

新型番茄红素微胶囊的制备及稳定性评价

陈雨露, 吕沛峰, 袁芳*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 分别以菊粉、麦芽糊精、海藻糖为壁材, 以包埋番茄红素的乳清分离蛋白-壳聚糖双层乳液为芯材, 使用喷雾干燥法制备番茄红素微胶囊。探究不同壁材、芯壁质量比对微胶囊包埋率、微观形貌、贮藏稳定性以及在酸性饮料模拟介质中稳定性、体外模拟释放的影响, 以确定最佳新型番茄红素微胶囊的制备条件。结果表明: 不同微胶囊的包埋率稳定在72.97%~81.90%之间, 所有样品均呈现出典型的球状结构; 随着芯壁质量比的降低, 微胶囊中的番茄红素在贮藏期和酸性环境下的物化稳定性均明显增加; 与菊粉相比, 以麦芽糊精和海藻糖为壁材的微胶囊可实现番茄红素在模拟胃肠液中的控制释放。本研究有助于进一步开发番茄红素递送载体, 从而促进其产业化应用。

关键词: 麦芽糊精; 海藻糖; 菊粉; 番茄红素微胶囊; 喷雾干燥; 稳定性评价

Preparation and Stability Evaluation of Novel Lycopene Microcapsules

CHEN Yulu, LÜ Peifeng, YUAN Fang*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Lycopene microcapsules were prepared by spray drying using inulin, maltodextrin or trehalose at different concentrations as the wall material, and a whey protein isolate (WPI)-chitosan bilayer emulsion containing lycopene as the core material. The encapsulation efficiency, microscopic appearance, stability during storage and in a model acidic beverage medium, and *in vitro* simulated release characteristics of microcapsules were evaluated as a function of wall material type and core-to-wall-material ratio (*m/m*) to determine the optimal preparation conditions. Under all conditions investigated, the encapsulation efficiency of microcapsules were in the range of 72.97%–81.90% and all samples prepared exhibited a typical spherical structure; with the decrease in core-to-wall-material ratio, the physicochemical stability of microencapsulated lycopene increased significantly both during storage and in the acidic environment ($P < 0.05$). Controlled release of microencapsulated lycopene in simulated gastrointestinal fluid was observed with maltodextrin and trehalose as the wall material in comparison with inulin. The results in this study will help develop a novel carrier for the delivery of lycopene in order to enhance its industrial application.

Keywords: maltodextrin; trehalose; inulin; lycopene microcapsules; spray drying; stability evaluation

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200907-098

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2021)19-0134-07

引文格式:

陈雨露, 吕沛峰, 袁芳. 新型番茄红素微胶囊的制备及稳定性评价[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 134-140. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200907-098. <http://www.spkx.net.cn>

CHEN Yulu, LÜ Peifeng, YUAN Fang. Preparation and stability evaluation of novel lycopene microcapsules[J]. Food Science, 2021, 42(19): 134-140. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200907-098. <http://www.spkx.net.cn>

番茄红素是存在于人血清中的一种类胡萝卜素, 其分子中共轭双键的数量较多(11个), 是最有效的抗氧化剂之一^[1]。番茄红素还具有预防癌症^[2]、动脉粥样化^[3]

和心血管疾病^[4]的功能, 广泛存在于番茄、番石榴、蔷薇果等果蔬之中^[1,5]。番茄红素可作为着色剂和营养强化剂应用于食品工业, 但天然的番茄红素不溶于水, 易受外界

收稿日期: 2020-09-07

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6192015)

第一作者简介: 陈雨露(1995—)(ORCID: 0000-0002-3646-8583), 女, 博士研究生, 研究方向为功能配料与食品添加剂。

E-mail: yulu_1212@163.com

(*通信作者简介: 袁芳(1967—)(ORCID: 0000-0003-0239-6021), 女, 副教授, 博士, 研究方向为天然产物与功能食品。

E-mail: yuanfang0220@163.com

环境的影响而异构化和降解,这些都限制了番茄红素在食品工业中的应用^[6]。微胶囊化技术有望解决上述问题,甚至可实现功能成分的控释或定向释放^[7-8]。

以番茄红素为芯材、多糖为壁材,采用喷雾干燥制备番茄红素微胶囊的研究已有报道。Silva等^[9]采用明胶-果胶复合材料为壁材制备番茄红素微胶囊,结果显示该微胶囊化可高效封装番茄红素,但不能有效阻止贮存过程中番茄红素的降解。伍秀英^[10]以多孔淀粉为壁材微胶囊化包埋番茄红素,显著提高了番茄红素的稳定性。Rocha等^[11]采用喷雾干燥的方法以变性淀粉将含有不同含量番茄红素的乳液微胶囊化,显著提高了番茄红素的稳定性及其在食品体系中的分散性。由此可见,微胶囊化技术结合其他封装技术具有提高番茄红素稳定性的潜力。

