

doi:10.12301/spxb202300418

文章编号:2095-6002(2024)02-0046-12

引用格式:杨翦秋,毕会敏,范方宇.负载姜黄素/花色苷的木薯淀粉基  $W_1/O/W_2$  型 Pickering 双重乳液的制备及性质[J]. 食品科学技术学报,2024,42(2):46-57.



YANG Jianqiu, BI Huimin, FAN Fangyu. Preparation and properties of cassava starch-based  $W_1/O/W_2$  Pickering double emulsions loading curcumin/anthocyanin[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024,42(2):46-57.

# 负载姜黄素/花色苷的木薯淀粉基 $W_1/O/W_2$ 型 Pickering 双重乳液的制备及性质

杨翦秋, 毕会敏, 范方宇\*

(西南林业大学 生命科学学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:**以木薯纳米淀粉、木薯醋酸酯变性淀粉为颗粒乳化剂制备食品级  $W_1/O/W_2$  型 Pickering 双重乳液,分别于内层水相、油相对姜黄素与花色苷进行负载。考察不同木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对双重乳液显微形态、粒径、Zeta 电位、负载率及贮藏稳定性的影响,并分析其在体外消化过程的控释性能。结果表明,木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为 6% 时,乳液综合性能最好。此时,乳滴分布均匀,呈“三相两膜”结构,粒径为 3.65  $\mu\text{m}$ ,Zeta 电位为 -14.50 mV,姜黄素、花色苷的负载率达到 95.23%、93.00%,4、25、40  $^{\circ}\text{C}$  时贮藏 20 d 均未出现明显分层;经模拟消化后乳液中姜黄素、花色苷保留率为 41.59%、76.29%,与游离姜黄素、花色苷相比,二者生物利用率分别提高了约 4 倍、3 倍。证实了木薯淀粉基双重乳液能实现在模拟消化系统中对活性物质的保护,并能有效提升其生物利用率。研究结果旨在为食品工业中淀粉基功能性乳液运载体系的构建及新型食品级 Pickering 双重乳液的开发提供理论参考。

**关键词:**姜黄素;花色苷;淀粉基 Pickering 双重乳液;负载率;体外消化

**中图分类号:**TS201.7; TS231

**文献标志码:**A

$W_1/O/W_2$  (water-in-oil-in-water) 型双重乳液由两种不同乳化剂将不同性质的乳液结合组成。内层以油性乳液 ( $W_1/O$ ) 为基础,中间层 (O) 为油性乳液形成的薄膜,外层为再覆盖的连续水相 ( $W_2$ )。  $W_1/O/W_2$  型双重乳液是一种可实现对水溶和脂溶功能活性成分及其复合物稳定包裹,达到良好运输、保护和释放效果的运载体系<sup>[1]</sup>,现已作为运输载体应用于诸多领域<sup>[2-4]</sup>。然而,双重乳液界面能较高,乳滴易

聚结、易破乳。将具有不可逆吸附机制的固体颗粒代替传统表面活性剂,可有效提升乳液表面荷载,避免双重乳液絮凝、聚结,提升乳液的稳定性<sup>[5]</sup>。

目前,很多生物来源固体颗粒已用于稳定食品级 Pickering 双重乳液,如纤维素、蛋白质<sup>[2]</sup>、果胶<sup>[6]</sup>等。众多有机态颗粒中,淀粉微纳米颗粒来源广、安全性高,且易通过修饰颗粒表面性质调节润湿性<sup>[7]</sup>。木薯淀粉由于支链淀粉含量较高,具有缓释

收稿日期:2023-04-18

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2023Y0788);国家自然科学基金资助项目(31760470);云南省“万人计划”青年拔尖人才专项项目(YNWR-QNBJ-2018-046);西南林业大学生物学质量工程项目(503190106)。

Foundation: Scientific and Research Fund Project of Yunnan Provincial Education Department (2023Y0788); National Natural Science Foundation of China (31760470); Yunnan Province's "Ten Thousand Talents Plan" Youth Top Talents Special Fund (YNWR-QNBJ-2018-046); Southwest Forestry University Biological Quality Engineering Project (503190106)。

第一作者:杨翦秋,女,硕士研究生,研究方向为食品加工与食品安全。

\*通信作者:范方宇,男,教授,博士,主要从事林下食品加工方面的研究。

性强、溶解性及溶胀性好等优点而备受关注<sup>[8]</sup>。天然木薯淀粉亲水性较强,需通过减小尺寸、疏水改性等手段使其成为乳化性良好的固体颗粒乳化剂。杨翦秋等<sup>[9]</sup>、姚先超等<sup>[10]</sup>证实了木薯纳米淀粉、木薯改性淀粉均具有较优的乳化性能。以木薯纳米淀粉、木薯改性淀粉稳定的 Pickering 乳液具有较大的应用潜力。目前有关木薯淀粉基乳液的研究集中于 Pickering 单乳液及纳米乳液,对于木薯纳米淀粉、木薯改性淀粉共稳定 Pickering 双重乳液的制备及其稳定性方面的研究鲜见报道。

姜黄素、花色苷是自然界中广泛存在的生物活性物质,具有多种保健作用,但二者化学稳定性较差,经人体消化系统处理后易降解失活,难以到达指定部位并缓慢释放,生物利用率低<sup>[11-14]</sup>。有研究证实,将姜黄素、花色苷单独负载于 Pickering 乳液中能显著提升其稳定性与生物利用率<sup>[5,7]</sup>。崔凤展<sup>[11]</sup>研究发现,将疏水性活性因子姜黄素和亲水性表没食子儿茶素没食子酸酯共同负载于乳清分离蛋白纤维基双重乳液中,双功能因子能发挥协同作用。此外,多酚化合物与黄酮类化合物复合,具有提升抗氧化性、降脂活性等功效<sup>[15]</sup>。因此,探索合适的 Pickering 双重乳液共运载体系,对提升姜黄素、花色苷的负载稳定性,改善其生物利用率,具有重要的实际意义。

本研究拟采用木薯纳米淀粉、木薯醋酸酯变性淀粉代替传统双重乳液乳化剂,制备同时负载花色苷、姜黄素的  $W_1/O/W_2$  型 Pickering 双重乳液;表征不同木薯醋酸酯变性淀粉质量分数的双重乳液的形态、粒径、Zeta 电位、负载率及贮藏稳定性;探讨经体外消化后富含活性物质双重乳液的保留率与生物利用率变化情况。本研究旨在为拓宽木薯淀粉的应用及食品级 Pickering 双重乳液的开发提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

木薯淀粉(食品级),江苏味门食品有限公司;木薯醋酸酯变性淀粉(食品级),杭州普罗星淀粉有限公司;调和油(大豆油 68%、菜籽油 21%、葵花籽油 4.5%、稻米油 3%、玉米油 2%、芝麻油 0.6%、花生油 0.5%、亚麻籽油 0.4%),益海嘉里粮油食品有限公司。

姜黄素(分析纯),上海麦克林生化科技股份有

限公司;蓝莓提取物(食品级),花色苷质量浓度 36%,山东圣嘉德生物科技有限公司;模拟唾液(pH 值 6.5)、模拟胃液(pH 值 2.0)、模拟肠液(pH 值 7.4),3 种模拟液均为分析纯,东莞市创峰自动化科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

