

张辰辰,程佳馨,戴竹青,等. 载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷复合体系的稳定性[J]. 江苏农业科学,2022,50(3):190-195.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.03.031

载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷复合体系的稳定性

张辰辰^{1,2}, 程佳馨³, 戴竹青¹, 何伟伟¹, 耿宁宁², 李莹¹, 李大婧¹, 宋江峰^{1,2}

(1. 江苏省农业科学院农产品加工研究所,江苏南京 210014; 2. 江苏大学食品与生物工程学院,江苏镇江 212013;
3. 宝鸡职业技术学院,陕西宝鸡 721013)

摘要:为了提高叶黄素在功能食品及饮料应用中的稳定性,利用鹰嘴豆分离蛋白和甜菊苷为材料制备载叶黄素的复合体系,研究 pH 值、盐离子浓度、冻融处理、人工模拟胃肠液对鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷-叶黄素复合体系和鹰嘴豆分离蛋白-叶黄素复合体系稳定性的影响,以及复合体系在不同贮藏条件中的稳定性。结果表明,载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷三元复合体系的耐盐性及耐酸性均高于载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白二元复合体系,且该三元复合体系在中碱性及低盐条件下的稳定性较好。冻融处理会破坏复合纳米颗粒结构,进而使体系失稳。贮藏温度对复合体系色泽的影响大于光照,复合体系适宜在 4℃ 避光条件下贮藏。载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷三元复合体系在胃肠液中的稳定性高于载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白二元复合体系,三元复合体系能更有效负载叶黄素而不被胃肠液中的消化酶降解。

关键词:叶黄素;鹰嘴豆分离蛋白;甜菊苷;稳定性;复合体系

中图分类号: TS255.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)03-0190-06

叶黄素是一种重要的含氧类胡萝卜素,可以保护视网膜免受光损伤,对老年性黄斑变性、白内障、青光眼和糖尿病视网膜病变、色素性视网膜炎等眼疾有预防和缓解作用^[1-3]。此外,叶黄素还具有抗氧化、抑制炎症、抗癌的功效^[4-5]。但是由于叶黄素多烯链结构不稳定,在加工贮藏过程中易受 pH 值、光照、温度等环境因素的影响而降解损失,同时其水溶性较差,因而利用增溶剂、两亲性聚合物等天然材料对叶黄素进行物理包埋^[6],制备纳米化叶黄素稳定复合体系将有助于扩大叶黄素在食品、药品领域的应用范围。

甜菊苷由亲水性的双侧糖基(葡萄糖基和鼠李糖基)和疏水性的甜菊醇基连接构成,这种双亲性的分子结构与三萜皂苷类较为相似。Zhang 等研究发现,甜菊糖苷类物质具有增溶特性,利用甜茶苷制备水溶性的姜黄色素制剂,具有良好的稳定性和生物活性^[7]。笔者所在课题组前期利用天然甜菊苷两亲性结构性质制备出甜菊苷-叶黄素复合物,

显著提高了叶黄素的水溶性和生物利用率^[8],但体系稳定性较差。研究发现,植物蛋白分子具有良好的生物相容性、降解性、乳化性及表面活性,能显著提高复合体系的物理稳定性。蛋白质分子因含有大量疏水性、亲水性基团,具有表面活性,能产生乳化作用^[9],常被用于包埋脂溶性功能物质。Wang 等研究发现,大豆分离蛋白负载白藜芦醇后,乳状液物理稳定性和氧化稳定性得到了提高^[10]。李燕等用乳清分离蛋白-麦芽糖糊精美拉德反应的产物包埋 β -胡萝卜素,发现此复合物能够显著降低乳状液的粒径,提高 β -胡萝卜素对光热的稳定性^[11]。本研究利用鹰嘴豆分离蛋白和甜菊苷为材料制备载叶黄素的复合体系,研究 pH 值、盐离子、冻融处理、不同贮藏条件对鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷-叶黄素复合体系和鹰嘴豆分离蛋白-叶黄素复合体系稳定性的影响及人工模拟胃肠液中复合体系的稳定性,以期叶黄素复合体系在功能食品和饮料中的应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