已有诸多研究报道了蛋白和多糖协同可提高微胶囊中活性成分的稳定性和体外模拟释放性能^[12-14]。在以往的研究中,本课题组以乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)和壳聚糖为材料成功制备了封装有番茄红素的双层乳液,该体系中番茄红素包埋率和溶解度显著提升,但其在贮藏期间的稳定性却不尽理想^[15]。此外,目前国内外鲜见关于以双层乳液为芯材、多糖为壁材制备微胶囊的研究报道。因此本研究以菊粉、海藻糖和麦芽糊精水溶性多糖为壁材、以番茄红素双层乳液为芯材,通过喷雾干燥法制备一种新型的番茄红素微胶囊。通过分析壁材种类、芯壁质量比对微胶囊包埋率、微观形貌、贮藏稳定性及其在酸性饮料中稳定性和模拟消化的影响,探究应用多糖为壁材、双层乳液为芯材制备微胶囊的可行性,以期进一步扩大番茄红素递送体系的种类,同时为递送其他功能成分的保护提供新型的递送载体。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

WPI 美国Daisco有限公司;番茄红素标准品(纯度99%) 河北晨光生物公司;壳聚糖 美国Sigma-Aldrich公司;氢氧化钠(分析纯)、盐酸(分析纯)、正己烷、无水乙醇(体积分数>99%) 北京化工厂;胃蛋白酶(P7125-100G)、胰脂肪酶(L3126-100G)、胆盐(48305-50G-F) 美国Sigma公司;中链甘油三酸酯(C8-C10) 上海奎斯特国际有限公司;菊粉 丰宁平安高科实业有限公司;海藻糖 日本林源株式会社;麦芽糊精 山东旺势达化工科技有限公司。

1.2 仪器与设备

T25-digital高速剪切分散机 德国IKA公司;ARC120电子分析天平 上海奥豪斯国际贸易有限

公司;Orion Star型pH计 美国Thermo Scientific公司;NS1001L2K型高压均质机 意大利Niro-Soavi公司;Zetasizer Nano-ZS90激光粒径仪 英国Malvern公司;UV-1800型紫外-可见分光光度计 日本Shimadzu公司;Q-SUN/Xe-1-B型光照箱 美国Q-LAB公司;磁力搅拌器 上海司乐仪器有限公司;喷雾干燥器 英国LabPlant公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

1.3.1.1 番茄红素双层乳液的制备

参考许朵霞^[16]、侯占群^[17]的方法制备番茄红素双层乳液。首先制备质量分数为0.6%的WPI溶液,溶胀过夜后得到水相,调节水相pH值至6.0;将番茄红素的油悬浮液溶解于中链甘油三酸酯中得到油相(番茄红素质量分数0.8%)。高速剪切(10 000 r/min、5 min)水相和油相的混合溶液后得到粗乳液,随后通过高压均质机(50 MPa、均质3次)进一步均质得到中链甘油三酸酯油相质量分数为10%的番茄红素单层乳液。使用磁力搅拌的方法将壳聚糖溶解于去离子水中,用0.1 mol/L HCl溶液调节pH值至2.0,使壳聚糖完全溶解,再使用0.1 mol/L NaOH溶液调节pH值至6.0,搅拌溶胀过夜,最终得到质量分数为0.5%的壳聚糖-水溶液,作为第二层水相;等质量混合番茄红素单层乳液和壳聚糖-水溶液,10 000 r/min剪切5 min形成双层粗乳液,然后通过高压均质得到油相质量分数为5%的WPI-壳聚糖番茄红素双层乳液^[16-17]。

1.3.1.2 番茄红素微胶囊的制备

参考文献[18-19],采用喷雾干燥法制备番茄红素微胶囊。分别将不同质量浓度的菊粉、海藻糖以及麦芽糊精水溶液等质量加入至番茄红素双层乳液中,使得芯壁质量比分别为1:2、1:3和1:4(以两种溶液中番茄红素与各可溶性多糖质量比计)。10 000 r/min剪切混合溶液5 min后进行喷雾干燥,进料速率为500 mL/h,进风温度和出风温度分别为170 ℃和90 ℃。将接收瓶中所得喷雾干燥粉末放入棕色玻璃瓶中避光密封保存,以用于之后的实验。

1.3.1.3 模拟酸性饮料的制备

准备50 mL灭菌棕色玻璃瓶。称取一定质量的白砂糖和柠檬酸,用去离子水搅拌溶解,得到白砂糖和柠檬酸质量分数分别为10%和0.15%的糖水溶液。使用糖水溶液溶解一定质量的番茄红素微胶囊粉末,配制质量分数为1%的微胶囊糖水溶液。90 ℃持续加热上述溶液1 min后,迅速灌入棕色玻璃瓶中,经封口机封装后倒置3 min。分阶段水浴冷却至室温^[20]。

1.3.2 番茄红素质量浓度的测定

1.3.2.1 标准曲线的绘制

采用紫外-可见分光光度法测定番茄红素的质量

浓度^[21]。准确称取5 mg番茄红素标准品溶解于正己烷中,配制成50 $\mu\text{g/mL}$ 的储备液,在200~600 nm波长范围内扫描,确定最大吸收波长为471 nm。随后,分别准确移取0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mL番茄红素标准溶液于10 mL棕色容量瓶中,并用正己烷进行定容,在471 nm波长处测溶液的吸光度,得到番茄红素质量浓度的标准曲线: $y=0.2943x-0.0024$, $R^2=0.9998$ 。

