

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.12.017

# 芸豆蛋白-罗勒籽胶复合乳液凝胶 对叶黄素的包埋及递送研究

陈寒青, 郑琪, 崔如佳, 陈梦婷, 李莎怡静

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**叶黄素是一种天然类胡萝卜素,在肿瘤与心血管类等疾病的预防方面发挥着重要作用,但因叶黄素在极端环境下极易发生化学降解,阻碍了其在食品加工中的应用。为提高叶黄素的稳定性,文章对包埋叶黄素的芸豆蛋白-罗勒籽胶共稳定的 O/W 乳液和冷固型乳液凝胶进行了表征。结果表明,葡萄糖酸- $\delta$ -内酯和柠檬酸钠双重诱导的乳液凝胶显著提高了叶黄素在储藏、高温和紫外光照条件下的包埋稳定性。同时,通过构建体外消化模型,证明了柠檬酸钠诱导形成的乳液凝胶易被消化,具有较高的可溶性蛋白质量分数和游离脂肪酸释放量,从而改善了叶黄素的生物可及性。因此,芸豆蛋白-罗勒籽胶复合冷固型乳液凝胶可作为包埋叶黄素的良好载体,广泛应用于活性物质的递送和功能食品等领域。

**关键词:**芸豆蛋白;罗勒籽胶;冷固型乳液凝胶;葡萄糖酸- $\delta$ -内酯;柠檬酸钠;叶黄素;包埋率;生物可及性  
**中图分类号:**TS201.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)12-1699-08

## Encapsulation and delivery of lutein by kidney bean protein-basil seed gum composite emulsion gels

CHEN Hanqing, ZHENG Qi, CUI Rujia, CHEN Mengting, LI Shayijing

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Lutein is a natural carotenoid pigment, which plays an important role in the prevention of tumors and cardiovascular diseases. However, lutein is easily degraded in extreme environments, hindering its application in food processing. In order to improve the stability of lutein, the lutein loaded O/W emulsions and cold-set emulsion gels co-stabilized by kidney bean protein and basil seed gum were characterized. The results showed that the emulsion gels dually induced by glucono- $\delta$ -lactone and sodium citrate significantly improved the encapsulation stability of the lutein under UV light, high temperature and storage conditions. Meanwhile, by constructing an *in vitro* digestion model, it was proved that sodium citrate-induced emulsion gels were easily digested, and had higher soluble protein content and free fatty acid release, thus improving the bioaccessibility of the lutein. Consequently, the kidney bean protein-basil seed gum composite cold-set emulsion gels can be used as a high-quality carrier for embedding lutein in the fields of the delivery of active substances and functional foods.

**Key words:** kidney bean protein; basil seed gum; cold-set emulsion gel; glucono- $\delta$ -lactone; sodium citrate; lutein; encapsulation rate; bioaccessibility

叶黄素是一种天然类胡萝卜素,存在于果蔬和花卉植物中,可预防因视网膜黄斑病变而造

成的失明、人体衰老引发的心血管硬化等疾病<sup>[1-2]</sup>,但其稳定性及溶解性差,使其生物利用率

收稿日期:2022-04-15;修回日期:2022-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31972977);安徽省科技重大专项资助项目(202103a06020001)

作者简介:陈寒青(1970—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail: hanqchen@hfut.edu.cn.

降低,人直接服用叶黄素类产品难以在短期内产生疗效,因此在食品加工和应用中常受到限制<sup>[3]</sup>。

因为乳液凝胶具有良好的包埋稳定性以及控制释放等优点<sup>[4]</sup>,所以通过乳液凝胶的包埋来实现叶黄素的递送将是有效的办法。乳液凝胶是由乳液分散体和凝胶相结合形成的复杂胶体材料,由稳定的乳液液滴填充到凝胶连续相中产生<sup>[5-6]</sup>。乳液凝胶的形成与凝胶基质、油相分数与诱导方式有关,其中常见的诱导方式有酸诱导与盐诱导。酸诱导乳液凝胶的形成机理为预热聚集的蛋白质分子吸附到液滴的表面使乳液液滴聚集并嵌入凝胶基质中,该过程与氢键、疏水相互作用的形成有关,而盐诱导乳液凝胶的形成主要是蛋白质包裹的油滴之间的“桥联”作用,此过程与盐离子浓度、蛋白质的聚集程度等有关<sup>[7]</sup>。因此,不同诱导方式的乳液凝胶的结构存在差异,从而对功能活性物质的负载率、稳定性、消化行为等方面产生不同影响。