叶黄素(含量 $\geq 90\%$),购自上海源叶生物科技有限公司;鹰嘴豆分离蛋白(含量 $\geq 85\%$),购自陕西帕尼尔生物科技有限公司;甜菊苷(含量 \geq

收稿日期:2021-06-03

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(20)3047]。

作者简介:张辰辰(1998—),女,河南濮阳人,硕士研究生,主要从事果蔬加工与增值利用研究。E-mail:Zhangcc0903@163.com。

通信作者:宋江峰,博士,副研究员,主要从事果蔬加工与增值利用研究。E-mail:songjiangfeng102@163.com。

90%),购自上海麦克林生化科技有限公司;胃蛋白酶、猪胆盐、胰脂肪酶、糖化酶,均为生化试剂,购自南京奥多福尼生物科技有限公司;磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、二甲基亚砷、乙酸、乙醇、盐酸、氯化钠、氯化钙、氢氧化钠,均为国产分析纯。试验分别于 2019 年 2—5 月、2020 年 4 月在江苏省农业科学院农产品加工研究所实验室进行。

1.2 仪器与设备

超声波处理器(UP400S),德国 Hielscher 公司;恒温液浴循环两用槽(7HD120),英国 Prima 公司;真空旋转蒸发仪(RE-52A),上海亚荣生化仪器厂;数显测速恒温磁力搅拌器(85-2A),常州市金坛华伟仪器厂;台式高速离心机(TG16-WS),湖南湘仪离心机仪器有限公司;电子分析天平(BSA224S),赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;双光束紫外可见分光光度计(UV-6300),上海美谱达仪器有限公司;水浴恒温振荡器(SHZ-82),常州国宇仪器制造有限公司;纳米粒度仪(Zetasizer Nano-ZS90),英国 Malvern 公司;全自动色差计(CR-400),日本柯尼卡美能达公司;pH 计(PHS-5 型),上海康仪仪器有限公司;电热恒温培养箱(DNP-9052BS-III),上海新苗医疗器械制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷复合体系的制备 参考李青等的方法^[12]并加以修改。将鹰嘴豆分离蛋白分散到 10 mmol/L 磷酸盐缓冲液中(pH 值为 7.0),于室温、500 r/min 条件下磁力搅拌 2 h。蛋白溶液使用超声波破碎仪进行超声处理,时间为 10 min,振幅为 37.5 μm ,脉冲比为 0.5。将超声处理后的蛋白溶液离心(8 000 r/min)10 min,获得的上清液即为蛋白纳米溶液。用 10 mmol/L 磷酸盐缓冲液(pH 值为 7.0)配制甜菊苷溶液。将甜菊苷溶液和蛋白纳米溶液混合,磁力搅拌 5 min。将溶有叶黄素(20 mg/mL)的乙醇溶液倒入磁力搅拌的甜菊苷-蛋白溶液中,搅拌 5 min 后进行超声处理,超声条件:脉冲比 0.65,振幅 72 μm ,时间 6 min,甜菊苷质量分数为 0.5%。超声结束后浓缩去除乙醇,即获得载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷复合体系(CPI-STE-LUT)。

1.3.2 pH 值对叶黄素复合体系稳定性的影响 测定 pH 值为 3、4、5、6、7、8 条件下鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷-叶黄素复合体系和鹰嘴豆分离蛋白-叶黄素复合体系的平均粒径、叶黄素乳化产率,用

0.1%~1.0% 乙酸和氢氧化钠调节体系的 pH 值。

1.3.3 Na^+ 浓度对叶黄素复合体系稳定性的影响

分析添加 0、10、20、30、40、60 mmol/L NaCl 溶液后鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷-叶黄素复合体和鹰嘴豆分离蛋白-叶黄素复合体系的平均粒径、叶黄素乳化产率。

1.3.4 冻融处理对叶黄素复合体系稳定性的影响

将鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷-叶黄素复合体系和鹰嘴豆分离蛋白-叶黄素复合体系在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻 12 h 后常温解冻(反复冻融 3 次),测定其平均粒径、叶黄素的乳化产率。