1.3.2.2 包埋率的测定

将10 mg的番茄红素微胶囊粉末溶于去离子水中,吸取两份1 mL番茄红素微胶囊溶液分别溶于10 mL离心管中。其中一份加入3 mL正己烷,混合均匀后离心取上清液,稀释至一定倍数后在471 nm波长处测其吸光度,根据番茄红素标准曲线计算出样品中番茄红素的质量浓度,即代表未包埋番茄红素质量浓度;另一份首先使用研棒和研钵研磨样品以破坏微胶囊膜,随后加入1 mL无水乙醇和2 mL正己烷,同理测得上清液中番茄红素的质量浓度即代表微胶囊中总番茄红素质量浓度。番茄红素微胶囊包埋率按式(1)计算^[22]。

$$\text{包埋率}/\% = 100 - \frac{\text{未包埋的番茄红素质量浓度}/(\mu\text{g/mL})}{\text{微胶囊中总的番茄红素质量浓度}/(\mu\text{g/mL})} \times 100 \quad (1)$$

1.3.3 微观形貌观察

采用SU8020场发射扫描电子显微镜观察番茄红素微胶囊的微观形貌。样品观察前需要对其进行真空喷金处理,加速电压为3.0 kV^[19]。

1.3.4 贮藏稳定性的测定

参考文献[9],分别称取两份等质量的番茄红素微胶囊粉末,装入棕色玻璃瓶中,分别在常温条件下(25 $^{\circ}\text{C}$)和55 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱充氮保存。每隔1 d取一定质量的微胶囊于试管中,使用乙醇-正己烷(体积比1:2)重复萃取3次,合并上层正己烷萃取液,使用紫外分光光度计测其在471 nm波长处的吸光度。根据已绘制的番茄红素标准曲线计算样品中番茄红素质量浓度。稳定性以番茄红素的保留率表示,按式(2)计算。

$$\text{保留率}/\% = \frac{\rho}{\rho_0} \times 100 \quad (2)$$

式中: ρ_0 为番茄红素的初始质量浓度/ $(\mu\text{g/mL})$; ρ 为经处理后的番茄红素质量浓度/ $(\mu\text{g/mL})$ 。

1.3.5 酸性饮料中的番茄红素微胶囊的稳定性评价

1.3.5.1 贮藏稳定性

将封口机封口后的装有溶解不同番茄红素微胶囊糖酸水溶液的棕色玻璃瓶分别置于常温条件下(25 $^{\circ}\text{C}$)和55 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱充氮贮藏,每个样品配制3份,贮藏7 d后取出开封进行番茄红素质量浓度的测定,测定方法同1.3.4节,贮藏稳定性以番茄红素的保留率表示。

1.3.5.2 光照稳定性

取一定量的番茄红素微胶囊糖酸水溶液装入光照瓶中,

并将光照瓶放入光照箱中(模拟全光谱日光),在光照强度为450 W/m^2 、温度为45 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下持续进行8 h照射,每2 h取样测定乳液中番茄红素质量浓度变化^[23],测定方法同1.3.4节,光照稳定性以番茄红素的保留率表示。

1.3.6 体外模拟消化释放

参考Tai Kedong等^[24]的研究方法,对含有番茄红素微胶囊的模拟酸性饮料进行体外模拟消化实验。整个模拟消化过程需在37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴摇床中进行,分别使用0.1 mol/L和1 mol/L的HCl溶液或NaOH溶液调节样品的pH值。

模拟胃消化:等体积混合样品和模拟胃液(3.2 g/L胃蛋白酶、2.0 g/L NaCl)至锥形瓶中,并调节溶液pH值至1.2。将锥形瓶置于水浴摇床中,并在30 min和60 min时取1 mL样品备用。

模拟小肠消化:调节模拟胃消化液pH值至7.0终止胃模拟消化,取20 mL模拟胃消化液与20 mL模拟肠液(2.0 g/L胰液素、8.8 g/L NaCl、6.8 g/L磷酸二氢钾、12.0 g/L胆盐)混合,再次调节pH值至7.0。混合液继续置于水浴摇床中保持2 h(温度37 $^{\circ}\text{C}$),每隔30 min取1 mL样品备用,模拟小肠消化共进行2 h。

所有取样在10 000 r/min、25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下离心10 min,根据1.3.2.1节标准曲线计算上清液中番茄红素质量浓度,计算番茄红素的累计释放率,累计释放率为各时间点上清液中番茄红素质量浓度与初始质量浓度的百分比。