XINYI-11D 型超声波细胞粉碎机,宁波新艺超声设备有限公司;FD5-3 型冷冻干燥机,美国 Gold-Sim 公司;FJ200-SH 型实验室数显高速分散均质机,上海沪析实业有限公司;UV-2600 型紫外可见分光光度计,日本岛津仪器有限公司;SK2009 型光学显微镜,深圳赛克电子科技有限公司;Zetasizer Nano ZS90 型激光粒度仪,英国 Malvern 仪器有限公司;SHZ-82 型恒温振荡器,上海力辰仪器科技有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 木薯纳米淀粉的制备

采用沉淀法制备木薯纳米淀粉<sup>[9]</sup>。称取 10.00 g 木薯淀粉与 200 mL 去离子水混合,100 r/min,100 °C 恒温搅拌 1 h 至淀粉完全糊化。待冷却至室温,455 W 超声 15 min,100 r/min 磁力搅拌 15 min,缓慢匀速注入 120 mL 无水乙醇。混合液 8 000 r/min 离心 10 min,沉淀加 20 mL 无水乙醇离心洗涤 3 次。冷冻干燥,得木薯纳米淀粉。

#### 1.3.2 淀粉颗粒接触角的测定

采用接触角/表面张力测试仪对样品的接触角进行测定。将 0.10 g 样品与 1 mL 去离子水混合,混合溶液浇筑于玻璃片,35 °C 干燥成膜。在膜表面缓慢滴入 2  $\mu$ L 去离子水,水滴稳定后,拍摄液滴图像并测量接触角。

#### 1.3.3 负载姜黄素/花色苷的 $W_1/O/W_2$ 型 Pickering 双重乳液的制备

参考文献[5],采用两步法制备负载姜黄素/花色苷的  $W_1/O/W_2$  型 Pickering 双重乳液(图 1)。取 0.02 g 蓝莓提取物与 100 mL 去离子水混匀,作为内层水相( $W_1$ )。将 0.001 g 姜黄素与 100 mL 调和油混匀,60 °C 恒温磁力搅拌 3 h 至姜黄素溶解,作为油相(O)。在 O 中加入木薯醋酸酯变性淀粉,以不同质量分数(3%、4%、5%、6%、7%)的木薯醋酸酯变性淀粉为内层颗粒乳化剂,70 °C 磁力搅拌 20 min。将 O、木薯醋酸酯变性淀粉混合液冷却至室温后加入  $W_1$ ,使 O 与  $W_1$  的体积比为 4:1,14 000 r/min 均质 2 min,得  $W_1/O$  初乳。

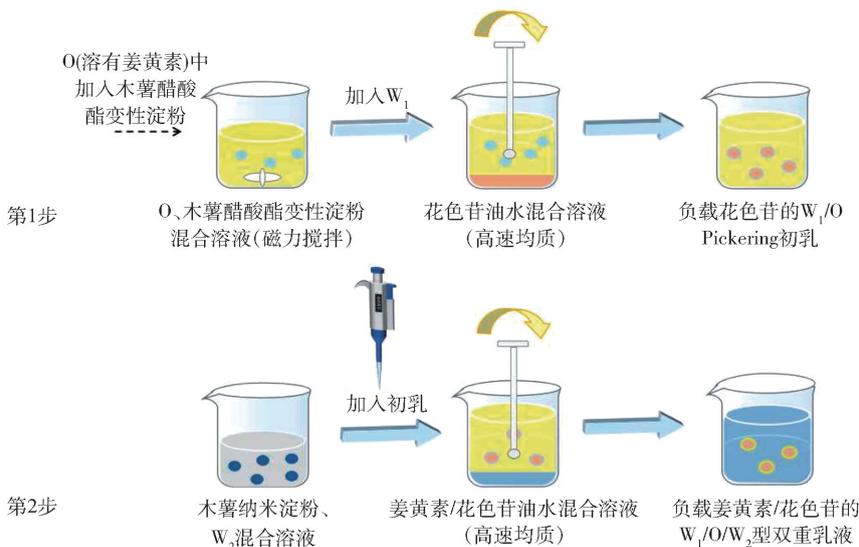


图1 双重乳液制备流程

Fig. 1 Preparation process of double emulsions

本研究团队前期发现,木薯纳米淀粉质量分数为 7.50%、油相体积分数为 50% 时,纳米淀粉基 Pickering 乳液综合性质最佳。因此,以质量分数为 7.50% 的木薯纳米淀粉为外层颗粒乳化剂,将其与去离子水( $W_2$ )混匀,50 °C 水浴 2 min。加入初乳,使 O 与  $W_2$  的体积比为 5:5,14 000 r/min 均质 3 min,得到负载姜黄素/花色苷的  $W_1/O/W_2$  型双重乳液。

### 1.3.4 淀粉颗粒及乳液粒径、Zeta 电位测定

将 0.10 g 淀粉颗粒或 0.1 mL 乳液(贮藏 48 h)与 1 mL 去离子水混合,随后超声处理(10 min、200 W)防止聚集。将分散均匀的样品放入粒度及电位分析仪对样品进行测量。测试参数:温度 25 °C,分散相为水(折射率 1.33),每个样品自动测定 3 次。

### 1.3.5 乳液显微形态观察

采用光学显微镜对乳液显微形态进行分析。分别吸取质量分数为 3%、4%、5%、6%、7% 的木薯醋酸酯变性淀粉乳液 1.00  $\mu$ L,用 5 倍蒸馏水稀释后置于载玻片。缓慢盖上盖玻片,防止气泡产生,固定于载物台,100 倍物镜油浸观察,放大倍数为 1 000。

### 1.3.6 乳液负载率测定

#### 1.3.6.1 姜黄素负载率计算

参考文献[5],绘制姜黄素标准曲线,得回归直线方程为  $y = 168.3x - 0.0985$ ,  $R^2 = 0.999$ 。取 1.00 mL 质地均匀的乳液与 4 mL 无水乙醇混合,涡旋 2 min,充分混匀后 4 000 r/min 离心 10 min,取 1.00 mL 上清液用无水乙醇稀释。以无水乙醇做空白对照,于 425 nm 处测定样品吸光度。根据标准曲线方程计算姜

黄素质量浓度。姜黄素负载率按式(1)计算。

$$\text{负载率} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $C_i$ ,初始添加的姜黄素或花色苷质量浓度,mg/mL; $C_f$ ,新鲜制备的乳液姜黄素或花色苷降解量,mg/mL。

#### 1.3.6.2 花色苷负载率计算

参考文献[7],采用 pH 示差法测定样品花色苷质量浓度。取 1.00 mL 质地均匀的乳液与 4 mL 蒸馏水混匀,涡旋 2 min,充分混匀后 4 000 r/min 离心 10 min。取 1.00 mL 下清液,分别用 pH 值为 1.00 的氯化钾-盐酸缓冲液和 pH 值为 4.50 的邻苯二甲酸氢钾-氢氧化钠缓冲液稀释。避光平衡 15 min,以蒸馏水做空白对照,在 510 nm 和 700 nm 处测定样品吸光度。花色苷质量浓度按式(2)计算,负载率参照式(1)计算。

$$C_0 = \frac{\Delta A \times Mr \times DF}{\varepsilon \times L} \quad (2)$$

式(2)中: $C_0$ ,花色苷质量浓度,mg/mL; $\Delta A$ ,吸光度值差,  $(A_{510 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH} 1.00} - (A_{510 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH} 4.50}$ ;  $Mr$ ,Cy-3-Glu 的相对分子质量,449.2;  $DF$ ,样品稀释倍数; $\varepsilon$ ,Cy-3-Glu 的摩尔消光系数,26 900 L/(mol·cm);  $L$ ,光程长,1 cm。