芸豆中富含大量球蛋白,具有增强人体免疫力、提高抗病能力、调节血压和血脂等多种功效<sup>[8]</sup>。此外,芸豆蛋白(KPI)具有良好的起泡性、乳化性、热稳定性和凝胶形成能力<sup>[9]</sup>。芸豆蛋白虽是优质的植物蛋白,但其溶解性较差且对环境因素敏感<sup>[10]</sup>,采用多糖与蛋白质复配处理可改善芸豆蛋白的功能特性。罗勒籽胶是一种新型水胶体,相比于黄原胶和瓜尔胶等其他的水胶体,具有优良的乳化性与凝胶性<sup>[11]</sup>。由于罗勒籽胶在加热和冻融处理过程中稳定,其在食品工业中广泛作为增稠剂、乳化剂和胶凝剂<sup>[12]</sup>。已有研究表明,作为两性生物聚合物的蛋白质和多糖,可以通过静电排斥和空间位阻防止乳液体系中液滴的絮凝和聚结,从而促进稳定的运输载体的构建<sup>[13-14]</sup>。因此,蛋白质-多糖共稳定的乳液体系在改善疏水活性物质的水溶性、化学稳定性和生物可及性方面具有一定的潜力。

本文旨在以芸豆蛋白和罗勒籽胶为原料制备复合乳液,并通过 2% 葡萄糖酸- $\delta$ -内酯(GDL)或(和)20 mmol/L 柠檬酸钠(SC)诱导形成稳定的冷固型乳液凝胶,将其作为叶黄素的包埋载体,测定叶黄素的包埋率、负载率以及在紫外光照、高温和储藏条件下的包埋稳定性,并通过构建体外消化模型测定凝胶的溶胀率、可溶性蛋白与游离脂肪酸质量分数以及叶黄素的保留率和生物可及性。本研究为蛋白多糖复合冷固型乳液凝胶作为脂溶性功能物质的递送载体提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

白芸豆(北京金禾绿源农业科技有限公司);罗勒籽(亳州贾宴食品商店);大豆油(上海益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司);叶黄素(HPLC  $\geq$  80%)、脂肪酶(30 000 U/g)、胃蛋白酶(3 000 U/g)、猪胆盐(60%)、胰蛋白酶(4 000 U/g)、黏蛋白等生化试剂均购于源叶生物;葡萄糖酸- $\delta$ -内酯(GDL)、柠檬酸钠、无水乙醇等均为分析纯,均购于国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

T6 新悦紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司);Z326K 高速冷冻离心机(德国 HERMLE 公司);KQ-400KDE 高功率数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司);WE-3 水浴恒温振荡器(天津欧诺仪器仪表有限公司);T-18 高速分散机(德国 IKA 公司);FD-12-50 冷冻干燥机(北京博医康实验仪器有限公司)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 芸豆蛋白的提取

将脱壳的白芸豆干燥后粉碎,并通过石油醚脱脂,每 5 mL 石油醚加 1 g 豆粉处理 3 次,然后将脱脂粉用 10 倍体积的蒸馏水进行分散。该分散液用 2 mol/L 的 NaOH 将 pH 值调至 8.0,并磁力搅拌 2 h,然后在 4 °C 下以 9 500 r/min 的转速离心 30 min 得到上清液。使用 2 mol/L HCl 将上清液的 pH 值调节至 4.6,并在相同条件下离心 30 min,将获得的沉淀物以体积比 1:100 的比例分散在蒸馏水中,并调节 pH 值至中性<sup>[15]</sup>,倒入截留分子量为 6~8 kDa 的透析袋中于 4 °C 下透析 48 h,冻干得到芸豆蛋白<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.2 罗勒籽胶的提取

将罗勒籽与蒸馏水以质量比 1:50 的比例混合,调节蒸馏水 pH 值为 8.0,并在 68 °C 下以 1 000 r/min 的转速搅拌 20 min,使籽充分溶胀后刮去种子表面的胶层。在胶体溶液中加入 3 倍体积的 95% 乙醇,静置 24 h 后离心得到沉淀,并将其复溶于水,倒入培养皿中于 50 °C 烘箱中烘干。

#### 1.3.3 复合热聚集体的制备

向 8% 的芸豆蛋白溶液中添加 0.2% 罗勒籽胶,并使用 0.5 mol/L 的 NaOH 和 HCl 溶液调整 pH 值为中性,制备混合溶液,将溶液混匀后在 85 °C 下加热 60 min 形成热聚集体,冷却至室温

备用。

### 1.3.4 复合 O/W 乳液的制备

将叶黄素粉末溶于大豆油中,制备为 0.5% 的溶液,然后以 10% 的体积分数添加到热聚集体溶液中,并在 13 500 r/min 转速下高速剪切均质 3 min,形成 O/W 型乳液,简称乳液。

### 1.3.5 包埋叶黄素的冷固型乳液凝胶的制备

将 2%GDL 或(和)20 mmol/L 柠檬酸钠添加到乳液中形成包埋叶黄素的 GDL 单独诱导、柠檬酸钠单独诱导以及柠檬酸钠/GDL 双重诱导的复合冷固型乳液凝胶,分别用 GDL-Gel、SC-Gel、SC/GDL-Gel 表示。

### 1.3.6 乳液凝胶包埋率和负载率的测定

称取 0.2 g 冻干的 SC-Gel、GDL-Gel、SC/GDL-Gel,加入 5 mL 无水乙醇,并在超声处理 30 min 后,将样品于 4 500 r/min 下离心 15 min。分离乙醇相,并重复萃取直至所有混合的乙醇相在 448 nm 波长处的吸光度维持稳定。使用紫外可见分光光度计进行分析,并绘制标准曲线计算叶黄素质量浓度<sup>[17-19]</sup>,如图 1 所示。