1.4 数据处理与分析

每组实验重复2次,每项检测重复3次,采用SPSS 23软件处理数据,结果用平均值 $\pm$ 标准差表示,采用Origin软件作图。

2 结果与分析

2.1 微胶囊中番茄红素的包埋率

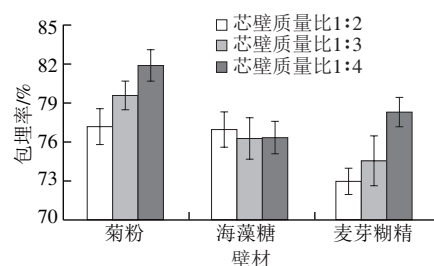


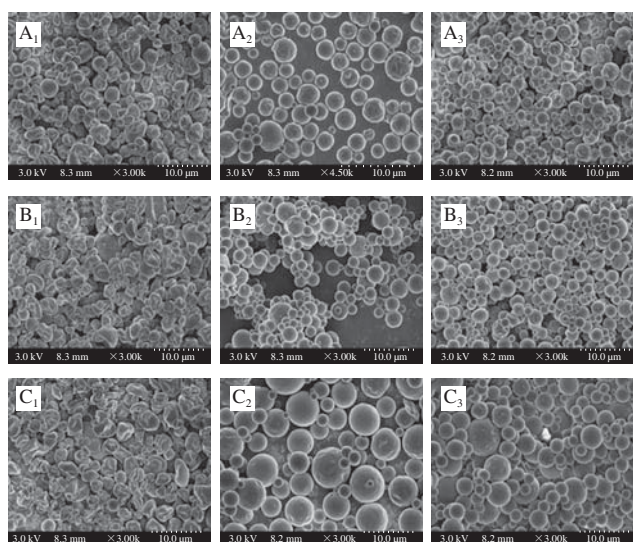
图1 不同壁材、芯壁质量比的番茄红素微胶囊的包埋率

Fig. 1 Encapsulation efficiency of lycopene microcapsules with different wall materials and core-to-wall ratios

对功能因子的有效封装是评价食品传递体系的首要标准,番茄红素在不同壁材(菊粉、海藻糖、麦芽糊精)和芯壁质量比(1:2、1:3、1:4)的微胶囊中的包埋率如图1所示。所有微胶囊均显示出良好的包埋效果(包埋率稳定在72.97%~81.90%),这可能是以包埋效果

较好的番茄红素-WPI-壳聚糖双层乳液为芯材所致。其中,以菊粉为壁材的微胶囊在所有芯壁质量比条件下的包埋率均高于以海藻糖和麦芽糊精为壁材微胶囊的包埋率。对以菊粉和麦芽糊精为壁材的微胶囊来说,随着芯壁质量比的降低,微胶囊的包埋率明显增加,均在芯壁质量比为1:4时达到最大值,最大值分别为 $(81.90 \pm 1.20)\%$ 和 $(78.36 \pm 1.20)\%$ 。这是由于随着芯壁质量比的降低,番茄红素乳液周围多糖的含量增加使芯材被包裹的概率增大^[25]。已知海藻糖是玻璃化转变温度 $(115\text{ }^{\circ}\text{C})$ 最高的双糖,低温时海藻糖分子链和链段不运动,只是原子(基团)在平衡位置振动^[26]。在喷雾干燥过程中,刚性“外壳”的形成需要更长的时间,使得部分芯材损失^[18],表现为对于以海藻糖为壁材的番茄红素微胶囊来说,其包埋率稳定在77%左右,芯壁质量比的变化对微胶囊包埋率的影响较小。

2.2 微观形貌观察结果



A. 芯壁质量比1:2; B. 芯壁质量比1:3; C. 芯壁质量比1:4; 下标1~3.分别为麦芽糊精、海藻糖、菊粉,图3同。

图2 不同壁材、芯壁质量比的番茄红素微胶囊的微观形貌

Fig. 2 Micromorphology of lycopene microcapsules prepared with different wall materials and core-to-wall ratios

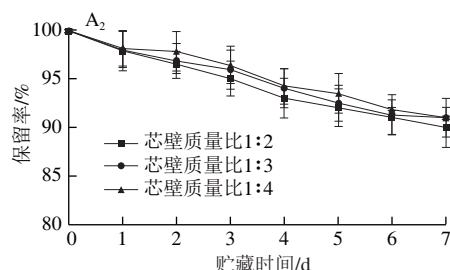
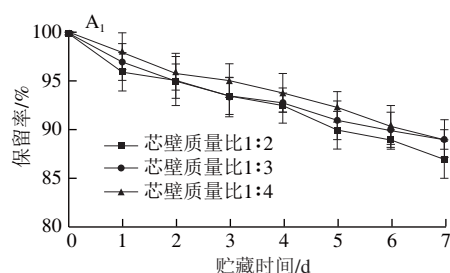
使用场发射扫描电子显微镜观察不同壁材、芯壁质量比条件下制备的番茄红素微胶囊的微观形貌,结果如图2所示。所有条件下制备的微胶囊均显示出典型的球状结构^[27]。对于以麦芽糊精为壁材制备的番茄红素微胶囊来说,芯壁质量比较高时微胶囊形貌更加趋近于球形,而随着芯壁质量比的降低,微胶囊表面皱缩程度明显,且形状更加不规则,这是麦芽糊精的起泡性所致,剪切过程中所产生的气泡随着喷雾干燥过程中水分的蒸发释放而出,从而引起微胶囊表面皱缩^[11,28]。而以海藻糖为壁材制备的番茄红素微胶囊形状为规则的球形,微胶囊表面在高芯壁质量比时有轻微褶皱,随着芯壁质量比的