#### 1.3.7 姜黄素、花色苷保留率计算

参考文献[7],将质量分数为 6% 的木薯醋酸酯变性淀粉新鲜乳液分别置于低温(4 °C)、室温(25 °C)、高温(40 °C)下避光贮藏 20 d,观察乳液表

观形态的变化情况。每隔 4 d 按 1.3.6.1 和 1.3.6.2 中方法测定姜黄素、花色苷质量浓度。以保留率为指标,探究不同贮藏温度、贮藏时间对乳液负载稳定性的影响,保留率按式(3)计算。

$$\text{保留率} = \frac{C_t - C_s}{C_t} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: $C_t$ ,初始添加的姜黄素或花色苷质量浓度,mg/mL; $C_s$ ,一段时间后乳液中姜黄素或花色苷降解量,mg/mL。

### 1.3.8 姜黄素、花色苷生物利用率计算

体外消化实验参考文献[12],稍加修改。分别将姜黄素溶液(0.001 g 姜黄素与 100 mL 调和油混匀,60 °C 恒温磁力搅拌 3 h 至姜黄素溶解)、花色苷溶液(0.02 g 蓝莓提取物与 100 mL 去离子水均匀混合)以及质量分数 6% 的木薯醋酸酯变性淀粉乳液与模拟唾液按体积比 1:1 混合,置于恒温振荡器,37 °C、120 r/min 振荡 10 min 后测定样品姜黄素、花色苷质量浓度。将口腔消化产物与模拟胃液按体积比 1:1 混合,置于恒温振荡器,37 °C、120 r/min 振荡 2 h 后测定样品姜黄素、花色苷质量浓度。将胃消化产物与模拟肠液按体积比 1:1 混合,置于恒温振荡器,37 °C、120 r/min 振荡 2 h 后测定样品姜黄素、花色苷质量浓度。经模拟口腔、胃、肠消化后的消化产物以 10 000 r/min 离心 20 min,取 10.00 mL 上清液(姜黄素和花色苷的胶束或可溶性部分)测定姜黄素、花色苷质量浓度。每个时刻姜黄素、花色苷在体外模拟消化液中的保留率参照式(3)计算。采用式(4)计算生物利用率。

$$\text{生物利用率} = \frac{C_m}{C_i} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中: $C_m$ ,消化产物中姜黄素或花色苷质量浓度,mg/mL; $C_i$ ,未经消化乳液中姜黄素或花色苷的质量浓度,mg/mL。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 25.0 软件进行数据处理,Origin 2018 软件绘图,ANOVA 分析数据差异显著性( $P < 0.05$ ),Image J v1.8.0 计算显微图片中乳滴的粒径。所有实验均重复 3 次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 乳液及淀粉颗粒粒径、Zeta 电位分析

#### 2.1.1 淀粉颗粒粒径及 Zeta 电位分析

固体颗粒稳定 Pickering 乳液的综合能力取决

于固体颗粒自身性质(粒径、表面电荷、润湿性)以及颗粒间的相互作用等。固体颗粒粒径是影响 Pickering 乳液稳定性的重要因素之一。小粒径的固体颗粒在没有吸附阻力的情况下,吸附能力更强,可在两相界面快速堆积,形成稳定的乳液<sup>[5]</sup>。有研究证实,固体颗粒表面疏水性与 Zeta 电位绝对值之间存在显著正相关<sup>[16]</sup>。此外,Zeta 电位可在一定程度上对斯特恩双电层理论中带电固体表面相同符号电荷的数量及分散相粒子间相互作用力强度进行反映,其绝对值大小可表征分散体系的稳定性,绝对值越大,粒子间的静电斥力作用力越大,分散体系稳定性越强<sup>[10]</sup>。因此,颗粒的表面电荷不仅能解释颗粒在水中的分散状态,判断其亲水、疏水性,还与 Pickering 乳液的稳定性密切相关。淀粉颗粒粒径、Zeta 电位分析结果见表 1。由表 1 可知,相较于木薯淀粉,木薯纳米淀粉、木薯醋酸酯变性淀粉粒径均显著减小,电位绝对值显著增大( $P < 0.05$ ),且木薯醋酸酯变性淀粉电位绝对值最大。说明三者中木薯醋酸酯变性淀粉的表面疏水性最强,相较于木薯淀粉,木薯纳米淀粉、木薯醋酸酯变性淀粉具有更好的维持乳液稳定性的能力。

表 1 淀粉颗粒的粒径及 Zeta 电位

Tab. 1 Particle size and Zeta potential of starch particles

组别	粒径/nm	Zeta 电位/mV
木薯淀粉	14 002.50 ± 4.50 <sup>a</sup>	-15.5 ± 3.35 <sup>a</sup>
木薯纳米淀粉	75.92 ± 4.60 <sup>c</sup>	-21.14 ± 0.42 <sup>b</sup>
木薯醋酸酯变性淀粉	2 484.50 ± 44.50 <sup>b</sup>	-25.40 ± 0.50 <sup>c</sup>

不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ )。

#### 2.1.2 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对乳液粒径及 Zeta 电位的影响

添加不同质量分数木薯醋酸酯变性淀粉的乳液粒径及 Zeta 电位分析结果见图 2。由图 2(a)可知,木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为 3% ~ 7% 时, Pickering 乳液粒径为 3.65 ~ 9.69 μm,随木薯醋酸酯变性淀粉质量分数的增加,乳液粒径呈先减小后增大的趋势,质量分数为 6% 时,达到最小,为 3.65 μm。Zeta 电位可表示乳滴间相互排斥力或吸引力的强度,是度量分散系稳定性的重要指标。由图 2(b)可知,木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为 3% ~ 7% 时,Zeta 电位绝对值呈先增大后减小趋势;质量分数为 6% 时,电位绝对值最大,为 14.50 mV。

内层颗粒乳化剂质量分数较少时,不足以稳

定  $W_1/O$  油水界面,液滴间易发生碰撞、聚集,乳滴尺寸变大;随着稳定界面的颗粒质量分数增多,乳液内层液滴碰撞效率降低,分散相中乳滴不易聚结<sup>[17]</sup>。乳液的微观结构对乳液稳定性起着重要作用,乳滴粒径越小,两相界面表面积越大,连续相对乳滴的表面效应比例越小,乳液越稳定。随表面电荷积累,乳滴所带同种电荷增多(即 Zeta 电位绝对值变大),乳滴间相互排斥力增强,有助于抑制乳液絮凝与聚结,提升乳液稳定性<sup>[18]</sup>。质量分数过高(7%)时,多余的木薯醋酸酯变性淀粉聚集,碰撞加剧,造成液滴聚结<sup>[19]</sup>,粒径增大,Zeta 电位绝对值随之减小,不利于乳液体系的稳定性。因此,木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为 6% 时,乳液的稳定性最强。