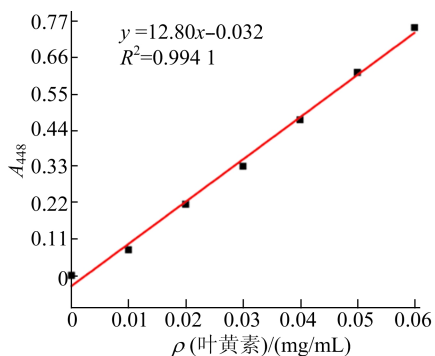


图 1 叶黄素质量浓度标准曲线

$$m(\text{叶黄素}) = (A_{448} - 0.0702) / 13.58 \quad (1)$$

$$\text{包埋率} = \frac{\text{包埋叶黄素质量}}{\rho_{\text{总叶黄素质量}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{负载率} = \frac{\text{负载叶黄素质量}}{\text{凝胶质量}} \times 100\% \quad (3)$$

### 1.3.7 乳液凝胶包埋稳定性的测定

将冻干的乳液和乳液凝胶粉末放置在紫外灯(20 W)下照射不同时间,分别取经过 0、0.5、1、2、4、6、12 h 照射后的样品,测定叶黄素对紫外线的稳定性。

将 O/W 乳液、SC-Gel、GDL-Gel、SC/GDL-Gel 在 65 °C 下加热处理 7 d,每隔 1 d 取 1 次样,测定叶黄素的热稳定性。

将 O/W 乳液、SC-Gel、GDL-Gel、SC/GDL-Gel

在 4、25 °C 下储藏 7 d,每隔 1 d 取 1 次样,测定叶黄素的储藏稳定性,并用叶黄素的乙醇溶液为对照,样品中叶黄素质量分数的计算公式为:

$$\omega(\text{叶黄素}) = \frac{\rho(t \text{ 天时叶黄素})}{\rho(\text{凝胶中叶黄素})} \times 100\% \quad (4)$$

### 1.3.8 包埋叶黄素的乳液凝胶体外消化性

1) 体外消化模型的建立。在 1.5 g 乳液凝胶中加入 10 mL 模拟唾液(0.159 4% NaCl、0.020 2% KCl 和 0.020 0% 黏蛋白),然后在恒温振荡器中进行反应 10 min(100 r/min, 37 °C)。反应完成后,将消化物以 1:1 的体积比加入模拟胃液(0.200 0% NaCl、0.320 0% 胃蛋白酶, 2 mol/L HCl 调节 pH 值至 1.5)中,并在相同条件下振荡 2 h。模拟胃消化后,用 0.05 mol/L NaOH 调节消化物的 pH 值至 7 以终止消化。最后,将胃消化物以 1:1 的体积比添加到模拟肠液(0.680 0% K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>、0.877 5% NaCl、1% 胆盐、0.040 0% 胰蛋白酶和 0.320 0% 脂肪酶)中,在相同条件下振荡 4 h 后,利用冰水浴终止消化反应<sup>[20]</sup>。

2) 溶胀。称取 1.5 g 的凝胶放入 5 mL 烧杯中,称量凝胶质量  $m_0$  和凝胶与烧杯的质量  $m_1$ 。向烧杯中缓慢加入 2.5 mL 不含酶的模拟胃液和模拟肠液,并在 12 h 后将消化液倒出,称量浸泡后凝胶与烧杯的质量  $m_2$ 。

溶胀度通过浸泡前后质量差异来表示,溶胀率<sup>[21]</sup>计算公式为:

$$\text{溶胀率} = (m_2 - m_1) / m_0 \times 100\% \quad (5)$$

3) 可溶性蛋白质质量分数测定。将 1.5 g 凝胶放入模拟胃液中进行消化,取不同消化阶段的样品在 15 000 r/min 离心 15 min 后收集 0.2 mL 上清液。基于牛血清白蛋白溶液的标准曲线  $y = 0.077x - 0.026$ ,如图 2 所示。

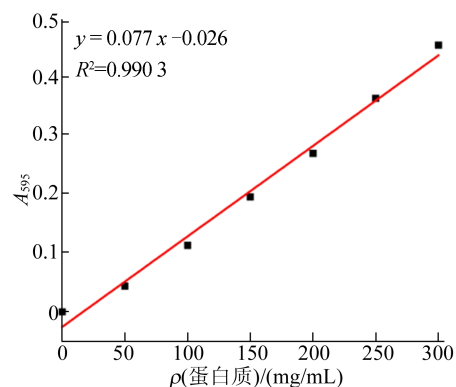


图 2 蛋白质质量浓度标准曲线

通过 Bradford 定量法测定蛋白质质量分数<sup>[22]</sup>,

摇匀并放置 20 min 后,在紫外分光光度计中于波长 595 nm 下测定吸光度。可溶性蛋白质质量分数计算公式为:

$$\omega_{(\text{可溶性蛋白})} = \frac{\omega_S}{\omega_A} \times 100\% \quad (6)$$

其中: $\omega_S$  为上清液中的蛋白质质量分数; $\omega_A$  为凝胶的总蛋白质质量分数。

4) 游离脂肪(FFA) 释放测定。取不同阶段模拟肠消化过程中的消化物 1 mL,滴加 1 mol/L 的 NaOH 溶液,使 pH 值保持在 7.0,并记录消化过程中添加 NaOH 溶液的体积<sup>[23]</sup>。FFA 释放量计算公式为:

$$\text{FFA 释放量} = \frac{V_{\text{NaOH}} c_{\text{NaOH}} m_{\text{lipid}} \times 10^{-3}}{2m_{\text{lipid}}} \times 100\% \quad (7)$$