降低,微胶囊的表面愈加光滑,这归因于海藻糖良好的成形与支撑作用^[29],但是微胶囊颗粒大小的均一性有所降低。对于以菊粉为壁材的微胶囊来说,在芯壁质量比较高时微胶囊表面有轻微褶皱,甚至出现破碎的微胶囊颗粒;而随着芯壁质量比的降低,微胶囊形状更加规则且表面更加光滑,微胶囊的大小分布也愈加均匀。以上结果说明以较高含量的海藻糖和菊粉为壁材适用于制备微胶囊。

2.3 番茄红素微胶囊的贮藏稳定性

25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下微胶囊中番茄红素的保留率在7 d贮藏期内的变化如图3A所示,所有微胶囊粉末中的番茄红素仅轻微降解,7 d后番茄红素保留率均在85%以上,不同壁材及芯壁质量比的微胶囊中番茄红素的降解没有明显差异。可能是由于喷雾干燥降低了微胶囊粉末中的水分活度,对防止番茄红素降解起到了一定的作用^[25]。

然而,当贮藏温度为55 $^{\circ}\text{C}$ 时,番茄红素的保留率随着贮藏时间的延长明显降低(图3B),直至贮藏7 d时,以麦芽糊精、海藻糖和菊粉为壁材的微胶囊均在芯壁质量比为1:2时达到最低,分别为 $(43.05 \pm 6.91)\%$ 、 $(43.37 \pm 6.69)\%$ 和 $(38.45 \pm 7.01)\%$ 。对于同一壁材制备的微胶囊而言,番茄红素的保留率随芯壁质量比的降低(1:2~1:4)而增大。这是由于高含量的多糖加厚了微胶囊的保护外壳,从而增强了对番茄红素的保护作用^[30]。其中,以麦芽糊精与海藻糖为壁材的微胶囊中番茄红素的保留率随芯壁质量比降低而增大的程度较小,而以菊粉为壁材的微胶囊中番茄红素的保留率在芯壁质量比为1:4时大幅提高。上述现象可能是由于菊粉含量较低时所制得的微胶囊有一定的结构破裂(图2),导致番茄红素的暴露,而随着菊粉含量的增加,能够形成更加完整的微胶囊外壳,因此其保留率有较大的提升。



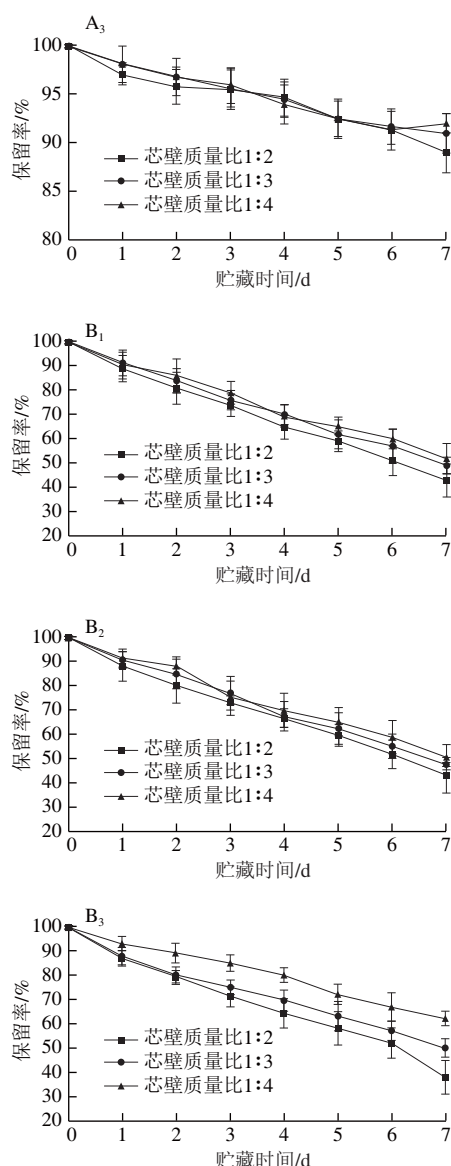


图3 不同壁材、芯壁质量比的番茄红素微胶囊在25 °C (A) 和55 °C (B) 条件下的贮藏稳定性

Fig. 3 Storage stability of lycopene microcapsules prepared with different wall materials and core-to-wall ratios at 25 (A) and 55 °C (B)

2.4 酸性饮料中的番茄红素微胶囊的稳定性评价

食品加工、贮藏条件的变化会影响食品成分, 为保证番茄红素在食品货架期内仍保持生物活性, 评价贮藏期间环境因素对番茄红素微胶囊在食品基中稳定性的影响是有必要的^[31]。由于番茄红素在酸性和光照条件下不稳定, 因此本实验配制白砂糖和柠檬酸质量分数分别为10%和0.15%的糖酸水溶液作为模拟酸性饮料基质, 以探究不同壁材及芯壁质量比的番茄红素微胶囊在模拟酸性饮料中的贮藏稳定性和光照稳定性。