直观反映, $\theta$  小于  $90^\circ$  时,固体颗粒优先被水润湿,形成水包油型(O/W)Pickering 乳液; $\theta$  大于  $90^\circ$  时,颗粒亲油性更强,形成油包水型(W/O)Pickering 乳液; $\theta$  在  $90^\circ$  左右,颗粒具有双亲性,有利于其在界面的有效吸附与排列,既可形成稳定的 O/W 型 Pickering 乳液又可形成 W/O 型 Pickering 乳液<sup>[5]</sup>。淀粉颗粒的接触角见图 3。由图 3 可知,木薯纳米淀粉、木薯醋酸酯变性淀粉的  $\theta$  分别为  $86^\circ$ 、 $92^\circ$ 。说明木薯纳米淀粉更加亲水,能用于稳定 O/W 型 Pickering 乳液;木薯醋酸酯变性淀粉中由于疏水酯基的引入,赋予了淀粉颗粒亲油性。本研究结果表明,木薯纳米淀粉、木薯醋酸酯变性淀粉可分别作为亲水、亲油性颗粒乳化剂稳定 O/W、W/O 型乳液。本研究结果旨在为后续制备淀粉基  $W_1/O/W_2$  型 Pickering 双重乳液提供理论依据。

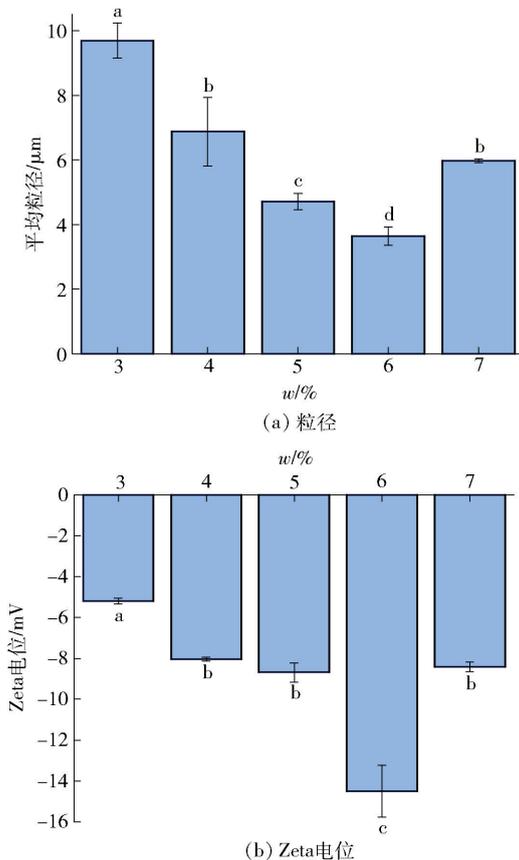


图2 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对乳液粒径及 Zeta 电位的影响

Fig. 2 Effects of mass fraction of cassava acetylated starch on particle size and Zeta potential of emulsions

### 2.1.3 淀粉颗粒粒径接触角分析

润湿性是确定乳液类型以及判断乳液能否形成的重要因素。表面润湿度可通过颗粒三相接触角  $\theta$

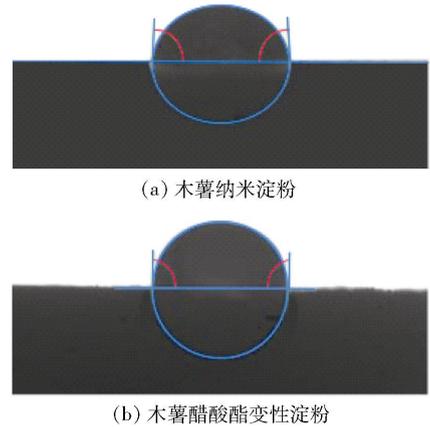


图3 木薯纳米淀粉、木薯醋酸酯变性淀粉接触角

Fig. 3 Contact angle of cassava nanostarch and cassava acetylated starch

## 2.2 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对乳液显微形态的影响

添加不同质量分数木薯醋酸酯变性淀粉的乳液显微形态见图 4。由图 4 可知,添加不同质量分数木薯醋酸酯变性淀粉的乳液,乳滴均由较大的球状油滴包裹着密集小液滴,分散于  $W_2$ 。乳滴形状规则,表面光滑,未见裂痕。最内层水相为粉色小液滴,表明  $W_1$  是花色苷水溶液,中间相为黄色,表明  $O$  是溶有姜黄素的油溶液。不同质量分数木薯醋酸酯变性淀粉乳滴均呈现出“三相两膜”多隔室结构。黄耀成<sup>[20]</sup>在制备乳清分离蛋白复合物稳定的负载原花青素 Pickering 双重乳液时也观察到了乳滴具有“三相两膜”的特点。本研究结果证实了典型  $W_1/O/W_2$  型 Pickering 双重乳液的形成。乳滴整体粒径为  $2.00 \sim 10.00 \mu\text{m}$ ,当木薯醋酸酯变性

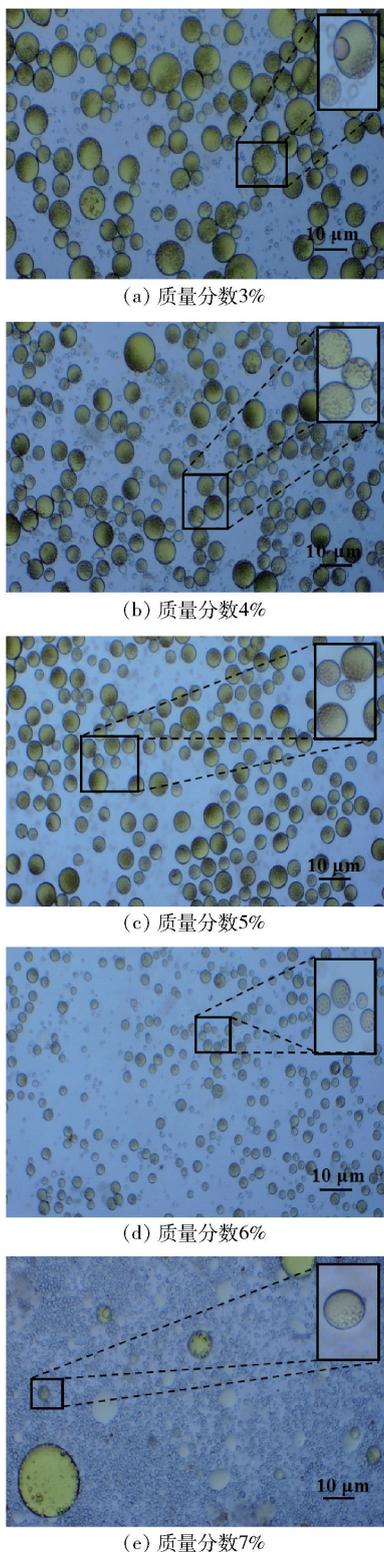


图 4 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对乳液显微形态的影响

Fig. 4 Effects of mass fraction of cassava acetylated starch on micro-morphology of emulsions