其中: $V_{\text{NaOH}}$  为 NaOH 添加量; $c_{\text{NaOH}}$  为 NaOH 溶液的浓度; $m_{\text{lipid}}$  为大豆油的平均相对分子量; $m_{\text{lipid}}$  为小肠相中油的质量。

5) 叶黄素保留率和生物可及性的测定。在乳液凝胶模拟消化过程中,每隔 30 min 取出 2 mL 的消化物,并立即离心 15 min(4 °C, 15 000 r/min) 以收集食糜和消化最终阶段的透明胶束级分(上清液),向食糜和非胶束级分中加入无水乙醇,依照 1.3.6 节方法萃取叶黄素<sup>[24-25]</sup>,每个实验重复 3 次。

$$\text{保留率} = \frac{\text{食糜中叶黄素质量}}{\text{原叶黄素质量}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{生物可及性} = \frac{\text{胶原中叶黄素质量}}{\text{原叶黄素质量}} \times 100\% \quad (9)$$

#### 1.4 数据统计分析

所有数据均为 3 个样本测定的平均值,采用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行方差分析,每组数据用(平均值 ± 标准差)表示,组间的差异使用 Tukey 检验, $P < 0.05$  具有统计学意义。利用 Origin 2017 软件对处理好的数据进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合乳液凝胶外观分析

O/W 乳液、SC-Gel、GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel 样品倒置 30 min 后的外观如图 3 所示。

从图 3 可以看出,包埋叶黄素的 O/W 乳液具有较强的流动性,而 GDL 和柠檬酸钠均成功诱导乳液凝胶的形成,且不同诱导方式形成的复合乳液凝胶外观上无明显差异。

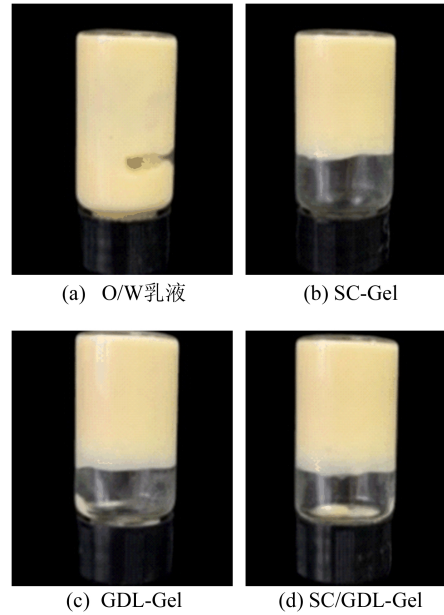


图 3 乳液凝胶的外观

### 2.2 乳液凝胶对包埋率和负载率的影响

包埋率和负载率的结果如图 4 所示。图 4 中,字母 a、b 表示样品间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

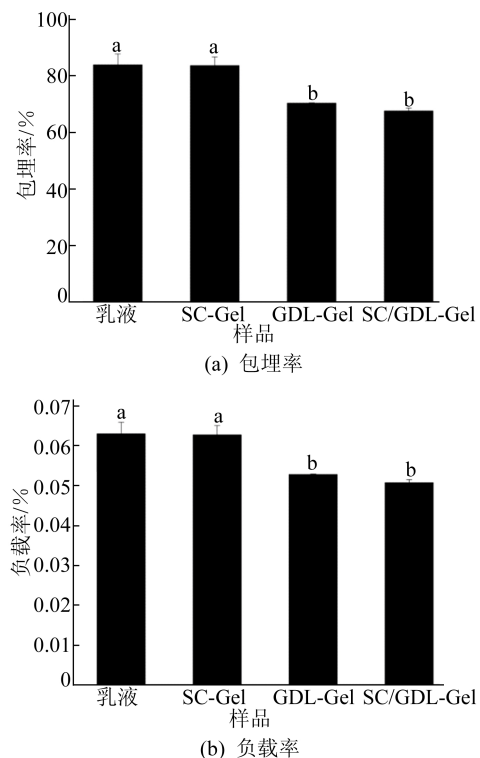


图 4 乳液凝胶对叶黄素的包埋率和负载率

由图 4 可知,SC-Gel 对叶黄素的包埋率达  $83.65\% \pm 3.13\%$ ,负载率达  $0.064\% \pm 0.003\%$ ,可见其对叶黄素的包埋和负载效果优于 GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel。由于叶黄素在酸性条

