DOI:10.12441/spyswjs.20250808003 [文章编号] 1673-1689(2026)04-0094-08

复合纳米颗粒负载β-胡萝卜素的Pickering乳液及其酶促降解效应

刁洪林[1] 孙程熠[2] 王文斌[1] 舒俊生[3] 赵伦旭[3] 何召贤[2] 薛雯雯[2] 杜先锋[2*]

(1. 安徽中烟工业有限责任公司,安徽 合肥 230088; 2. 安徽农业大学食品与营养学院,安徽 合肥 230036; 3. 安徽焦甜香生物科技有限公司,安徽 宣城 241000)

摘要:【目的】类胡萝卜素裂解双加氧酶(carotenoid cleavage dioxygenase, CCDs)可以用于β-胡萝卜素的酶促降解,但CCDs是亲水性的,因此要促进β-胡萝卜素的酶促降解,就需要一个可以提供双相酶促反应的体系。**【方法】**制得一种中空介孔二氧化硅(hollow mesoporous silica,HMS)-二氢杨梅素(dihydromyricetin,DMY)复合纳米颗粒(HMS-DMY),用其作为乳化剂构建了负载β-胡萝卜素和CCDs的水包油型Pickering乳液(HMS-DMY-E),分析HMS-DMY的粒径和结构及其对HMS-DMY-E粒径、微观结构和流变性的影响,并分析酶促降解后香气物质的变化。**【结果】**HMS-DMY的粒径为197.81 nm,多分散指数为0.31,三相接触角为88.14°,显示出良好的界面润湿特性,有助于其在油水界面进行吸附。HMS-DMY-E较小的粒径(21.43 μm)增大了β-胡萝卜素和CCDs的接触面积,促进了β-胡萝卜素的酶解。HMS-DMY-E酶促降解之后,二氢猕猴桃内酯、β-紫罗兰酮和β-环柠檬醛等香气物质的质量分数明显升高。**【结论】**以构建的Pickering乳液作为微反应容器,可促进CCDs对β-胡萝卜素的酶促降解并提高香气物质的质量分数。

关键词:β-胡萝卜素;Pickering乳液;中空介孔二氧化硅;二氢杨梅素;酶促降解

Pickering Emulsion of Composite Nanoparticle-loaded β-Carotene and Its Enzymatic Degradation Effects

DIAO Honglin[1] *SUN Chengyi*[2] *WANG Wenbin*[1] *SHU Junsheng*[3] *ZHAO Lunxu*[3] *HE Zhaoxian*[2] *XUE Wenwen*[2] *DU Xianfeng*[2*]

(1. China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd., Hefei 230088 China; 2. School of Food and Nutrition, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. Anhui Jiaotianxiang Biotechnology Co., Ltd., Xuancheng 241000, China)

Abstract: [**Objective**] Carotenoid cleavage dioxygenases (CCDs) catalyze the degradation of β-carotene. However, due to the hydrophilic nature of CCDs, a system that provides biphasic enzymatic reactions is necessary to facilitate the enzymatic degradation of β-carotene. [**Method**] Hollow mesoporous silica-dihydromyricetin (HMS-DMY) composite nanoparticles were synthesized and used as the emulsifier to form the oil-in-water Pickering emulsion loaded with β-carotene and CCDs (HMS-DMY-E). The particle size and structure of HMS-DMY were characterized, and their influences on the particle size, microstructure, and rheology of HMS-DMY-E were investigated. Additionally, changes in the content of aroma compounds after enzymatic degradation were analyzed. [**Result**] HMS-DMY exhibited a particle size of 197.81 nm, a polydispersity index of 0.31, and a three-phase contact angle of 88.14°, showcasing favorable interfacial wettability for oil-water interface

基金项目:安徽中烟工业有限责任公司科技项目(202134000034029)。

通信作者:杜先锋(1963—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事食品化学研究。E-mail:dxf@ahau.edu.cn

收稿日期:2025-08-08 **修回日期:**2025-09-28

adsorption. HMS-DMY-E had a small particle size of 21.43 μm, which enhanced the contact area between β-carotene and CCDs, thereby promoting enzymatic degradation. The mass fractions of key aroma compounds such as β-ionone, β-cyclocitral, and dihydroactinidiolide were significantly increased after enzymatic degradation of HMS-DMY-E. [**Conclusion**] The Pickering emulsion prepared in this study serves as an efficient microreactor promoting the enzymatic degradation of β-carotene by CCDs and increasing the mass fractions of aroma compounds.