淀粉质量分数由 3% 增加至 6% 时, 乳滴分布趋于均匀, 粒径明显减小。木薯醋酸酯变性淀粉的质

量分数较低(3%、4%)时, 不足以形成致密的保护层覆盖  $W_1/O$  液滴表面, 为避免乳液体系失稳, 相邻液滴通过共用木薯醋酸酯变性淀粉分子层维持界面平衡<sup>[21]</sup>, 导致桥连絮凝现象出现, 形成大粒径乳滴。木薯醋酸酯变性淀粉质量分数增加至 7% 时, 出现较多未被包裹的水滴和油滴, 一方面在  $W_1/O$  初乳形成时, 过量的木薯醋酸酯变性淀粉于木薯纳米淀粉表面吸附, 使木薯纳米淀粉接触角发生改变无法稳定外界面; 另一方面在第 2 次乳化过程中, 木薯醋酸酯变性淀粉与木薯纳米淀粉争夺  $O/W_2$  吸附层, 木薯纳米淀粉吸附效率降低<sup>[22]</sup>。本研究结果证明, 木薯醋酸酯变性淀粉、木薯纳米淀粉能有效地为负载姜黄素、花色苷的 Pickering 双重乳液共递送体系提供稳定作用。

### 2.3 乳液功能特性分析

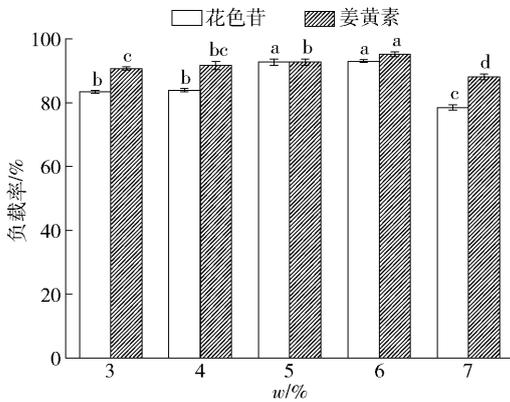
#### 2.3.1 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对乳液中姜黄素、花色苷负载率的影响

添加不同质量分数木薯醋酸酯变性淀粉的乳液, 对姜黄素、花色苷的负载率见图 5。由图 5 可知, 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为 3% ~ 7% 时, 花色苷和姜黄素的负载率呈先上升后下降的趋势。原因是木薯醋酸酯变性淀粉质量分数过低(3% ~ 5%), 不足以覆盖液滴表面; 质量分数过高(7%), 会导致液滴聚集, 都会造成活性成分的外逸。添加不同质量分数木薯醋酸酯变性淀粉的乳液, 姜黄素负载率为 88.04% ~ 95.23%, 花色苷负载率为 78.47% ~ 93.00%。木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为 6% 时, 姜黄素、花色苷的负载率均最大, 分别为 95.23%、93.00%。在姜黄素<sup>[23]</sup>、花色苷<sup>[1]</sup>单独负载于双重乳液的报道中, 二者负载率分别为  $88.00\% \pm 2.00\%$ 、 $82.99\% \pm 2.38\%$ 。本实验结果略高, 说明共运载体系可提升对姜黄素、花色苷的负载稳定性, 体现了淀粉基双重乳液共运载体系高效负载的优势。本研究结果表明, 木薯纳米淀粉质量分数为 7.5%, 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为 6% 的条件下, 能支撑淀粉颗粒在乳液内、外双重界面不可逆吸附, 形成致密的保护膜, 有效抑制姜黄素、花色苷泄漏, 赋予双重乳液对姜黄素、花色苷更稳定的负载。

#### 2.3.2 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对乳液贮藏稳定性的影响

##### 2.3.2.1 不同贮藏温度时木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对乳液表现形态的影响

添加不同质量分数木薯醋酸酯变性淀粉的乳液



不同小写字母表示组间差异显著。

图5 木薯醋酸酯变性淀粉质量分数对姜黄素、花色苷负载率的影响

Fig. 5 Effects of mass fraction of cassava acetylated starch on encapsulation efficiency of curcumin and anthocyanin

在4、25、40℃贮藏20d的表现形态变化见图6。由图6(a)可知,25℃放置1h的新鲜乳液,在木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为3%~6%时,可形成均匀的乳液体系,表现出半固态凝胶特性;质量分数增加到7%后,由于固体颗粒浓度过高,内层液滴布朗运动加剧,在短时间内出现明显絮凝现象,导致乳液体系失稳<sup>[24]</sup>。由图6(b)至(d)可知,随贮藏时间延长至20d,不同木薯醋酸酯变性淀粉质量分数、不同温度条件下,所有乳液的半固态凝胶性均消失,呈流动性,这是由于姜黄素、花色苷的外逸破坏了乳液原有的三维网络结构而造成的。此外,在3种温度下,贮藏20d,随木薯醋酸酯变性淀粉质量分数由3%增加至6%,乳液分层现象均逐渐减弱。一方面是因为乳滴尺寸减小,在重力作用下,外水相沉降速度减缓。Chen等<sup>[25]</sup>也证实了乳滴尺寸越小,奥斯特瓦尔德熟化速率越慢,乳液体系相对稳定。另一方面,油相中分散的木薯醋酸酯变性淀粉越多,黏度越大,乳液体系越趋于稳定。在4℃条件下贮藏20d,木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为3%~5%的乳液较为稳定,出现轻微分层;质量分数6%的乳液未见明显分层,仍能保持均一体系。但40℃和25℃的贮藏条件下,由于温度升高导致乳液中紧密堆积的液滴与乳滴逐渐分散,乳液上层出现浮油,下层沉淀明显,并伴有轻微油脂酸败味。

结合不同木薯醋酸酯变性淀粉质量分数的Pickering双重乳液的显微形态、粒径、Zeta电位、负载率、贮藏过程表现形态变化的分析结果,发现木薯



(a) 25℃贮藏1h



(b) 4℃贮藏20d



(c) 25℃贮藏20d



(d) 40℃贮藏20d

图6 不同温度和木薯醋酸酯变性淀粉质量分数条件下乳液贮藏前后表现形态变化

Fig. 6 Changes of emulsions apparent morphology before and after storage under different temperature and cassava acetylated starch mass fraction

醋酸酯变性淀粉质量分数为6%时,双重乳液展示出最优性能。故选择6%为木薯醋酸酯变性淀粉质量分数,分析不同贮藏温度与时间的乳液中姜黄素、花色苷的负载稳定性,并进行体外模拟消化实验,探究姜黄素、花色苷在体外消化过程中保留率的变化

