M, MOGHIMI H R, HADIAN Z, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of α-tocopherol loaded nanoliposome's containing DHA and EPA[J]. Food Chemistry, 2017, 215: 157-164.

[3] YU X J, YU Z Q, LIU Y L, et al. Utilization of high-fructose corn syrup for biomass production containing high levels of docosahexaenoic acid by a newly isolated *Aurantiochytrium* sp. YLH70[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 177(6): 1229-1240.

[4] YANG B X, JOE G H, LI W Z, et al. Comparison of Maillard-type glycated collagen with alginate oligosaccharide and glucose: its characterization, antioxidant activity, and cytoprotective activity on H_2O_2-induced cell oxidative damage[J]. Foods, 2022, 11(15): 2374.

[5] TOCHER D R, SPRAGUE M, HAN L, et al. Inclusion of oil from transgenic camelina sativa in feed effectively supplies EPA and DHA to atlantic salmon (*Salmo salar*) grown to market size in seawater pens[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 139414-139414.

[6] LIU E C, SU Z W, YANG C, et al. Fabrication, characterization and properties of DHA-loaded nanoparticles based on zein and PLGA[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 129957.

[7] SAAVEDRA I G I, WEILANDT M, MAJOLLARI I, et al. Emulsions stabilised with pectin-based microgels: investigations into the effect of pH and ionic strength on emulsion stability[J]. Food & Function, 2021, 12(16): 7227-7238.

[8] WANG C Z, WU J H, WANG C H, et al. Advances in Pickering emulsions stabilized by protein particles: toward particle fabrication, interaction and arrangement[J]. Food Research International, 2022, 157: 111380.

[9] HU B, WANG K P, HAN L Y, et al. Pomegranate seed oil stabilized with ovalbumin glycated by inulin: physicochemical stability and oxidative stability[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105602.

[10] SUN H R, FAN J Y, SUN H J, et al. Study on protein structures of eight mung bean varieties and freeze-thaw stability of protein-stabilized emulsions[J]. Foods, 2022, 11(21): 3343.

[11] LI Z S, KUANG H R, YANG J C, et al. Improving emulsion stability based on ovalbumin-carboxymethyl cellulose complexes with thermal treatment near ovalbumin isoelectric point[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 3456.

[12] LIN J W, MENG H C, YU S J, et al. Genipin-crosslinked sugar beet pectin-bovine serum albumin nanoparticles as

novel Pickering stabilizer[J]. Food Hydrocolloids，2021，112：106306.

[13] NIU F G，GU F N，ZHAO M D，et al. Aggregation and growth mechanism of ovalbumin and sodium carboxymethylcellulose colloidal particles under thermal induction[J]. Biomacromolecules，2023，24（3）：1532-1543.

[14] NIU F G，DU Y X，ZHANG Q P，et al. Ovalbumin/carboxymethylcellulose colloids：particle compactness and interfacial stability[J]. Food Chemistry，2022，372：131223.

[15] GU L P，YAO X，MCCLEMENTS D J，et al. Fabrication，characterization，and application of catechin-dextran-egg white protein conjugates：novel antioxidant emulsifiers[J]. LWT-Food Science and Technology，2023，173：114268.

[16] CHEN Y，GE H，ZHENG Y，et al. Phospholipid-protein structured membrane for microencapsulation of DHA oil and evaluation of its *in vitro* digestibility：inspired by milk fat globule membrane[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2020，68（22）：6190-6201.

[17] WANG S H，GAN Y S，KAN H，et al. Exploitation of HPLC analytical method for simultaneous determination of six principal unsaturated fatty acids in oviductus ranae based on quantitative analysis of multi-components by single-marker （QAMS）[J]. Molecules，2021，26（2）：479.

[18] NIU F G，NIU D B，ZHANG H J，et al. Ovalbumin/gum arabic-stabilized emulsion：rheology，emulsion characteristics，and Raman spectroscopic study[J]. Food Hydrocolloids，2016，52：607-614.

[19] NIU F G，HAN B J，FAN J M，et al. Characterization of structure and stability of emulsions stabilized with cellulose macro/nano particles[J]. Carbohydrate Polymers，2018，199：314-319.

[20] SALERNI F，ORSI D，SANTINI E，et al. Diffusing wave spectroscopy for investigating emulsions：II. characterization of a paradigmatic oil-in-water emulsion[J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2019，580：123724.

[21] MEDRONHO B，FILIPE A，COSTA C，et al. Microrheology of novel cellulose stabilized oil-in-water emulsions[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2018，531：225-232.

[22] MCMILLIN R E，NOWACZYK J，CENTOFANTI K E，et al. Deconvoluting emulsion stabilization mechanisms using diffusing wave spectroscopy[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2023，62（36）：14369-14379.

[23] COSTA C，ROSA P，FILIPE A，et al. Cellulose-stabilized oil-in-water emulsions：structural features，microrheology，and stability[J]. Carbohydrate Polymers，2021，252：117092.

[24] SRIDHARAN S，MEINDERS M B J，BITTER J H，et al. On the emulsifying properties of self-assembled pea protein particles[J]. Langmuir，2020，36（41）：12221-12229.

[25] NIU F G，GAO Y，YAN X Y，et al. Adsorption and inhibition of lipid oxidation of curcumin embeded egg ovalbumin/sodium carboxymethylcellulose nanoparticles at the oil-in water interface[J]. Journal of Food Engineering，2024，379：112139.

（责任编辑：张馨文）