2.4.1 贮藏稳定性

添加番茄红素微胶囊的模拟酸性饮料在25 °C和55 °C条件下贮藏7 d后番茄红素保留率的变化如图4所示。可

以看出, 与图3相比, 25 °C和55 °C条件下贮藏1周后, 酸性饮料中番茄红素的保留率均明显低于以粉末形式贮藏的微胶囊, 这是酸性环境加速番茄红素降解所导致, 与Boon等^[32]的研究结果一致。也有研究表明, 在酸性条件下, 番茄红素容易被质子化, 继而发生异构化和其他降解反应^[33]。

如图4A所示, 25 °C时以菊粉为壁材的微胶囊对番茄红素的保护作用较好, 当芯壁质量比为1:4时, 微胶囊中番茄红素的保留率达到最大 (76.57 ± 4.73) %。番茄红素在贮藏温度为55 °C时明显降解, 其中, 以菊粉、海藻糖和麦芽糊精为壁材的微胶囊中番茄红素的保留率在芯壁质量比为1:4时也仅分别为 (24.08 ± 4.72) %、(18.15 ± 4.53) %和 (15.86 ± 3.75) % (图4B)。上述结果说明, 常温条件下, 以菊粉、海藻糖和麦芽糊精为壁材的微胶囊在酸性环境中可有效防止番茄红素的降解, 而在高温条件下, 上述保护作用明显降低。

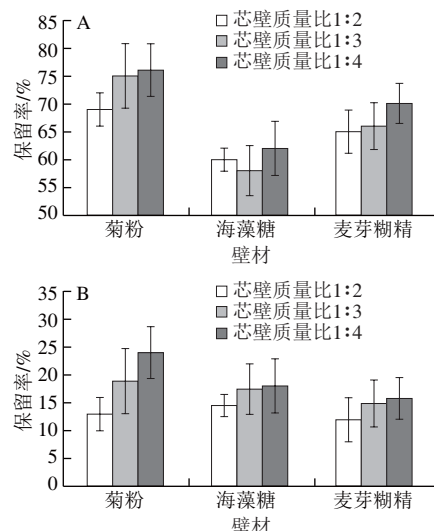


图4 不同壁材、芯壁质量比的番茄红素微胶囊的模拟酸性饮料在25 °C (A) 和55 °C (B) 的贮藏稳定性

Fig. 4 Stability in simulated acidic beverages of lycopene microcapsules prepared with different wall materials and core-to-wall ratios at 25 (A) and 55 °C (B)

2.4.2 光照稳定性

番茄红素对光照敏感, 评价番茄红素微胶囊在模拟酸性饮料中的光照稳定性对产品的包装、贮藏条件以及其他保护性辅料的添加有重要意义。由图5可以看出, 所有样品中番茄红素的含量均随着光照时间的延长持续降低, 直至模拟光照8 h时, 模拟酸性饮料中番茄红素的保留率总体低于10%, 说明光照对番茄红素的稳定性影响较大, 与以往的研究结果^[34]一致。上述现象也可以通过酸性饮料颜色的变化说明 (红色转变为乳白色)。

总的来说, 微胶囊产品在模拟酸性饮料中的光照稳定性较差, 这可能是因为模拟酸性饮料中番茄红素微胶囊的添加量较小, 而糖酸水溶液为清澈透明溶液, 透光性较好, 从而加速了番茄红素的降解。

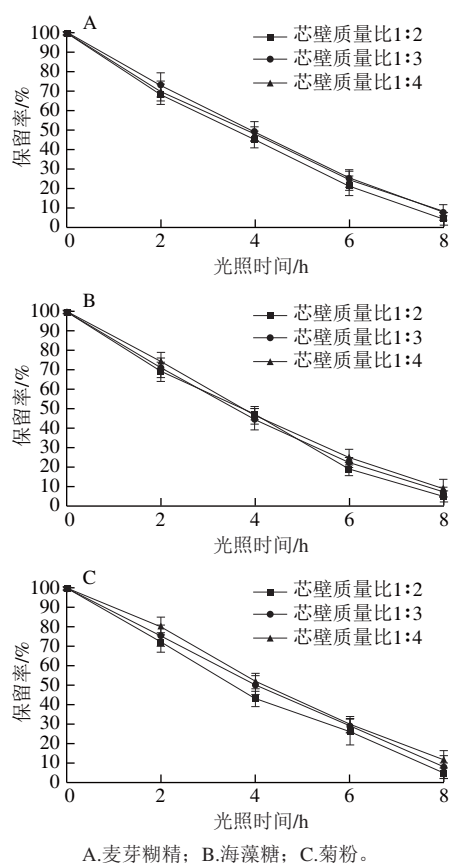


图5 不同壁材、芯壁质量比的番茄红素微胶囊在模拟酸性饮料中的光照稳定性

Fig. 5 Light stability in simulated acidic beverages of lycopene microcapsules prepared with different wall materials and core-to-wall ratios