规律及生物利用率。

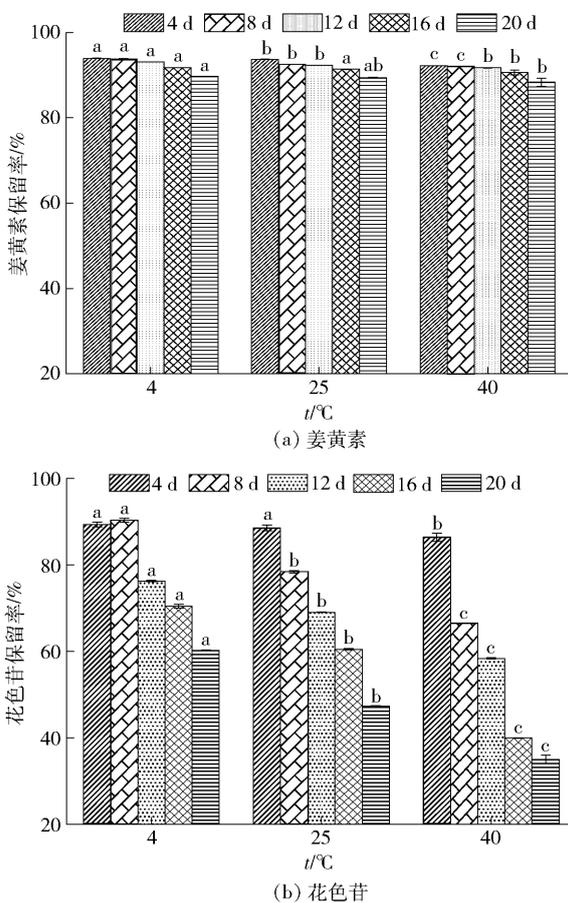
### 2.3.2.2 乳液对姜黄素、花色苷的负载稳定性分析

木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为6%时,乳液在4、25、40℃贮藏20d,姜黄素、花色苷的负载稳定性见图7。由7(a)可知,随贮藏时间的延长,姜黄素的保留率逐渐降低。原因可能是随着姜黄素在O/W<sub>2</sub>油水界面的累积,因疏水相互作用、范德华力等作用力<sup>[26]</sup>,木薯纳米淀粉的润湿性发生改变,导致姜黄素的负载稳定性下降。在不同温度贮藏20d,乳液均具有较高的姜黄素保留率(>83.00%)。尤其是在4℃条件下,20d后仅有约10%的姜黄素泄漏,相较于25、40℃时贮藏的乳液,姜黄素保留率的降幅较小。可能是因为低温抑制了乳滴间的相互碰撞频率,使乳液贮藏稳定性得到提高<sup>[27]</sup>。随着温度升高,乳液体系中的热运动加剧,三维网络结构分散直至乳液体系失稳,姜黄素逐渐析出,而高温下游离的姜黄素不稳定,易发生降解。

由图7(b)可知,与姜黄素保留率的规律一致,添加不同质量分数的木薯醋酸酯变性淀粉的乳液,随时间的延长,乳液中花色苷保留率降低。这也符合Rabeio等<sup>[28]</sup>报道的W/O型纳米乳液中花色苷保留率随贮藏时间变化的规律。不同温度贮藏20d后,花色苷的保留率由高到低依次为:4℃(60.21%)、25℃(47.32%)、40℃(34.93%)。林晓瑛<sup>[7]</sup>以蓖麻醇酯为乳化剂制备W/O型乳液,并对花色苷进行负载,40℃贮藏6d后乳液中已检测不出花色苷。该结果略低于本实验结果,体现出共递送双重乳液运载体系在功能因子负载稳定方面较好的优势。猜想是由于双重乳液中花色苷被负载于最内层水相,可很大程度地减少外界环境对其结构和稳定性的影响<sup>[11]</sup>。此外,油相中的姜黄素也能对花色苷起到保护作用。结果表明,不同贮藏温度与贮藏时间对双重乳液中姜黄素、花色苷具有协同保护作用,随着温度的升高和时间的延长,乳液物理稳定性越差,负载稳定性越差。

### 2.3.3 负载姜黄素、花色苷的双重乳液体外消化特性分析

双重乳液最大优势是可同时亲水、亲油功能成分进行负载,将功能因子送到指定部位并缓慢释放,有效避免活性物质在消化过程中降解,达到提升活性物质作用时间、效果的目的<sup>[29]</sup>。木薯醋酸酯变性淀粉质量分数为6%时,乳液在模拟口腔、胃、肠消化中姜黄素、花色苷的保留率变化情况见表2。



不同小写字母表示组间数据差异显著。

图7 不同贮藏温度和时间条件下的乳液中姜黄素、花色苷的负载稳定性

Fig. 7 Encapsulation stability of curcumin and anthocyanin in emulsions under different storage temperatures and times

表2 模拟消化过程乳液中姜黄素、花色苷的保留率  
Tab. 2 Retention rate of curcumin and anthocyanin in emulsions during simulated digestion process

组别	%		
	模拟唾液	模拟胃液	模拟肠液
姜黄素	81.08 ± 0.015 <sup>a</sup>	77.23 ± 0.04 <sup>b</sup>	54.95 ± 0.09 <sup>c</sup>
花色苷	91.63 ± 0.015 <sup>b</sup>	88.93 ± 0.05 <sup>b</sup>	80.71 ± 0.08 <sup>c</sup>

不同小写字母表示组间数据差异显著 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.3.3.1 模拟唾液消化情况

由表2可知,模拟口腔消化后,姜黄素、花色苷保留率较高,但仍有小部分被降解。这可能是淀粉颗粒在模拟唾液中 $\alpha$ -淀粉酶的催化作用下发生水解反应被消化所造成的。淀粉水解导致乳滴结构塌陷,液滴释放到W<sub>2</sub>,O向周围水相扩散或聚结<sup>[1]</sup>,姜黄素、花色苷失去保护,部分被降解。

### 2.3.3.2 模拟胃液消化情况

由表2可知,与口腔消化相比,经模拟胃消化后,姜黄素、花色苷的保留率变化不明显。原因是模拟胃液中未加入淀粉类酶,淀粉颗粒抵抗胃消化的能力较强,乳滴被破坏程度很小。同时,木薯淀粉基双重乳液形成的油水混合小乳滴具有特殊的致密凝胶网络结构,能有效抵抗胃酸侵蚀<sup>[30]</sup>。有研究结果证实,花色苷在酸性条件下由半缩酮转化为烺盐阳离子,呈相对稳定状态,在模拟胃消化过程中仅有部分被降解<sup>[31]</sup>。Flores等<sup>[32]</sup>在研究中也发现双重乳液受模拟胃液影响很小。

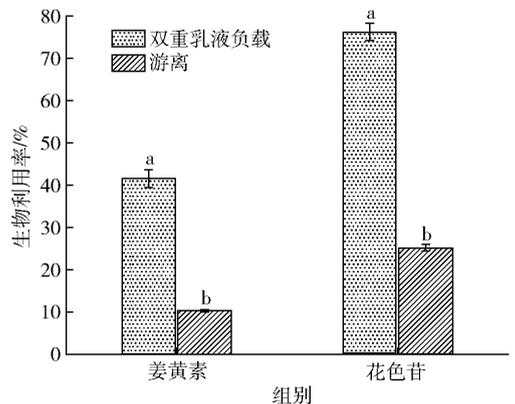
### 2.3.3.3 模拟肠液消化情况

由表2可知,消化未完全的产物进入小肠,与含有胆盐、磷脂、胰蛋白酶等的模拟肠液混合。消化2h后,姜黄素、花色苷降解率达到最大,保留率显著减小( $P < 0.05$ )。说明淀粉基双重乳液在模拟消化中活性成分的降解主要发生在肠消化阶段。原因是在肠消化过程中,具有表面活性功能的胆盐和磷脂逐渐吸附于乳滴表面,促进了食物残渣中脂质的消化。同时在胰蛋白酶的作用下,O进一步被乳化分解,导致O/W<sub>2</sub>、W<sub>1</sub>/O界面无法稳定吸附乳化剂,双重乳液结构被严重破坏<sup>[30]</sup>。此外,由于模拟消化液pH值以及离子强度的变化,消化液中带电粒子在木薯醋酸酯变性淀粉、木薯纳米淀粉表面吸附,使界面性质发生改变,颗粒乳化剂的稳定能力受到影响<sup>[1]</sup>。这些因素都会造成活性成分大量外泄。失去保护的姜黄素在模拟肠液中被快速降解,花色苷也因在模拟肠液碱性环境下以不稳定的甲醇假碱形式存在<sup>[31]</sup>,稳定性大大降低而被降解。