Keywords: β-carotene; Pickering emulsion; hollow mesoporous silica; dihydromyricetin; enzymatic degradation

β-胡萝卜素是一种脂溶性化合物，其降解产物能有效改善食品风味。β-胡萝卜素的降解方式主要包括热裂解、热氧化、光氧化、化学氧化和酶法降解，其中酶法降解是一种较为安全、有效的途径。类胡萝卜素裂解双加氧酶（CCDs）可以用于β-胡萝卜素的酶促降解，其降解产物（如二氢猕猴桃内酯、β-紫罗兰酮和异佛尔酮）可以作为香气物质应用于果汁、葡萄酒、烟草和茶叶等，以起到增香作用[1]。但是β-胡萝卜素的酶法降解属于双相酶促反应，而β-胡萝卜素是脂溶性成分，CCDs是亲水性的，因此需要一种能提供双相酶促反应的体系来高效酶解。Pickering乳液生物催化是一种由固体颗粒稳定的新型非均相酶促反应体系，因其在简化产物分离和酶界面活化方面的作用而得到广泛认可[2]。在非均相酶促反应体系中，双相酶促反应体系是公认的最经典和研究最深入的体系。与无溶剂或传统的双相酶促反应体系相比，Pickering乳液中位于油水界面的酶不仅实现了高效催化，而且由于水的存在，还能保持酶的结构和活性。因此，寻求一种使用Pickering乳液作为双相酶促反应体系的酶解方法，对提高酶解效率非常有必要。

虽然Pickering乳液可用于提供双相酶促反应体系，但其稳定性低仍是目前需要解决的问题之一。HMS颗粒能在油水界面快速吸附Pickering乳液，具有稳定Pickering乳液的潜力[3]。更重要的是，由于HMS的固定化酶能力，可以通过稳定Pickering乳液体系建立生物催化容器。例如，Sun等[4]利用超声辅助HMS固定脂肪酶，构建了一种高活性和可持续的生物催化剂。Pickering乳液的每一液滴都相当于一个微反应容器，不仅能缩短底物分子的扩散距离，减少传质阻力，有效提高反应物质和产物在乳液界面的传热、传质效率，而且还可在多相体系中解决多种复杂问题，是理想的酶催化界面反应器[5]。通过将HMS和多酚复合，调控其界面润湿性，能更好地稳定Pickering乳液并赋予其功能特性。Hu等[6]利用HMS纳米颗粒负载表没食子儿茶素没食子酸酯，使油脂的氧化稳定性明显提高。此外，DMY等类黄酮物质也可以稳定Pickering乳液。DMY作为一种具有多种生物活性的类黄酮，有抗氧化、抗菌、抗病毒、抗动脉硬化、抗肿瘤活性等健康促进作用。此外，DMY还可用于制备复合物，进一步提高Pickering乳液的稳定性。Fang等[7]对纤维素纳米纤维进行疏水改性，制备得到纤维素纳米纤维-二氢杨梅素复合物，其界面润湿性、乳液稳定性、抗氧化活性和乳化性能都得到了改善。此外，Geng等[8]制备了能自发聚集并吸附在油水界面上的高直链玉米淀粉-二氢杨梅素复合物，使界面张力明显降低，从而高效稳定了Pickering乳液。因此，在单一使用HMS稳定Pickering乳液的基础上，探究HMS与DMY复合物对Pickering乳液稳定性以及酶解效率的影响十分重要。

作者利用HMS-DMY构建了β-胡萝卜素和CCDs的高内相Pickering乳液，探究了复合物的形成机制及其乳液的性质，并对酶解后产生的香气物质进行了分析，旨在探索一种高效促进β-胡萝卜素酶解的方法，为食品增香提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

HMS：按照作者所在课题组先前报道的方法制备[9]。DMY（纯度98%）：上海源叶生物科技有限公司；玉米油：金龙鱼粮油食品股份有限公司；β-胡萝卜素（纯度>99%）、甲基三甲氧基硅烷（trimethoxymethylsilane，纯度37%）、十六烷基三甲基溴化铵（hexadecyl trimethyl ammonium bromide，纯度99%）、原硅酸四乙酯（tetraethyl orthosilicate，纯度98%）、CCDs（酶活5 000 U/g）、无水乙醇（分析纯）、磷酸盐缓冲溶液（PBS，pH 7.2）、氨水（纯度25%）：上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