1.3.5 不同贮藏条件下叶黄素复合体系的稳定性

分别将 50 mL 鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷-叶黄素复合体系和鹰嘴豆分离蛋白-叶黄素复合体系转移至离心管中,在不同温度(4、25、37 $^{\circ}\text{C}$)、避光、非避光条件下进行贮藏试验。分别贮藏 0、5、10、15、20、25、30 d 后进行取样,测定其平均粒径、叶黄素保留率及色泽的变化。

1.3.6 模拟胃肠液中叶黄素复合体系的稳定性

将鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷-叶黄素复合体系和鹰嘴豆分离蛋白-叶黄素复合体系进行胃液、肠液 2 个阶段的模拟消化,整个过程在恒温振荡水浴系统中进行,温度控制为 37 $^{\circ}\text{C}$ 。取 10 mL 乳液,加入 20 mL 模拟胃液(含 2 mg/mL NaCl、3.2 mg/mL 胃蛋白酶),调节 pH 值至 1.2,在恒温振荡水浴锅内消化 1.5 h。再调节 pH 值为 7.0,在上述溶液中继续加入 7.5 mL 模拟肠液(含 5 mg/mL 胆汁盐、10 mmol/L CaCl_2 、150 mmol/L NaCl、2.4 mg/mL 胰脂肪酶、2.4 mg/mL 糖化酶),于恒温振荡水浴锅中继续消化 6 h,分别在 1、2、3、4、5、6 h 取样,测定叶黄素含量并计算叶黄素的保留率。

1.3.7 理化指标的测定

1.3.7.1 粒度 将鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷-叶黄素复合体系和鹰嘴豆分离蛋白-叶黄素复合体系用 10 mmol/L 磷酸盐缓冲液(pH 值为 7)稀释 100 倍,采用纳米激光粒度仪测量其粒径,仪器设定散射光角度为 90° ,测定温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,每个样品至少重复测试 3 次,取平均值。

1.3.7.2 叶黄素含量 取 100 μL 样液溶于 9.900 mL 二甲基亚砷(DMSO)中,用紫外分光光度计在 460 nm 处测定其吸光度。标准曲线的绘制方法:精确称取叶黄素标准品(溶于 DMSO 中),配制成 1~10 mg/L 的标准溶液,在 460 nm 处测量吸光

度,以叶黄素含量为横坐标(x)、吸光度为纵坐标(y)绘制标准曲线。得到标准曲线方程为 $y = 46.592 0x - 0.005 6$, $r^2 = 0.999 7$ 。根据标准曲线方程确定样液中的叶黄素含量。

1.3.7.3 叶黄素乳化产率 取新鲜制备的叶黄素复合体系,静置 1 h 后测定叶黄素浓度,按照公式(1)计算叶黄素乳化产率:

$$\text{叶黄素乳化产率} = \frac{\text{新鲜乳液中叶黄素浓度}}{\text{体系中叶黄素浓度}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.7.4 叶黄素保留率 叶黄素保留率的计算方法见公式(2):

$$\text{叶黄素保留率} = \frac{\text{贮藏期中叶黄素浓度}}{\text{新鲜乳液中叶黄素浓度}} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.7.5 溶液色泽的测定 使用 CR-400 全自动色差计测定溶液色泽,每次使用前分别进行黑板、白板校正,测定时取 2 mL 液体于样品池中,测头对准样本发光 3 次后,记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值, L^* 表示亮度值; a^* 表示红绿值; b^* 表示蓝黄值,色差值 ΔE^* 描述待测样品颜色变化,由 L^* 、 a^* 、 b^* 通过计算得到,以空白试验叶黄素乳液为参比标准溶液,注意不要漏光,重复测定 3 次。色差值 (ΔE) 及饱和度值 (ΔC) 通过公式(3)和(4)计算:

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}; \quad (3)$$

$$\Delta C^* = (\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}。 \quad (4)$$