### 2.3.3.4 姜黄素、花色苷体外生物利用率分析

生物利用率是指人体消化后,物质在人体内可发挥生理功能部分的比例,即消化完成后某物质经小肠吸收并到达体细胞的比例<sup>[33]</sup>。本实验结果表明,在双重乳液完成整个模拟消化后,仍有超过一半的姜黄素、花色苷游离于肠液中。乳液在模拟消化后姜黄素、花色苷的生物利用率见图8。由图8可知,姜黄素、花色苷生物利用率分别为41.59%、76.29%,与本实验测得游离姜黄素、花色苷的生物利用率相比(10.27%、25.18%),显著提升约4倍、3倍( $P < 0.05$ )。这是因为,姜黄素存在于消化产物所形成的胶束中心,胶束结构能增加姜黄素溶解度,对保护姜黄素以及提高其生物利用率起到一定作用。花色苷与消化产物中的脂质分子相互作用,可

更完全地进入胶束结构,同时姜黄素作为一种抗氧化剂能保护内层水相中的花色苷在模拟消化环境中免受降解,使花色苷生物利用率高效提升<sup>[11]</sup>。此外,共运载乳液体系在模拟消化系统中结构较稳定,可保护活性物质免受降解,而游离姜黄素和花色苷在消化系统中生物利用率较低,主要是其水溶性与化学稳定性较差所导致。有研究证实,双重乳液中活性功能因子与乳化剂间的疏水作用和络合作用,能起到延缓释放、确保较低扩散速率与较高生物利用率的作用<sup>[29]</sup>。本研究结果表明,木薯淀粉基W<sub>1</sub>/O/W<sub>2</sub>型Pickering双重乳液在模拟消化过程中能为姜黄素、花色苷提供屏障和保护作用,有效提升姜黄素、花色苷在体内的生物利用率,有利于二者后续的吸收利用与生理功能发挥,是一种具有发展潜力的运载体系。



不同小写字母表示组内数据差异显著。

图8 模拟消化后乳液中姜黄素和花色苷的生物利用率

Fig. 8 Bioaccessibility of curcumin and anthocyanin in emulsions after simulated digestion

## 3 结论

本研究以木薯纳米淀粉、木薯醋酸酯变性淀粉为固体颗粒乳化剂构建的食品级负载姜黄素/花色苷淀粉基W<sub>1</sub>/O/W<sub>2</sub>型Pickering双重乳液体系,对姜黄素、花色苷具有较高的包埋率(95.23%、93.00%)和较好的贮藏稳定性。体外模拟消化表明,木薯淀粉基W<sub>1</sub>/O/W<sub>2</sub>型Pickering双重乳液共运载体系所具有的特殊“三相两膜”多隔室结构可有效避免姜黄素、花色苷两种不同特性活性物相互作用所引起的生物活性降低,保护姜黄素、花色苷免受消化环境降解,并将二者的生物利用率显著提升至41.59%、76.29%( $P < 0.05$ )。本研究结果证实,

木薯淀粉基 Pickering 双重乳液是一种潜在的、具有良好缓释递送功能的微型载体系统。双重乳液的形成机理以及功能因子间的协同作用有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 徐伟丽, 张玉琪, 朱元昊, 等. 包覆花色苷 W<sub>1</sub>/O/W<sub>2</sub>型乳液的消化特性及其缓释效果[J]. 食品科学, 2020, 41(10):1-7.  
XU W L, ZHANG Y Q, ZHU Y H, et al. Digestion properties and controlled release of anthocyanins-loaded water-in-oil-in-water double emulsions stabilized by polyglycerol polyricinoleate and casein sodium[J]. Food Science, 2020, 41(10):1-7.
- [2] CHEN X, MCCLEMENTS D J, WANG J, et al. Coencapsulation of (-)-epigallocatechin-3-gallate and quercetin in particle-stabilized W/O/W emulsion gels: controlled release and bioaccessibility[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(14): 3691-3699.
- [3] QI L, LUO Z, LU X. Facile synthesis of starch-based nanoparticle stabilized Pickering emulsion; its pH-responsive behavior and application for recyclable catalysis[J]. Green Chemistry, 2018, 20(7): 1538-1550.
- [4] WANG Y, ZHU L, ZHANG H, et al. Formulation of pH and temperature dual-responsive Pickering emulsion stabilized by chitosan-based microgel for recyclable biocatalysis[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116373.
- [5] 张羽. 基于玉米醇溶蛋白/大米淀粉构建皮克林乳液及其营养输送特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.  
ZHANG Y. Construction of Pickering emulsion based on zein/rice starch and research of its nutrient delivery characteristics[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [6] ANDRADE J, WRIGHT A J, CORREDIG M. *In vitro* digestion behavior of water-in-oil-in-water emulsions with gelled oil-water inner phases[J]. Food Research International, 2018, 105: 41-51.
- [7] 林晓瑛. 花色苷双重皮克林乳液的制备及其稳定性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
LIN X Y. Preparation and stability of anthocyanins double Pickering emulsion[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [8] 史永桂. 木薯淀粉纳米颗粒结晶性控制及载药研究[D]. 南宁: 广西民族大学, 2022.  
SHI Y G. Crystallinity control and drug loading of tapioca starch nanoparticles[D]. Nanning: Guangxi Minzu University, 2022.
- [9] 杨翦秋, 毕会敏, 范方宇. 木薯纳米淀粉的制备及理化性能研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(5):243-248.  
YANG J Q, BI H M, FAN F Y. Study on preparation and emulsification of cassava starch nanoparticles[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(5):243-248.
- [10] 姚先超, 史永桂, 焦思宇, 等. 食用级淀粉纳米颗粒乙酰化疏水改性及其消化特性[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 25-33.  
YAO X C, SHI Y G, JIAO S Y, et al. Hydrophobic modification of food-grade starch nanoparticles by acetylation and its digestion characteristics[J]. Food Science, 2022, 43(12): 25-33.
- [11] 崔凤展. 乳清分离蛋白纤维 Pickering 乳液体系的构建及其递送功能因子的应用[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.  
CUI F Z. Construction of whey protein isolate fibrils Pickering emulsion and its application for delivery of functional ingredients[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2022.
- [12] 方艾虎, 王越溪, 杨宗韞, 等. 负载姜黄素的高浓度乳化物对乳化肠品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(5): 23-31.  
FANG A H, WANG Y X, YANG Z W, et al. Study on properties of high concentration emulsion loaded curcumin and its influence on quality of emulsified sausages[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(5): 23-31.
- [13] 徐伟丽, 穆韡, 鲁兆新, 等. 负载葡萄皮粉花色苷提取物的 W/O/W 型复乳制备及其体外消化评价[J]. 中国食品学报, 2021, 21(2): 213-220.  
XU W L, MU W, LU Z X, et al. Formation and *in vitro* digestion of W/O/W emulsions loading anthocyanin extract from grape skin powder[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2021, 21(2): 213-220.
- [14] DAVID L, DANCIU V, MOLDOVAN B, et al. Effects of *in vitro* gastrointestinal digestion on the antioxidant capacity and anthocyanin content of cornelian cherry fruit extract[J]. Antioxidants, 2019, 8(5): 114.
- [15] 康杰. 甜樱桃多酚和杏鲍菇多糖、黄酮对高血脂和肥胖模型小鼠的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021.  
KANG J. Effects of sweet cherry polyphenols, *Pleurotus eryngii* polysaccharides and flavonoids on hyperlipidemia