件下不稳定<sup>[26]</sup>,使得 pH 值为 4 的 GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel 对叶黄素的包埋率和负载率降低。而 SC-Gel 的 pH 值呈中性,在此条件下叶黄素较为稳定,故包埋效果较好。

### 2.3 乳液凝胶包埋叶黄素的稳定性分析

#### 2.3.1 储藏稳定性分析

将包埋叶黄素的乳液体系置于 4 °C 和 25 °C 下避光保存 7 d,叶黄素的储存稳定性结果如图 5a、图 5b 所示。

在 4 °C 下,随着时间延长,乳液中叶黄素的保留率在 7 d 后下降了约 23%,其损失率大于乳液凝胶,表现出较差的包埋稳定性。此外,GDL-Gel 的储藏稳定性最好,7 d 后损失了 15% 的叶黄素,表明其结构不易被破坏,能更好地保护叶黄素不被降解。其次,在 25 °C 下保存 7 d 后,乳液体系中叶黄素的保留率均小于 70%,证明 4 °C 下更有利于乳液和乳液凝胶保护叶黄素。

#### 2.3.2 热稳定性分析

一方面,加热处理会促进乳液液滴的絮凝和聚结,导致乳液体系的稳定性下降。另一方面,加热会致使叶黄素发生热降解,从而降低叶黄素的稳定性。在包埋叶黄素的乳液体系于 65 °C 加热 7 d 后,叶黄素的损失率显著增大,如图 5c 所示。其中与单纯叶黄素相比,乳液和乳液凝胶均很好地保护叶黄素免受 65 °C 加热环境的影响,且 SC-Gel 较高的包埋率和负载率,表现出良好的保护叶黄素的效果。

#### 2.3.3 紫外光照稳定性分析

由于叶黄素结构中存在共轭双键,其在紫外光照的诱导下极易氧化裂解或异构化<sup>[27-28]</sup>。包埋叶黄素的乳液凝胶置于紫外灯下照射 12 h 的保留率如图 5d 所示。相较于乳液,乳液凝胶中的叶黄素保留率均有所降低,其中 GDL-Gel 的包埋率下降了约 40%,远小于单纯的叶黄素,说明 GDL-Gel 有利于减轻紫外光下叶黄素的降解与异构化现象。相比之下,虽然乳液的包埋率较高,但随着不断的照射,乳液中叶黄素的保留率降幅显著增大,而乳液凝胶的网络结构可捕获叶黄素,使叶黄素免受紫外光照的负面影响。此外,叶黄素在酸性条件下不稳定,因此 SC-Gel 包埋叶黄素的包埋稳定性优于 GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel。

综合包埋稳定性的结果,由于包埋叶黄素的乳液在不同环境下不稳定,在后续体外消化实验中不再测定乳液样品。

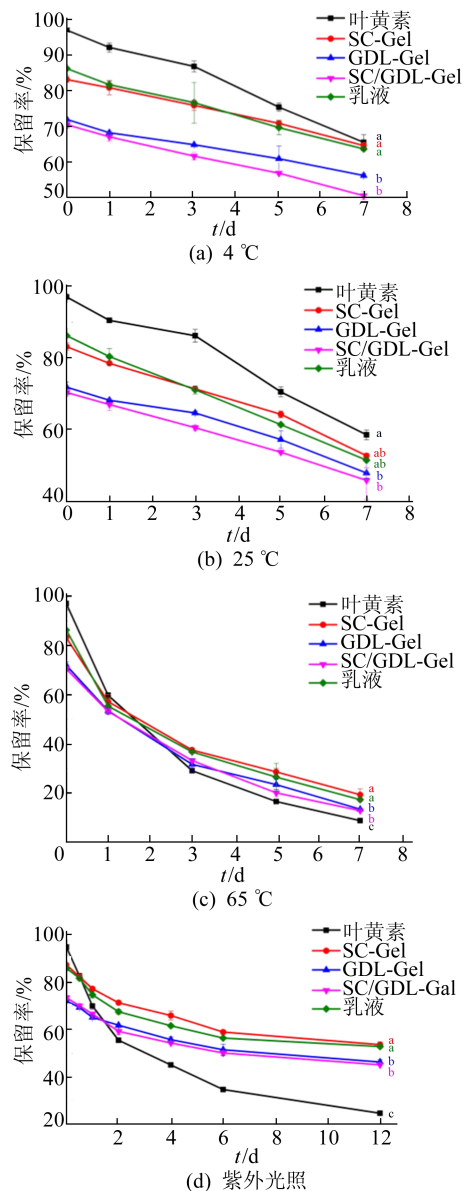


图 5 不同条件对叶黄素保留率的影响

### 2.4 溶胀率

SC-Gel、GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel 在无消化酶的模拟胃液与肠液中的溶胀率如图 6 所示。由于乳液凝胶的溶胀率与氨基密切相关,氨基质子化后分子链产生斥力导致三维网络的展开<sup>[29]</sup>,大量水分子渗入填充空隙,最终引起凝胶的溶胀行为。GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel 在模拟胃液中的溶胀率分别为  $27.75\% \pm 0.85\%$  和  $17.37\% \pm 0.84\%$ ,远高于在肠液中的溶胀率。这可能是由于酸性乳液凝胶在 pH 值为 1.5 的环境下更易遭到酸的侵入,凝胶基质中的亲水基团与水产生相互作用。此外,在 pH 值接近蛋白质等电点的条件下,蛋白质易聚集,使得凝胶网络结构空隙增大<sup>[30]</sup>,而又因 GDL 与柠檬酸钠的双重诱导使得