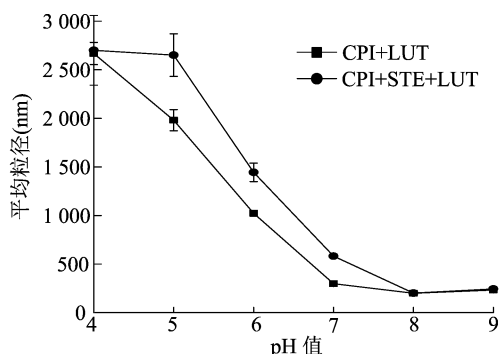
1.3.8 数据统计与处理 每组均进行 3 次平行试验。采用统计学软件 SPSS 18 对试验数据进行方差分析,数据用平均值 \pm 标准偏差 ($\bar{x} \pm s$) 表示,用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 酸碱稳定性

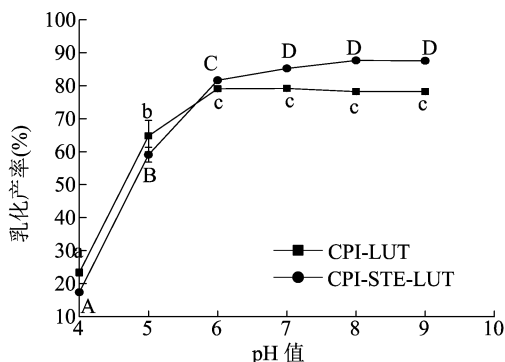
不同 pH 值条件下叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷复合体系(CPI-STE-LUT)的平均粒径见图 1。可以看出,当 pH 值为 4~9 时,复合体系的平均粒径随着 pH 值的升高而大幅减小;当 pH 值为 4~6 时,体系的平均粒径大于 1 000 nm,出现絮凝、聚结和分层现象,可能因为鹰嘴豆分离蛋白的等电点(PI)在 4.5~5.0 范围内,此时蛋白质的溶解度减小,所带正负电荷恰好相等,没有相同电荷互相排斥,粒子间相互聚集,进而发生絮凝沉淀,这与崔健等的研究结果^[13]相似;当 pH 值 > 7 时,体系的

平均粒径在 200 nm 左右。在酸性条件下,CPI-STE-LUT 三元复合体系的平均粒径大于 CPI-LUT 二元复合体系,当 pH 值为 8.0 时,三元复合体系的粒径最小,仅为 196.28 nm,这可能是因为部分甜菊苷分子附着在鹰嘴豆分离蛋白颗粒表面,使蛋白质分子间的静电引力减小,从而减少了颗粒间的相互聚集。



CPI—鹰嘴豆分离蛋白, STE—甜菊苷, LUT—叶黄素。下图同
图1 不同 pH 值条件下叶黄素复合体系的平均粒径

如图 2 所示,叶黄素的乳化产率随着 pH 值的提高而升高,在酸性条件下,其乳化产率低于 80%,在中性及碱性条件下,其乳化产率均达 80% 以上。其原因可能是在酸性条件下,鹰嘴豆分离蛋白溶解度下降,导致体系的叶黄素乳化率降低,此外,叶黄素在酸性环境中发生共轭体系碳原子的质子化,加速了叶黄素的降解^[14-15]。对比发现,在中性和碱性条件下 CPI-STE-LUT 三元复合体系的叶黄素乳化率高于 CPI-LUT 二元复合体系。



不同小写字母表示 CPI-LUT 体系在不同 pH 值条件下具有显著差异($P < 0.05$)。图 4、图 6 同

图2 不同 pH 值条件下复合体系中叶黄素的乳化产率

2.2 耐盐稳定性

如图 3 所示,复合体系的平均粒径随着 Na^+ 浓度的升高而增大,这与朱振宝等的研究结果相似,即 Na^+ 离子会引起体系的不稳定^[16]。随着离子强度的提高,复合体系中水相离子强度增加,在乳状

液中产生静电屏蔽,从而降低粒子间的静电排斥力,诱发粒子絮凝或聚合^[17]。并且当盐离子浓度增大时,会引起蛋白质的盐析作用,从而影响其溶解度,降低体系的稳定性。当 Na^+ 浓度高于 60 mmol/L 时,三元体系粒径的变大趋势变缓,当 Na^+ 浓度为 100 mmol/L 时,二元体系的平均粒径达 450 nm,而三元体系的粒径仅为 350 nm,可见甜菊苷的引入使得复合体系的耐盐性更好。