- and obesity model mice[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021.
- [16] 齐宝坤, 李杨, 王中江, 等. 不同品种大豆分离蛋白 Zeta 电位和粒径分布与表面疏水性的关系[J]. 食品科学, 2017, 38(3): 114–118.
- QI B K, LI Y, WANG Z J, et al. Relationship between surface hydrophobicity and Zeta potential as well as particle size distribution of soybean protein isolates from different varieties[J]. Food Science, 2017, 38(3): 114–118.
- [17] 刘灿灿, 孙潇鹏, 李坚斌, 等. 球磨-酯化复合改性 槟榔芋淀粉对 Pickering 乳液形成的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(3): 101–110.
- LIU C C, SUN X P, LI J B, et al. Effect of compound modified areca taro starch with ball milling and esterification on formation of Pickering emulsions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(3): 101–110.
- [18] ZHANG L, XIONG T, WANG X F, et al. Pickering emulsifiers based on enzymatically modified quinoa starches: preparation, microstructures, hydrophilic property and emulsifying property [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 190: 130–140.
- [19] 范方宇, 赵国瑜, 黄瑾, 等. 改性纳米 SiO<sub>2</sub>-壳聚糖 乳液的制备及性质研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(5): 1–9.
- FAN F Y, ZHAO G Y, HUANG J, et al. Preparation and properties of modified nano SiO<sub>2</sub>-chitosan emulsion [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2021, 41(5): 1–9.
- [20] 黄耀成. W/O/W 双重乳液的制备及其对葡萄籽原 花青素负载作用的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- HUANG Y C. Preparation of W/O/W double emulsion and its loading effect on grape seed proanthocyanidins W/O/W[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [21] 余振宇. OSA 改性芋头淀粉基 Pickering 乳液载体 体系稳定机制及其特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大 学, 2020.
- YU Z Y. Stabilization mechanism and characteristics of Pickering emulsion delivery system based on OSA modified taro starch[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [22] XIAO J, LU X, HUANG Q. Double emulsion derived from kafirin nanoparticles stabilized Pickering emulsion; fabrication, microstructure, stability and *in vitro* digestion profile[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 62: 230–238.
- [23] ADITYA N P, ADITYA S, YANG H, et al. Co-delivery of hydrophobic curcumin and hydrophilic catechin by a water-in-oil-in-water double emulsion[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 7–13.
- [24] LUO Y, WANG Q. Zein-based micro-and nano-particles for drug and nutrient delivery: a review[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(16).
- [25] CHEN Z, SHU G, TAARJI N, et al. Gypenosides as natural emulsifiers for oil-in-water nanoemulsions loaded with astaxanthin: insights of formulation, stability and release properties [J]. Food Chemistry, 2018, 261: 322.
- [26] TAN H, ZHANG R, HAN L, et al. Pickering emulsions stabilized by aminated gelatin nanoparticles: are gelatin nanoparticles acting as genuine Pickering stabilizers or structuring agents? [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107151.
- [27] WEI Y, TONG Z, DAI L, et al. Influence of interfacial compositions on the microstructure, physicochemical stability, lipid digestion and  $\beta$ -carotene bioaccessibility of Pickering emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105738.
- [28] RABEIO C A S, TAARJI N, KHALID N, et al. Formulation and characterization of water-in-oil nanoemulsions loaded with açai berry anthocyanins: insights of degradation kinetics and stability evaluation of anthocyanins and nanoemulsions[J]. Food Research International, 2018, 106: 542–548.
- [29] 杨洁. 淀粉基双乳液的构建及其对虾青素的递送机制[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- YANG J. Construction of starch-based double emulsions and its delivery mechanism of astaxanthin [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [30] BORREANI J, ESPERT M, SALVADOR A, et al. Oil-in-water emulsions stabilised by cellulose ethers: stability, structure and *in vitro* digestion[J]. Food & Function, 2017, 8(4): 1547–1557.
- [31] 马小强. 黑豆皮花色苷活性评价与递送体系研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- MA X Q. Study on activity evaluation and delivery systems of anthocyanins from black soybean peel [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.

- [32] FLORES F P, SINGH R K, KERR W L, et al. Total phenolics content and antioxidant capacities of microencapsulated blueberry anthocyanins during *in vitro* digestion[J]. Food Chemistry, 2014, 153: 272 – 278.
- [33] 陈兴. 槲皮素-食品乳液体系的构建及其生物可利用

性[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.

CHEN X. Fabrication and bioavailability of quercetin-food emulsion systems[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.

## Preparation and Properties of Cassava Starch-Based $W_1/O/W_2$ Pickering Double Emulsions Loading Curcumin/Anthocyanin

YANG Jianqiu, BI Huimin, FAN Fangyu\*

(College of Life Science, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Food grade  $W_1/O/W_2$  Pickering double emulsions was prepared by using cassava nanostarch and cassava acetylated starch as the particle emulsifier, which were loaded with curcumin and anthocyanin on the inner water phase and oil phase, respectively. The effects of different mass fraction of cassava acetylated starch on the micro-morphology, particle size, Zeta potential, encapsulation efficiency and storage stability of the double emulsions were investigated, and its controlled release properties during *in vitro* digestion was analyzed. The results showed that at 6% of cassava acetylated starch, the comprehensive properties of double emulsions were better than that of other samples. The droplet distribution of emulsions was relatively uniform, and exhibited a “three-phase two membrane” structure. Particle size was 3.65  $\mu\text{m}$ , Zeta potential was -14.50 mV, the encapsulation efficiency of curcumin and anthocyanin reached 95.23% and 93.00%, respectively, and there was no layering phenomenon after 20 d storage at 4  $^{\circ}\text{C}$ , 25  $^{\circ}\text{C}$ , or 40  $^{\circ}\text{C}$ . After simulated digestion, the retention efficiency of curcumin and anthocyanin were 41.59% and 76.29%, respectively. Compared with free curcumin and anthocyanin, their bioaccessibility increased by about 4 times and 3 times, which indicated that cassava starch-based double emulsions effectively protected active substance against simulated digestive system, and improved its bioaccessibility. The research results aimed to provide theoretical reference for the construction of functional starch-based emulsion delivery system in food industry and the creation of novel food grade Pickering double emulsions.

**Keywords:** curcumin; anthocyanin; starch-based Pickering double emulsions; encapsulation efficiency; *in vitro* digestion

(责任编辑:叶红波)