旋转蒸发仪：RE-52A 型，上海亚荣生化仪器厂；恒温水浴锅：HH-9 型，上海一恒科技有限公司；恒温磁力搅拌器：IT-09 型，上海一恒科技有限公司；纳米粒度仪及 Zeta 电位仪：ZSU3100 型，英国马尔文仪器有限公司；真空干燥箱：DZF-6020 型，上海三发科学仪器有限公司；傅里叶变换红外光谱仪：Nicoletteis 50 型，美国赛默飞世尔科技公司；高剪切均质乳化机：HR-500D 型，上海沪析实业有限公司；激光粒度分析仪：Mastersizer 2000 型，英国马尔文仪器有限公司；倒置显微镜：IX-51 型，日本 Olympus 公司；气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）：7890A-5975C 型，美国安捷伦科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 HMS-DMY 制备

HMS-DMY 的制备参考 Fang 等[7]的方法并稍加修改。将 1.0 g DMY 加到 20 mL 乙醇中，超声分散 10 min，得到 DMY 乙醇溶液，避光保存。将 10 g HMS 分散到 100 mL 水中，置于磁力搅拌器上搅拌 1 h，得到 HMS 悬浮液。将 DMY 乙醇溶液滴入 HMS 悬浮液中，持续搅拌 2 h，使 HMS 悬浮液和 DMY 乙醇溶液充分混合，避光保存过夜。用旋转蒸发仪去除样品中的乙醇后，冷冻干燥得到 HMS-DMY。

1.3.2 粒径测定

样品粒径和 Zeta 电位利用纳米粒度仪及 Zeta 电位仪测定。水和样品的折射率分别为 1.33 和 1.54。将样品分散在水中形成悬浮液，超声分散 10 min 后进行测定，温度控制在 25 ℃。

1.3.3 傅里叶变换红外光谱分析

将 1 mg 样品和 100 mg 溴化钾充分研磨混合均匀，压制成片，采用傅里叶变换红外光谱仪进行测试，波数范围 4 000~400 cm^{-1}，分辨率 4 cm^{-1}，扫描累计次数 32 次。

1.3.4 三相接触角分析

样品三相接触角的测定采用接触角测量仪。首先用压片机将 0.2 g 样品压制成圆片状，并将其置于盛有玉米油的石英皿中。随后将装有去离子水的注射器伸入玉米油中，在样品表面滴加 2 μL 水。静置 30 s 后采集图像，通过软件计算样品的三相接触角。

1.3.5 Pickering 乳液制备

将 10 mg 的 β-胡萝卜素加入 10 mL 玉米油中，得到油相；将 2 mg 的 CCDs 溶解于 2 mL 的 PBS 缓冲溶液中，并加入质量浓度为 50 mg/mL 的 HMS-DMY 得到水相。将油相和水相以体积比 8∶2 混合，使用高剪切均质乳化机在 18 000 r/min 分散 3 min，得到负载了 β-胡萝卜素和 CCDs 且以 HMS-DMY 为乳化剂的高内相 Pickering 乳液，命名为 HMS-DMY-E。以只用 HMS 作为乳化剂的乳液（HMS-E）为对照。

1.3.6 乳液微观结构和粒径测定

样品的微观结构采用倒置显微镜观察，放大倍数 40×。具体步骤为：将乳液滴加于载玻片上，覆盖盖玻片后观察乳液的微观形貌。乳液的粒径测定参考 Fan 等[10]的方法，使用激光粒度分析仪进行测定。将乳液加入水中以 2 000 r/min 的转速连续搅拌，达到 5%~10% 的遮蔽水平。水和乳液的折射率分别设置为 1.33 和 1.54，温度设置为 25 ℃，记录乳液的粒径分布和体积平均直径（$D_{4,3}$）。

1.3.7 乳液流变性测定

使用旋转流变仪测定乳液的流变性（平行板直径 40 mm）。添加乳液在帕尔贴板上，擦边间隙和测试间隙分别设置为 1 050 μm 和 1 000 μm，温度控制在 25 ℃。应变值设置为 0.3%（位于乳液的线性黏弹性区域），在 0.1~100.0 rad/s 进行振荡频率扫描。此外，在 0.1~100.0 s^{-1} 的剪切速率内进行流动扫描测试，分析乳液的表观黏度。最后分析乳液的储能模量（G'）和损耗模量（G''）。

1.3.8 酶解和香气物质检测

酶解条件：参照文献[9]进行酶解。在避光条件下，恒温水浴锅中 37 ℃酶解 40 min，随后通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术进行分析。SPME 萃取头在使用前经 250 ℃老化处理 1 h。将样品瓶置于 45 ℃萃取装置中预热 15 min，插入 SPME 萃取头，使其纤维头暴露于样品顶空部，距液面 1.0 cm，萃取 45 min。随后将萃取头转移至 GC-MS 进样口，在 250 ℃解吸 3 min。色谱条件参照作者所在课题组先前报道的方法，得到香气物质的质量分数。