2.5 体外模拟消化释放结果

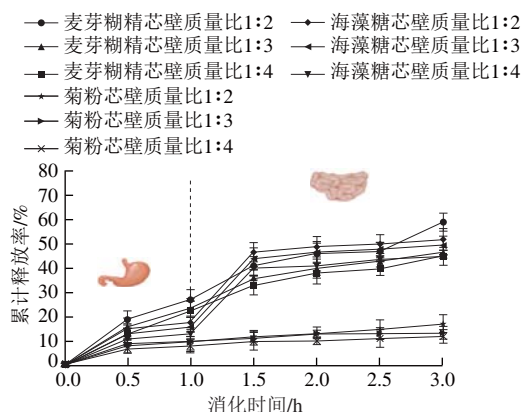


图6 含有不同壁材、芯壁质量比番茄红素微胶囊的模拟酸性饮料的体外消化模拟

Fig. 6 *In vitro* simulated digestion in simulated acidic beverages of lycopene microcapsules prepared with different wall materials and core-to-wall ratios

所有微胶囊中番茄红素在模拟胃肠消化条件下的释放情况如图6所示。对于使用同一种壁材制备的微胶囊来说，芯壁质量比对番茄红素在胃肠中的释放率没有

明显影响。而对于不同壁材制备的微胶囊来说，它们在模拟胃肠消化过程中表现出不同的番茄红素释放情况。其中以麦芽糊精和海藻糖为壁材的番茄红素微胶囊具有控制番茄红素释放的功能，表现为在模拟胃液中释放率较低，而在模拟肠液中释放率明显增加后趋于稳定。海藻糖具有较好的耐酸性，因此在模拟胃液中番茄红素的释放量较低。而以菊粉为壁材的微胶囊在模拟胃液和模拟肠液中释放率均较低，这可能是由于菊粉作为一种水溶性膳食纤维，人体的胃肠环境不能将其分解，只有结肠中的某些微生物可以将其分解并利用，因此在模拟消化实验中，菊粉不能被有效分解，从而导致番茄红素不能有效释放^[35]。

3 结论

本实验以番茄红素-WPI-壳聚糖双层乳液为芯材，以多糖为壁材，探索了一种新型的微胶囊制备方法。结果显示，使用不同壁材制备的微胶囊的包埋率均在72.97%~81.90%，且改变芯壁质量比对微胶囊包埋率的影响不明显。以海藻糖和菊粉为壁材制备的番茄红素微胶囊形状为规则的球形，且随着壁材含量的增加，该球形微胶囊外观更加规则和完整。在贮藏期间微胶囊对番茄红素的保护作用均随壁材含量的增加而增强。微胶囊的形成可以在常温贮藏期间保护酸性模拟饮料中的番茄红素，但在高温和光照条件下的保护作用不明显。在体外模拟消化实验中，以海藻糖为壁材制备的番茄红素微胶囊显示出良好的缓释功能。综上，以多糖为壁材的微胶囊的形成可有效提高番茄红素双层乳液在贮藏及酸性常温条件下的稳定性并实现番茄红素的控制释放，其中以海藻糖为壁材、芯壁质量比为1:4制备的微胶囊有望应用于今后的研究与工业化生产中。

参考文献:

- [1] CLINTON S K. Lycopene: chemistry, biology, and implications for human health and disease[J]. Nutrition Reviews, 2009, 56(2): 35-51. DOI:10.1111/j.1753-4887.1998.tb01691.x.
- [2] AGARWAL S, RAO A V. Tomato lycopene and its role in human health and chronic diseases[J]. Canadian Medical Association Journal, 2000, 163(6): 739-744. DOI:10.0000/PMID11022591.
- [3] PALOZZA P, PARRONE N, SIMONE R E, et al. Lycopene in atherosclerosis prevention: an integrated scheme of the potential mechanisms of action from cell culture studies[J]. Archives of Biochemistry & Biophysics, 2010, 504(1): 26-33. DOI:10.1016/j.abb.2010.06.031.
- [4] PARAN E, NOVACK V, ENGELHARD Y N, et al. The effects of natural antioxidants from tomato extract in treated but uncontrolled hypertensive patients[J]. Cardiovascular Drugs & Therapy, 2009, 23(2): 145-151. DOI:10.1007/s10557-008-6161-4.
- [5] KRIS-ETHERTON P M, HEVNER K D, BONANOME A, et al. Bioactive compounds in foods: their role in the prevention of