凝胶结构更加有序且灵活,因此 SC/GDL-Gel 的溶胀率降低。而在 pH 值为中性的模拟肠液中, SC-Gel 的溶胀率高于 GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel,说明 SC-Gel 在肠消化中更易通过水的吸收将消化酶带入凝胶中,以提高凝胶的消化率。

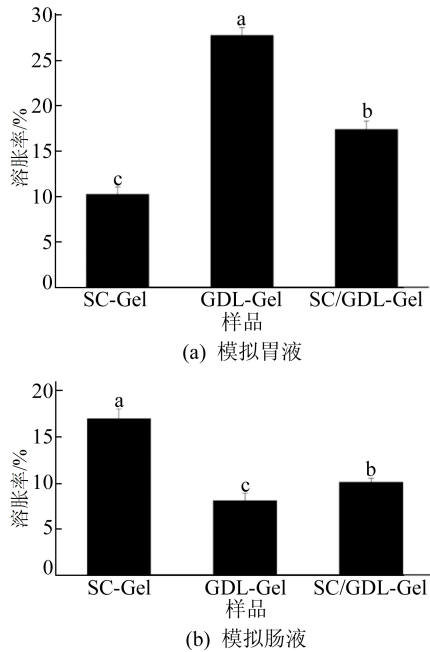


图 6 乳液凝胶在模拟胃液与模拟肠液中的溶胀率

## 2.5 乳液凝胶的体外消化特性分析

### 2.5.1 可溶性蛋白质质量分数

通过模拟胃消化阶段的可溶性蛋白质质量分数变化曲线如图 7 所示。

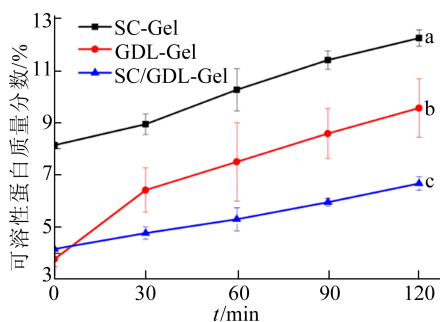


图 7 乳液凝胶的可溶性蛋白质质量分数

由图 7 可知,在胃消化初始阶段,GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel 的可溶性蛋白质质量分数显著低于 SC-Gel,但经过 30 min 的消化后,GDL-Gel 的可溶性蛋白质质量分数增加至  $6.42\% \pm 0.84\%$ ,而 SC/GDL-Gel 可溶性蛋白质质量分数仅为  $4.77\% \pm 0.24\%$ 。在胃消化 120 min 的最终阶段,SC-Gel 可溶性蛋白质质量分数达到  $12.25\% \pm 0.32\%$ ,远

高于 GDL 诱导的乳液凝胶。由于 GDL 使芸豆蛋白凝胶的 pH 值更接近蛋白质的等电点,此时复合体系内部存在较弱的静电斥力促进了蛋白质聚集体的形成,乳液凝胶具有较高的凝胶强度,难以消化分解<sup>[31]</sup>。此外,GDL 和柠檬酸钠协同促进了刚性凝胶网络的形成,因此不易消化的双重诱导凝胶的可溶性蛋白质质量分数降低。

### 2.5.2 乳液凝胶的游离脂肪酸释放量

在肠消化阶段,附着在乳液凝胶表面的脂肪酶通过水解脂质,生成甘油二酯、甘油一酯、甘油和游离脂肪酸 FFA,因此乳液凝胶的消化程度越高,其内部油滴释放量越多,从而导致 FFA 的释放量提高,FFA 的释放量曲线如图 8 所示。

首先在初始消化的 10 min 内,由于油滴处于快速消化阶段,包埋叶黄素的部分液滴发生聚结,导致液滴外层的芸豆蛋白-罗勒籽胶聚集体未完全包裹住油滴,使得乳液液滴更易于暴露并被消化分解。在 1 min 后 FFA 的释放速度减慢,此时乳液凝胶在肠消化中所释放的油滴失去了油/水界面层的保护,促使大尺寸油滴的形成,降低了脂质酶解程度<sup>[32]</sup>。在肠消化结束后,SC-Gel 的最终 FFA 质量分数相较于其他凝胶样品高,表明 SC-Gel 易被消化,而 GDL-Gel 中 FFA 释放较少,证明 GDL 诱导促进较强凝胶结构的形成,导致捕获油滴的三维网络不易被破坏。