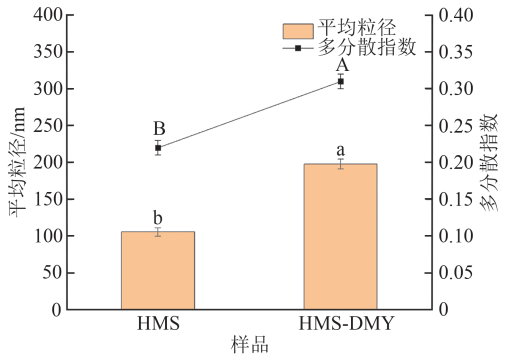
1.4 数据处理

所有试验独立重复 3 次，结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 25 软件进行显著性分析（$P<0.05$），并使用 Origin 2021 软件完成绘图。

2　结果与讨论

2.1　粒径分析

颗粒的大小对其在油水界面的自发聚集和乳化性能有显著影响，而作为颗粒乳化剂的复合物可用于稳定Pickering乳液，改善界面润湿性，增强乳化性能[11]。HMS和HMS-DMY的平均粒径和多分散指数见图1，HMS和HMS-DMY的粒径分别为105.74、197.81 nm，多分散指数分别为0.22、0.31。HMS-DMY的粒径显著大于HMS，这是因为添加DMY后，HMS和DMY之间存在相互作用，吸附并形成HMS-DMY，导致粒径增大。



同一指标不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图1　HMS和HMS-DMY的平均粒径和多分散指数

Fig. 1　Particle sizes and polydispersity index values of HMS and HMS-DMY

2.2　傅里叶变换红外光谱结果

HMS、DMY与HMS-DMY的傅里叶变换红外光谱见图2。HMS的伸缩振动峰出现在3 433 cm^{-1}（O—H）、1 630 cm^{-1}（H—O—H）；在1 093、798、459 cm^{-1}处的伸缩振动峰分别对应HMS的特征官能团—Si—O—Si—的反对称、对称伸缩、弯曲振动[12]。DMY的伸缩振动峰分别出现在3 359 cm^{-1}（O—H）、1 640 cm^{-1}（C═O）、1 126 cm^{-1}（C—H）和1 079 cm^{-1}（C—O），位于1 455、1 552、1 621 cm^{-1}处的伸缩振动峰对应其芳香环；此外，在1 100 cm^{-1}处有一个仲醇羟基峰，在1 230 cm^{-1}处有一个酚羟基峰[13]。相比于HMS和DMY，HMS-DMY在3 340 cm^{-1}处的特征吸收峰强度明显增强，表明两者之间存在氢键相互作用[14]，这归因于HMS-DMY的形成。此外，HMS-DMY综合了HMS和DMY之间的特征吸收峰，表明两者之间发生了非共价相互作用。HMS-DMY的红外光谱中出现了HMS的2 921 cm^{-1}和2 850 cm^{-1}特征吸收峰，进一步证明HMS与DMY之间存在非共价相互作用[15]。

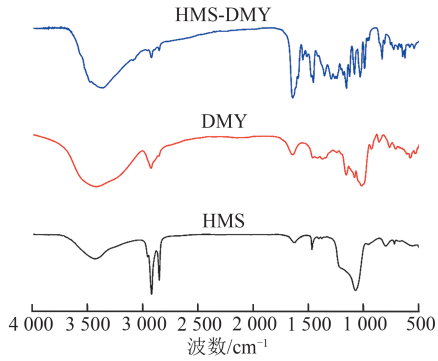
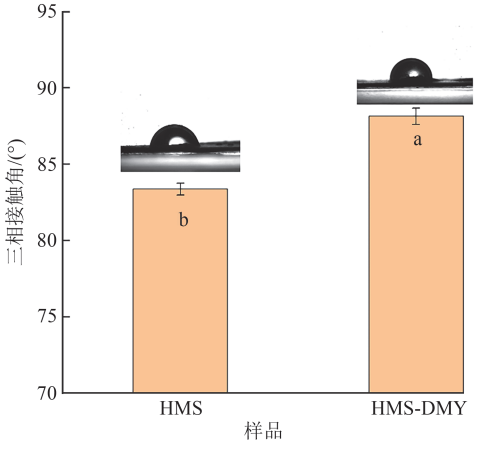