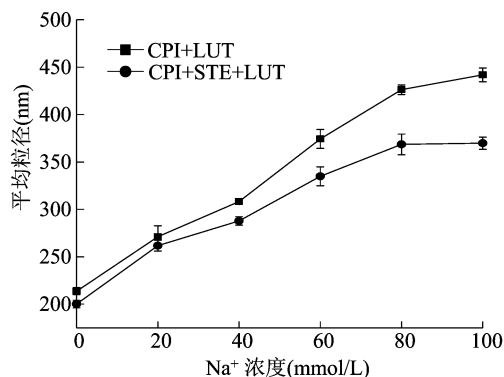
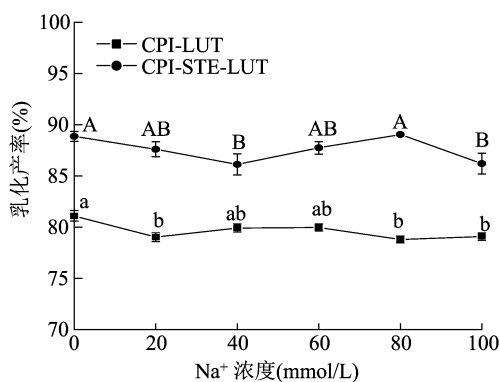


图3 不同 Na^+ 浓度条件下叶黄素复合体系的平均粒径

由图4可以看出,在复合体系中,随着 Na^+ 浓度的升高,叶黄素的乳化产率变化不明显,但在不同 Na^+ 浓度下,CPI-STE-LUT 体系的叶黄素乳化产率均高于 CPI-LUT。



a~c 表示 CPI-LUT 在不同处理间差异显著 ($P<0.05$), A~C 表示 CPI-STE-LUT 在不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。图6同

图4 不同 Na^+ 浓度条件下叶黄素复合体系中叶黄素的乳化产率

2.3 冻融稳定性

反复冻融处理后,载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷复合体系的平均粒径如图5所示。可以看出,冻融处理后 CPI-STE-LUT、CPI-LUT 复合体系的粒径明显增大,体系出现絮凝沉淀现象,且甜菊苷的加入并不能抵抗冻融处理对体系的破坏作用。如图6所示,经过冻融处理后,CPI-STE-LUT、CPI-LUT 复合体系的叶黄素乳化产率较低,表明复合体系结构已经被破坏,不能有效负载叶黄

素。冻融处理对复合体系的破坏力极大,因为体系在冷冻过程中,水快速结冰,造成体系体积变大而形成网状冰晶结构,且冰晶大小、分布都不均匀,不规则的冰晶会插入蛋白质颗粒中,引起界面蛋白质结构的变化,从而破坏了构建的多元复合体系颗粒结构,进而使粒子间的相互作用力失衡,系统稳定性下降;较大的冰晶颗粒会对复合体系颗粒造成挤压,使它们粘连在一起,导致平均粒径异常变大,其次,在解冻过程中,冰晶所构成的网状结构塌陷,冰晶融化、形成空隙,造成复合颗粒结构被进一步破坏。研究发现,在冻融处理过程中,蛋白质会发生变性,如物理、化学及胶束变化^[18-19],这也会影响体系的稳定性。