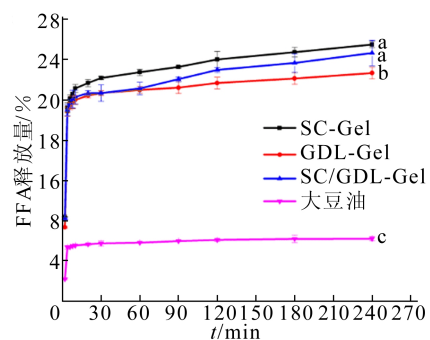


图 8 乳液凝胶的 FFA 释放量

此外,由于乳液体系在制备过程中经均质处理,使大豆油剪切形成小液滴,并被生物聚合物包被,乳液液滴具有更多与消化酶结合的位点。因此,即使游离的大豆油直接暴露于消化液中,其接触面积较小也会阻碍 FFA 的释放。

### 2.5.3 叶黄素的保留率和生物可及性

乳液凝胶包埋叶黄素的体外消化保留率与生物可及性如图 9 所示。

由图 9a 可知,GDL-Gel 对叶黄素在消化过程

中的保护效果优于 SC/GDL-Gel 和 SC-Gel,这与 GDL 诱导的高凝胶强度的网络结构有效减少叶黄素的损失有关。

生物可及性是指溶解在混合胶束中并可通过小肠壁被人体吸收利用的叶黄素质量分数<sup>[33]</sup>。由图 9b 可知,包埋在柔软易消化的 SC-Gel 中叶黄素的生物可及性为 32.64% ± 3.84%。这说明 SC-Gel 可作为亲脂性物质的传递载体,以提高叶黄素的生物可及性。

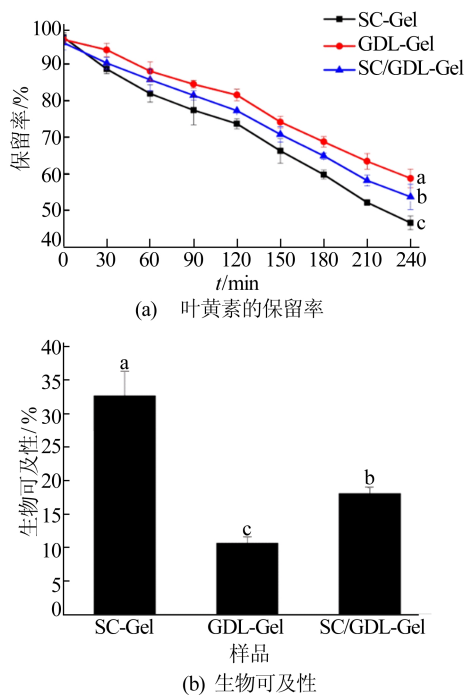


图 9 乳液凝胶包埋叶黄素的体外消化保留率与生物可及性

### 3 结 论

本研究制备了 GDL 或(和)柠檬酸钠诱导的 KPI-BSG 复合冷固型乳液凝胶,并作为叶黄素的包埋递送载体。结果表明,SC-Gel 对叶黄素的包埋效果较好,而 GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel 在储藏、高温、紫外光照下表现出较高的包埋稳定性,其网络结构能更好地保护叶黄素免受降解。其次,不同的乳液凝胶都保持一定的溶胀率,有利于乳液凝胶的消化和叶黄素的释放。通过构建体外消化模型得到 SC-Gel 可更好地提高叶黄素的生物可及性,分别比 GDL-Gel 和 SC/GDL-Gel 提高约 15% 和 12%。研究结果表明,芸豆蛋白-罗勒籽胶复合冷固型乳液凝胶可实现叶黄素在胃中的保护和在肠道中的缓慢释放,以改善叶黄素的稳定性和生物可及性。本研究可为蛋白质多糖复合冷