图2　HMS、DMY和HMS-DMY的傅里叶变换红外光谱

Fig. 2　Fourier transform infrared spectra of HMS, DMY, and HMS-DMY

2.3　三相接触角分析结果

如图3所示，三相接触角反映了样品在油水界面的润湿性。为了实现颗粒在油水界面的吸附，三相接触角需接近90°，促使其在水相和油相的均匀浸润[16-17]。HMS和HMS-DMY的三相接触角分别为83.37°和88.14°，表现出较强的乳化能力。HMS表现出亲水性，导致其在油水界面的吸附能力不足，而DMY表现出疏水性。相比于HMS，HMS-DMY的三相接触角更接近90°，在油水界面表现出更强的吸附能力，具备更优异的界面润湿性。这是因为HMS和DMY之间是基于非共价相互作用而结合的，这有效改善了界面润湿性。结合HMS-DMY的纳米级粒径，其具备稳定高内相Pickering乳液的潜力。



不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图3　HMS和HMS-DMY的三相接触角

Fig. 3　Three-phase contact angles of HMS and HMS-DMY

2.4　乳液微观结构和粒径分析

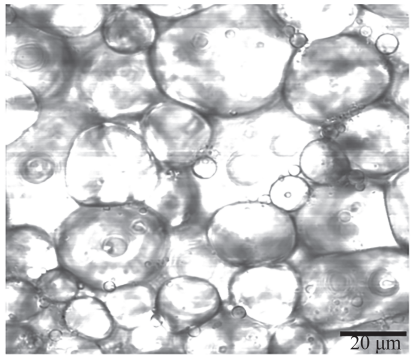
图 4(a)~(b)为乳液的微观结构，图 4(c)为乳液的粒径分布，图 4(d)为乳液的 $D_{4,3}$。HMS-E 和 HMS-DMY-E 乳液液滴呈现紧密堆积的状态，这是由于乳液的油相体积分数为 80%，属于高内相乳液。HMS 和 HMS-DMY 在油水界面的吸附，可以很好地稳定 Pickering 乳液，阻止油滴的聚并。乳液的粒径分布呈现 2 个峰，第一个峰对应较小粒径的乳液液滴，第二个峰对应较大粒径的乳液液滴以及液滴的聚并[18]。HMS-E 和 HMS-DMY-E 的 $D_{4,3}$ 分别为 26.17 μm 和 21.43 μm，相比于 HMS-E，HMS-DMY-E 的液滴表现出更小的粒径分布和 $D_{4,3}$。粒径分布的峰左移归因于 HMS-DMY 的三相接触角更接近 90°，表现出比 HMS 更优异的乳化性能。

2.5　乳液流变性分析

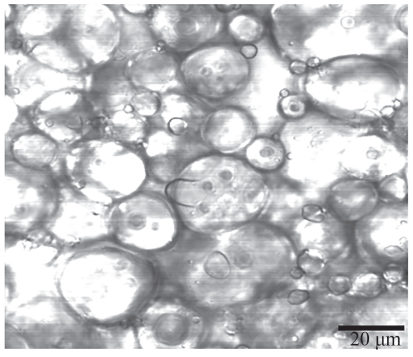
图 5 反映了乳液的流变性，振荡频率曲线显示了随着角频率变化，乳液的储能模量(G')和损耗模量(G'')之间的关系。所有乳液的 G' 均大于 G''。在整个角频率变化范围内，乳液表现为弹性主导的凝胶状行为，归因于 HMS 和 HMS-DMY 在油水界面吸附形成的致密网状结构[19]。随着剪切速率的提高，乳液的黏度逐渐降低，表现为剪切变稀现象，归属为假塑性流体[20]。这是因为乳液液滴在剪切应力的作用下出现了破乳现象。乳液的流变性和其界面吸附的 Pickering 颗粒稳定性密切相关，因此可以通过改变乳液的界面结构来调控乳液的性质[21]。

2.6　香气物质分析

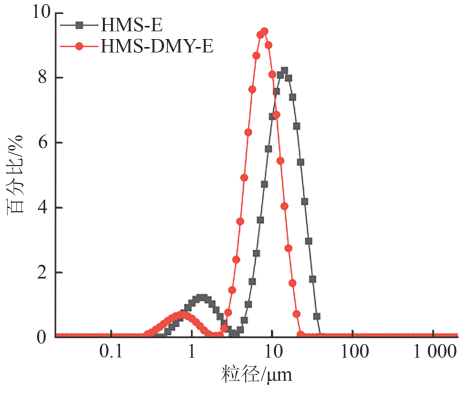
如表 1 所示，HMS-E 中检测出 47 种香气物质，HMS-DMY-E 中检测出 62 种香气物质，说明使用 HMS-DMY 为乳化剂的乳液，在酶促降解后能生成更多香气物质。在这些物质中，β-紫罗兰酮、β-环柠檬醛呈花香，而二氢猕猴桃内酯则为甜香，均能够提升食品的风味。此外，与 HMS-E 相比，HMS-DMY-E 中的 β-紫罗兰酮、β-环柠檬醛和二氢猕猴桃内酯等物质的质量分数均有显著提高。这是因为 HMS-DMY-E 具有粒径较小的液滴，β-胡萝卜素与 CCDs 的接触面积增大，从而促进对 β-胡萝卜素的酶促降解作用，促使 β-紫罗兰酮等香气物质产生[22]。