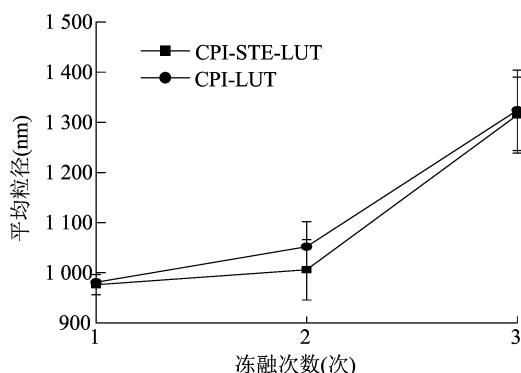


图5 不同冻融次数下叶黄素复合体系的平均粒径

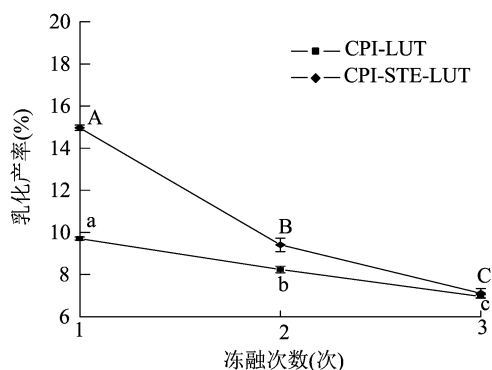


图6 不同冻融次数下复合体系叶黄素的乳化产率

2.4 贮藏稳定性

不同贮藏温度及光照条件下载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷复合体系的平均粒径变化规律见图7。可以看出,在贮藏过程中体系的平均粒径呈现增大趋势。贮藏温度对体系平均粒径的影响大于光照。在贮藏前5 d,体系粒径增加得最快,而后趋于平缓。在4℃避光条件下,体系最为稳定,平均粒径基本没有变化。

如图8所示,随着贮藏时间的延长,叶黄素保留率逐渐降低且在贮藏前5 d的下降速度最快,其后

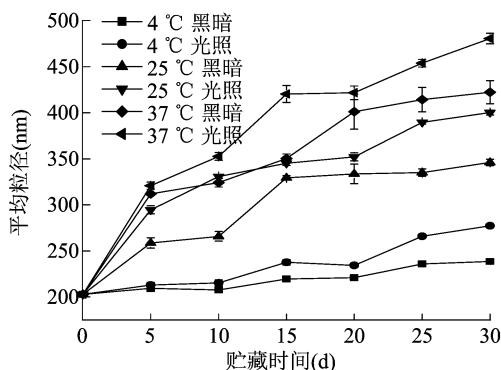


图7 不同贮藏条件下叶黄素复合体系的平均粒径变化

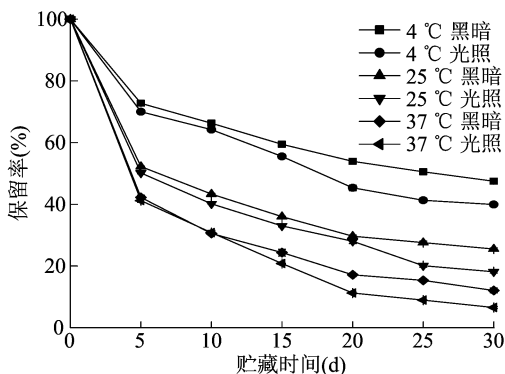
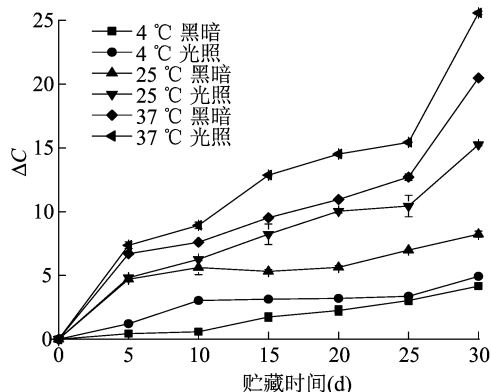


图8 不同贮藏条件下复合体系中叶黄素保留率的变化

趋于平缓。在 37 °C 光照条件下,叶黄素降解得最快,在贮藏 30 d 后,叶黄素保留率仅为 10% 左右,而在 4 °C 避光条件下,叶黄素保留率达 50% 以上。伍敏晖等研究发现,乳清蛋白负载姜黄色素在 4 °C 贮藏 25 d 后,色



素保留率仅为 50%,在 37 °C 贮藏 30 d 后不足 5%^[20]。除 25、37 °C 光照条件外,复合体系在贮藏末期无分层现象,仍保持澄清透明的橙黄色液体状态。