固型乳液凝胶作为叶黄素递送载体提供理论基础和新见解,今后进一步研究包埋叶黄素的乳液凝胶在体内的消化行为。

### [参 考 文 献]

- [1] 肖亚冬,李大婧,刘春泉,等. 叶黄素,β-隐黄质及其异构体检测方法的研究[J]. 现代食品科技,2016,32(2):330-335.
- [2] 尤新. 食品抗氧化剂与人体健康[J]. 食品与生物技术学报,2006,25(2):1-7.
- [3] 郭静,胡坦,潘思轶. 食品运载体系包埋叶黄素的研究进展[J]. 食品科学,2022,43(1):313-320.
- [4] 刘洋. 大豆蛋白纳米颗粒稳定的乳液及其油凝胶性质[D]. 无锡:江南大学,2016.
- [5] 冯有楠,苏春霞,叶晶,等. 乳液凝胶的力学性质及应用研究进展[J]. 中国食品学报,2018,18(11):268-276.
- [6] 庞淑敬. 松香基小分子有机凝胶的制备及性能研究[D]. 无锡:江南大学,2021.
- [7] 崔梦楠,鹿瑶,高彦祥,等. 食品乳液凝胶的制备及其应用研究进展[J]. 食品科学,2019,40(3):323-329.
- [8] 易丽莎,李雨臻,吴智华,等. 代表性新型植物源蛋白的应用概况[J]. 植物学研究,2019,8(2):151-157.
- [9] 梁珊,高小丽,户月秀,等. 芸豆蛋白的理化功能特性研究[J]. 中国粮油学报,2015,30(12):43-48.
- [10] 陈振家,王晓闻,荆旭,等. 不同温度处理对红芸豆蛋白热稳定性及结构的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(19):306-312.
- [11] YANG Q, WANG Y R, LI-SHA Y J, et al. The effects of basil seed gum on the physicochemical and structural properties of arachin gel[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110:106189.
- [12] ZAMENI A, KASHANINEJAD M, AALAMI M, et al. Effect of thermal and freezing treatments on rheological, textural and color properties of basil seed gum[J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(9):5914-5921.
- [13] 汪少芸,冯雅梅,伍久林,等. 蛋白质多糖多尺度复合物结构的形成机制及其应用前景[J]. 食品科学,2021,42(17):1-9.
- [14] WEI Y, ZHOU D, MACKIE A, et al. Stability, Interfacial structure, and gastrointestinal digestion of β-carotene-loaded Pickering emulsions co-stabilized by particles, a biopolymer, and a surfactant[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(5):1619-1636.
- [15] 范静美. 壳聚糖/植物蛋白复合膜材料的构建与性质研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- [16] 王炳懿. 多酚南瓜籽分离蛋白共价修饰反应机理及应用[D]. 天津:天津科技大学,2020.
- [17] 常影,焦岩,刘庆松,等. 玉米肽负载叶黄素纳米粒的结构表征及释放性能研究[J]. 食品科技,2021,46(2):238-243.
- [18] 焦岩,韩赫,常影,等. 玉米醇溶蛋白负载叶黄素纳米粒的制备与表征[J]. 食品与机械,2019,35(7):7-12,97.

(下转第 1728 页)

- et al. Hollow-core fiber with nested anti-resonant tubes for low-loss THz guidance[J]. Optics Communications, 2018, 180: 477-482.
- [24] SUN S, SHI W, SHENG Q, et al. Investigation of mode couplings between core and cladding of terahertz antiresonant fibres[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2021, 54(18): 7.
- [25] MENG M, YAN D X, YUAN Z W, et al. Novel double negative curvature elliptical aperture core fiber for terahertz wave transmission[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2021, 54(23): 7.
- [26] BRECHET F, MARCOU J, PAGNOUX D, et al. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method[J]. Optical Fiber Technology: Materials, Devices and Systems, 2000, 6(2): 181-191.
- [27] SELLERI S, ZOBO L. Performance comparison of finite-element approaches for electromagnetic waveguides[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science and Vision, 1997, 14(7): 1460-1466.
- [28] KHANARIAN G, CELANESE H. Optical properties of cyclic olefin copolymers [J]. Optical Engineering, 2001, 40(6): 1024-1029.
- [29] POLETTI F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 23807-23828.

(责任编辑 胡亚敏)

## (上接第 1705 页)

- [19] WANG X, DING Z, ZHAO Y N, et al. Effects of lutein particle size in embedding emulsions on encapsulation efficiency, storage stability, and dissolution rate of microencapsules through spray drying[J]. LWT, 2021, 146: 111430.
- [20] 梁秀萍. 乳清分离蛋白海藻酸钠乳液递送体系的设计及其对番茄红素稳态化的机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [21] 闫勇. 多酚蛋白糖共价复合物稳定叶黄素乳液的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- [22] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [23] 潘怡. 酰化接枝双改性乳清蛋白基纳米乳液的制备及应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [24] 李琳, 赵倩, 闻汉康, 等. 半乳甘露聚糖聚(N-异丙基丙烯酰胺)复合水凝胶的制备与性能[J]. 林业工程学报, 2021, 6(5): 120-127.
- [25] MA J, HUNG X, YIN S, et al. Bioavailability of quercetin in zein-based colloidal particles-stabilized Pickering emulsions investigated by the in vitro digestion coupled with Caco-2 cell monolayer model[J]. Food Chemistry, 2021, 360(30): 130-152.
- [26] 陈艾霖, 林琼妮, 张若兰, 等. pH和热处理对负载叶黄素的尼罗罗非鱼分离蛋白乳液贮藏稳定性和体外消化的影响[J]. 水产学报, 2023, 47(8): 189-201.
- [27] 冯慧敏. 玉米纤维胶在叶黄素纳米乳液中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [28] 夏书芹, 李雪琦, 姚宽, 等. 叶黄素微胶囊的制备及稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 274(10): 59-63.
- [29] 王燕. 自组装壳聚糖 Pickering 乳液对其负载  $\beta$ -胡萝卜素的稳定性研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2020.
- [30] 贾润红. pH对糖基化花生蛋白乳化特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(3): 107-110.
- [31] 刘圣雅, 彭媛媛, 张甫生, 等. 酸诱导对大豆蛋白/高酯果胶复合体系凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(6): 104-109.
- [32] 高雅馨. 乳铁蛋白肉桂酸复合沙棘籽油凝胶的制备及其消化特性的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [33] HU Y, LIU F, PANG J X, et al. Biopolymer additives enhance tangeretin bioavailability in emulsion-based delivery systems: an *in vitro* and *in vivo* study[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 69(2): 730-740.

(责任编辑 张 镗)