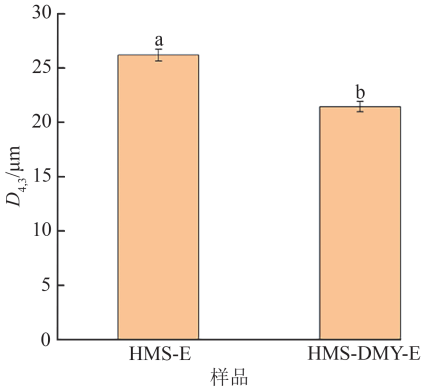
(a) HMS-E的微观结构



(b) HMS-DMY-E的微观结构



(c) 乳液的粒径分布



不同字母表示差异显著(P<0.05)。

(d) 乳液的$D_{4,3}$

图 4　乳液的微观结构、粒径分布和 $D_{4,3}$

Fig. 4　Microstructure, particle size distribution, and $D_{4,3}$ of the emulsion

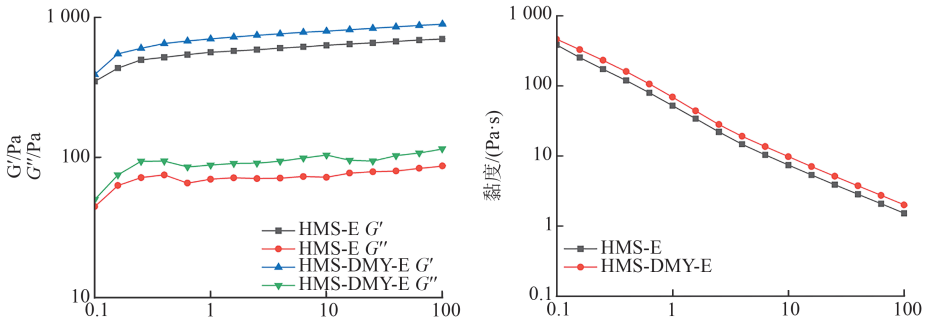


图5　乳液的振荡频率曲线和流动扫描曲线

Fig. 5　Oscillation frequency curves and flow sweep curves of the emulsion

表1　乳液的香气物质及质量分数

Table 1　Aroma compounds and their mass fractions of the emulsion samples

分类	香气物质	质量分数/%	
		HMS-E	HMS-DMY-E
酮类	4-环戊烯-1,3-二酮	0.06	—
	环己酮	—	0.17
	2-乙基环丁酮	3.66	3.83
	3-甲基-2-环己烯-1-酮	0.38	0.44
	1,2-环己二酮	0.59	0.78
	3-甲基环戊烷-1,2-二酮	—	0.08
	2-庚酮	0.21	0.17
	4,4-二甲基己-3-酮	0.63	0.76
	3-甲基-4-庚酮	—	0.82
	异佛尔酮	0.17	0.31
	2-羟基-5-甲基苯乙酮	—	0.55
	3,4-二甲氧基苯乙酮	—	0.32
	β-大马酮	0.56	0.85
	β-紫罗兰酮	2.32	2.50
	4-(3-羟基丁基)-3,5,5-三甲基环己-2-烯-1-酮	2.31	2.48
	1-环己基-3-乙氧基丁-2-酮	0.71	0.68
	法尼基丙酮	0.37	0.53
酯类	甲酸甲酯	0.54	1.37
	乙酸乙酯	0.27	0.47
	乙二酸二乙酯(草酸二乙酯)	0.86	—
	丁酸戊-2-烯-4-炔酯	—	0.46
	二氢猕猴桃内酯	0.95	1.55
	2,6-二甲氧基乙酸苯酯	0.20	0.46
	4-乙基苯甲酸丁酯	—	0.69
	4-羟基扁桃酸乙酯	0.19	—
	2-甲基丁酸辛酯	—	0.92
	4-乙基苯甲酸环戊酯	—	0.89
	十三酸甲酯	0.89	—
	邻甲氧基苯甲酸庚酯	—	0.45
	丁基十三烷基酯	—	0.57
	十六酸乙酯	—	0.35
	十八烷二酸单甲酯	—	0.61
烯类	1,4-戊二烯	0.26	0.39
	1-庚烯	0.14	—
	2-辛烯	—	0.29
	3-辛烯	0.07	—
	6-甲基-2-(4-甲基戊基)庚-1-烯	0.24	0.38
酚类	邻苯二酚	—	1.34
	4-乙基苯酚	0.79	0.64