- cardiovascular disease and cancer[J]. The American Journal of Medicine, 2002, 113(9): 71-88. DOI:10.1016/s0002-9343(01)00995-0.
- [6] VIUDA-MARTOS M, SANCHEZ-ZAPAYA E, SAYAS-BARBERA E, et al. Tomato and tomato byproducts. human health benefits of lycopene and its application to meat products: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(8): 1032-1049. DOI: 10.1080/10408398.2011.623799.
- [7] DIAS M I, FERREIRA I C F R, BARREIRO M F. Microencapsulation of bioactives for food applications[J]. Food and Function, 2015, 6(4): 1035-1052. DOI:10.1039/c4fo01175a.
- [8] YE Q, GEORGES N, SELOMULYA C. Microencapsulation of active ingredients in functional foods: From research stage to commercial food products[J]. Trends in Food Science and Technology, 2018, 78: 167-179. DOI:10.1016/j.tifs.2018.05.025.
- [9] SILVA D F, FAVARO-TRINDADE C S, ROCHA G A, et al. Microencapsulation of lycopene by gelatin-pectin complex coacervation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2011, 36(2): 185-190. DOI:10.1111/j.1745-4549.2011.00575.x.
- [10] 伍秀英. 淀粉颗粒酶解机制及其包埋番茄红素研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 41-43.
- [11] ROCHA G A, FAVARO-TRINDADE C S, GROSSO C R F. Microencapsulation of lycopene by spray drying: Characterization, stability and application of microcapsules[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 90(1): 37-42. DOI:10.1016/j.fbp.2011.01.001.
- [12] DEVI N, SARMAH M, KHATUN B, et al. Encapsulation of active ingredients in polysaccharide-protein complex coacervates[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2012, 239: 136-145. DOI:10.1016/j.cis.2016.05.009.
- [13] 胡艳. 基于多糖和乳清蛋白的柑橘类黄酮递送载体构建及性能的评价研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019: 51-54.
- [14] 侯园园, 刘锐, 张民, 等. 糖接枝蛋白对番茄红素微胶囊包埋影响的研究[J]. 食品科技, 2014, 39(9): 252-255. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2014.09.053.
- [15] LÜ P F, WANG D, CHEN Y L, et al. Pickering emulsion gels stabilized by novel complex particles of high-pressure-induced WPI gel and chitosan: fabrication, characterization and encapsulation[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 105992. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.105992.
- [16] 许朵霞. 乳清分离蛋白-甜菜果胶不同相互作用对 β -胡萝卜素乳液稳定机理及体外释放特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012: 41-42.
- [17] 侯占群. β -胡萝卜素双层乳液的制备及其体外释放特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011: 42-44.
- [18] GOULA A M, ADAMOPOULOS K G. A new technique for spray-dried encapsulation of lycopene[J]. Drying Technology, 2012, 30(6): 641-652. DOI:10.1080/07373937.2012.655871.
- [19] SHU B, YU W L, ZHAO Y P, et al. Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(4): 664-669. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.05.062.
- [20] 范雨豪. 金属三片罐中食品污染物迁移规律与控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 31.
- [21] 靳学远, 李锐, 秦霞, 等. 超高压提取番茄渣中番茄红素的工艺优化[J]. 食品科学, 2010, 31(2): 25-27.
- [22] MAHDAVI S A, JAFARI S M, ASSADPOOR E, et al. Microencapsulation optimization of natural anthocyanins with maltodextrin, gum arabic and gelatin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 85(7): 379-385. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2016.01.011.
- [23] TAI K, RAPPOLT M, HE X, et al. Effect of beta-sitosterol on the curcumin-loaded liposomes: Vesicle characteristics, physicochemical stability, *in vitro* release and bioavailability[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 92-102. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.04.077.
- [24] TAI Kedong, RAPPOLT M, HE Xiaoye, et al. The stabilization and release performances of curcumin-loaded liposomes coated by high and low molecular weight chitosan[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105355. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105355.
- [25] 刘欢. 喷雾干燥法乳酸菌微胶囊的制备及其在仔猪体内的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 44-45.
- [26] ELBEIN A D. New insights on trehalose: a multifunctional molecule[J]. Glycobiology, 2003, 13(4): 17-27. DOI:10.1093/glycob/cwg047.
- [27] TUPUMA D S, PAESE K, GUTERRES S S, et al. Encapsulation efficiency and thermal stability of norbixin microencapsulated by spray-drying using different combinations of wall materials[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 111: 846-855. DOI:10.1016/j.indcrop.2017.12.001.
- [28] LOKSUWAN J. Characteristics of microencapsulated β -carotene formed by spray drying with modified tapioca starch, native tapioca starch and maltodextrin[J]. Food hydrocolloids, 2007, 21(5/6): 928-935. DOI:10.1016/j.foodhyd.2006.10.011.
- [29] 黄日波. 海藻糖: 21世纪的新型糖类[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 1-214.
- [30] YE S Q, WANG C Y, LIU X X, et al. New loading process and release properties of insulin from polysaccharide microcapsules fabricated through layer-by-layer assembly[J]. Journal of Controlled Release Official Journal of the Controlled Release Society, 2006, 112(1): 79-87. DOI:10.1016/j.jconrel.2006.01.015.
- [31] MCCLEMENTS D J. Nanoscale nutrient delivery systems for food applications: improving bioactive dispersibility, stability, and bioavailability[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(7): 1602-1611. DOI:10.1111/1750-3841.12919.
- [32] BOON C S, MCCLEMENTS D J, WEISS J, et al. Role of iron and hydroperoxides in the degradation of lycopene in oil-in-water emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(7): 2993-2998. DOI:10.1021/jf803747j.
- [33] MORTENSEN A, SKIBSTED L H. Kinetics and mechanism of the primary steps of degradation of carotenoids by acid in homogeneous solution[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(2): 279-286. DOI:10.1021/jf9904620.
- [34] 朱军敏. 红曲色素和番茄红素微囊的制备及其稳定性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018: 71-73.
- [35] CHERBUT C. Inulin and oligofructose in the dietary fibre concept[J]. The British Journal of Nutrition, 2002, 87(2): 159-162. DOI:10.1159/000097414.