续表

分类	香气物质	质量分数/%	
		HMS-E	HMS-DMY-E
酸类	乙酸	—	0.72
	丁酸	0.93	—
	5-异恶唑烷羧酸	0.63	0.71
	苹果酸	0.19	0.36
	苯乙酸	—	0.81
	邻氟苯甲酸	—	0.71
	辛酸	0.75	—
	肉桂酸	0.39	0.79
	正壬酸	—	0.99
	3-吲哚乙酸	0.86	0.85
	正十六酸	—	0.60
醇类	环戊醇	0.53	0.34
	3-甲基-4-戊烯-1-醇	0.20	0.01
	1,3-二氧杂烷-2-甲醇	5.67	5.85
	苯甲醇	2.10	3.06
	1-甲基环庚醇	—	0.17
	3,5-二甲基环己醇	0.47	—
	2,5-二甲基环己醇	0.04	—
	萜品烯-4-醇	—	1.83
	3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇	0.06	—
	2-甲基-1-苯基-1-丁醇	—	2.30
杂环类	2,3-二氢苯并呋喃	0.57	0.78
	2,6-二甲基吡啶	—	0.73
	2-正-己基呋喃	0.35	0.86
	3-甲基-1*H*-吡唑	0.46	—
	3-羟基吡啶	0.65	0.87
	3-乙酰氧基吡啶	—	0.79
	3-苯基吡啶	—	0.85
	4-甲基喹啉-1-氧化物	—	0.46
醛类	对甲基苯甲醛	—	0.31
	苯乙醛	1.20	1.54
	β-环柠檬醛	0.89	0.91
	5-(乙酰氧基甲基)-2-糠醛	0.76	0.76
有机胺类	2-吡啶甲酰胺	0.57	—
烷烃类	1,1-二甲基-2-亚乙基环戊烷	0.79	0.22

注:“—”表示未检出。

3 结论

研究结果显示,与HMS相比,HMS-DMY在油水界面吸附可形成液滴尺寸更小的Pickering乳液,呈现出更强的凝胶网状结构,并赋予乳液优异的稳定性。用HMS-DMY构建负载*β*-胡萝卜素的Pickering乳液的液滴尺寸较小,不仅提高了乳液的稳定性,而且使*β*-胡萝卜素与CCDs的接触面积增大,提高了酶解*β*-胡萝卜素的效率。作者构建的Pickering乳液作为反应容器,实现了CCDs对*β*-胡萝卜素的高效催化降解,产生*β*-紫罗兰酮、*β*-环柠檬醛和二氢猕猴桃内酯等香气物质。该研究以HMS-DMY构建的负载*β*-胡萝卜素的Pickering乳液为基础,促进CCDs对*β*-胡萝卜素的酶促降解,提高香气物质质量分数,为其应用于食品增香提供理论基础,但构建的Pickering乳液在实际复杂食品体系中的稳定性和增香作用还有待进一步验证。

参考文献

[1] 赵小皖,刘洵好,李慧勤,等. *β*-胡萝卜素的降解及其对食品体系的影响[J]. 食品工业科技,2011,32(3):417-421.

ZHAO X W，LIU X Y，LI H Q，et al. Degradation of β-carotene and its influence in foods[J]. Science and Technology of Food Industry，2011，32(3)：417-421.(in Chinese)

[2] BAGO R A M，SCHOBER L，HINZMANN A，et al. Effect of particle wettability and particle concentration on the enzymatic dehydration of *n*-octanaloxime in Pickering emulsions[J]. Angewandte Chemie International Edition，2021，60(3)：1450-1457.

[3] RÖLLIG R，PLIKAT C，ANSORGE-SCHUMACHER M B. Efficient and selective carboligation with whole-cell biocatalysts in Pickering emulsion[J]. Angewandte Chemie International Edition，2019，58(37)：12960-12963.

[4] SUN T，DONG Z，WANG J，et al. Ultrasound-assisted interfacial immobilization of lipase on hollow mesoporous silica spheres in a Pickering emulsion system：a hyperactive and sustainable biocatalyst[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering，2020，8(46)：17280-17290.

[5] QU Y N，SUN D F，YU Y. Interfacial engineering in Pickering emulsion photocatalytic microreactors：from mechanisms to prospects[J]. Chemical Engineering Journal，2022，438：135655.

[6] HU J，XU R Y，HU J，et al. Dual stabilization of Pickering emulsion with epigallocatechin gallate loaded mesoporous silica nanoparticles[J]. Food Chemistry，2022，396：133675.

[7] FANG F，TIAN Z J，CAI Y J，et al. The structural，antioxidant and emulsifying properties of cellulose nanofiber-dihydromyricetin mixtures：effects of composite ratio[J]. Food Chemistry，2024，454：139803.

[8] GENG S，LIU X L，MA H J，et al. Multi-scale stabilization mechanism of Pickering emulsion gels based on dihydromyricetin/high-amylose corn starch composite particles[J]. Food Chemistry，2021，355：129660.

[9] 薛雯雯，刁洪林，朱智杰，等. 负载β-胡萝卜素的中空介孔SiO_2乳液的制备及其酶促反应[J]. 安徽农业大学学报，2025，52(1)：164-172.
XUE W W，DIAO H L，ZHU Z J，et al. Preparation and enzymatic reaction of hollow mesoporous SiO_2 emulsion loaded with β-carotene[J]. Journal of Anhui Agricultural University，2025，52(1)：164-172.(in Chinese)

[10] FAN H，ZHU P L，HUI G，et al. Mechanism of synergistic stabilization of emulsions by amorphous taro starch and protein and emulsion stability[J]. Food Chemistry，2023，424：136342.

[11] MARTO J，ASCENSO A，SIMOES S，et al. Pickering emulsions：challenges and opportunities in topical delivery[J]. Expert Opinion on Drug Delivery，2016，13(8)：1093-1107.

[12] 聂志欣，蒋平平，赵汇行，等. 中空介孔二氧化硅负载磷钨酸催化剂的制备及其在生物柴油合成中的应用[J]. 中国油脂，2021，46(7)：48-56.
NIE Z X，JIANG P P，ZHAO H X，et al. Preparation of phosphotungstic acid supported on hollow mesoporous silica and its application in biodiesel synthesis[J]. China Oils and Fats，2021，46(7)：48-56.(in Chinese)

[13] ZHAO X Y，SHI C Y，ZHOU X Y，et al. Preparation of a nanoscale dihydromyricetin-phospholipid complex to improve the bioavailability：*in vitro* and *in vivo* evaluations[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences，2019，138：104994.

[14] PARK J Y，CHO D H，CHOI D J，et al. Preparation of catechin-starch nanoparticles composites and its application as a Pickering emulsion stabilizer[J]. Carbohydrate Polymers，2024，332：121950.

[15] DING J J，QIU X Y，LI Y X，et al. Preparation and characterization of protein-antioxidant complex Pickering particles for high internal phase emulsions[J]. Food Hydrocolloids，2024，151：109861.

[16] ALBERT C，BELADJINE M，TSAPIS N，et al. Pickering emulsions：preparation processes，key parameters governing their properties and potential for pharmaceutical applications[J]. Journal of Controlled Release，2019，309：302-332.

[17] LINKE C，DRUSCH S. Pickering emulsions in foods-opportunities and limitations[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2018，58(12)：1971-1985.

[18] 刘琳，王丹，张倩，等. 纤维素纳米晶与明胶稳定的Pickering乳液制备及其乳化特性[J]. 食品工业科技，2025，46(15)：68-75.
LIU L，WANG D，ZHANG Q，et al. Preparation of Pickering emulsion stabilized by cellulose nanocrystals and gelatin and their emulsification characteristics[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(15)：68-75.(in Chinese)

[19] ZHANG X Z，WU Y H，LI Y，et al. Effects of the interaction between bacterial cellulose and soy protein isolate on the oil-water interface on the digestion of the Pickering emulsions[J]. Food Hydrocolloids，2022，126：107480.

[20] ANVARI M，JOYNER M H S. Effect of formulation on structure-function relationships of concentrated emulsions：rheological，tribological，and microstructural characterization[J]. Food Hydrocolloids，2017，72：11-26.

[21] XU T，YANG J，HUA S X，et al. Characteristics of starch-based Pickering emulsions from the interface perspective[J]. Trends in Food Science & Technology，2020，105：334-346.

[22] 梁吉虹. 基于桑叶蛋白运载的β-胡萝卜素Pickering乳液制备及生物利用率的研究[D]. 南昌：南昌大学，2023.