叶黄素乳液在贮藏期中色泽的变化,在一定程度上反映了其化学性质的稳定性^[21]。由图 9 可以看出,随着贮藏时间的延长,ΔE、ΔC 呈现上升的趋势,说明叶黄素在贮藏期间发生降解;体系色泽随着贮藏温度的升高变化明显,避光条件有利于缓解溶液的褪色。在贮藏前 5 d,25、37 °C 条件下体系的 ΔE、ΔC 显著增大,而在 4 °C、避光条件下,体系色泽变化不明显,在 4 °C 光照条件下,体系色泽在 5 d 后发生变化,而在避光条件下,体系在贮藏 10 d 后色泽才发生变化。由此可见,贮藏期温度对体系色泽的影响大于光照。贮藏温度的升高会加速分子间的布朗运动,提高粒子间的碰撞频率,引起粒子间聚集^[22];此外,高温会使蛋白质疏水作用增强,蛋白质分子部分展开形成的二硫键会促进颗粒聚集^[23];高温还会降低甜菊苷分子与水形成氢键的强度,使分子舒展,颗粒的水溶性变差。光照则主要引起叶黄素中的 C=C 键氧化断裂,从而发生环氧化反应及促羟基化反应^[13];此外,叶黄素的共轭多烯链会发生去质子化,在失去电子的同时,叶黄素的稳定性随之降低。由此可见,该复合体系适宜在 4 °C 避光条件下贮藏。

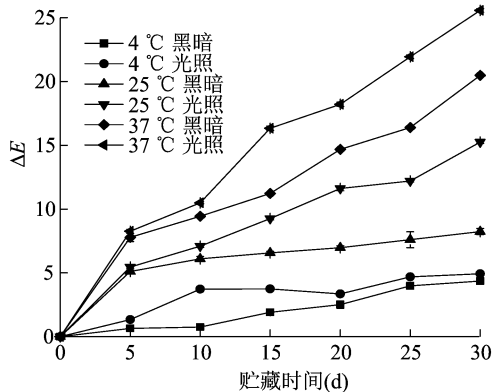


图9 不同贮藏条件下叶黄素复合体系ΔE、ΔC的变化

2.5 模拟胃肠液中的稳定性

如图 10 所示,CPI-STE-LUT 和 CPI-LUT 2 种复合体系在胃液中消化 1.5 h 时,叶黄素保留率均在 90% 以上。在模拟胃肠液的消化过程中,随着消化时间的增加,叶黄素的保留率下降,模拟胃肠液消化 1 h 后,CPI-LUT 复合体系中叶黄素的保留率下降得较快,但 CPI-STE-LUT 复合体系中叶黄素保留率下降得较缓慢;模拟胃肠液消化 2~3 h

时,CPI-STE-LUT 复合体系的叶黄素保留率下降得较快;模拟胃肠液消化 3 h 后,叶黄素保留率的下降趋势变缓;模拟胃肠液孵育 7 h 后,2 种复合体系叶黄素的保留率在 80% 左右。可以看出,三元体系能够有效负载叶黄素不被肠道中的消化酶降解,可能由于甜菊苷减少了蛋白质表面基团与胃肠液中的消化酶反应,能够保持复合体系结构的完整,从而减少叶黄素损失。

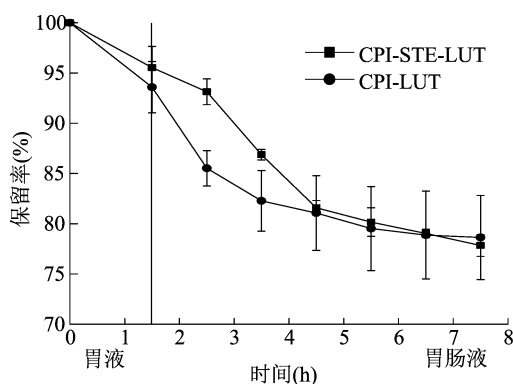


图10 叶黄素在人工模拟胃肠液中的保留率

3 结论

载叶黄素的鹰嘴豆分离蛋白-甜菊苷复合体系是一种较好的营养补充剂, CPI-STE-LUT 三元复合体系的耐盐性及耐酸性高于 CPI-LUT 二元复合体系, 且 CPI-STE-LUT 三元复合体系在中碱性及低盐条件下的稳定性良好。冻融处理会破坏复合纳米颗粒的结构, 进而使复合体系失稳。贮藏温度对体系色泽的影响作用大于光照, 适宜在 4℃ 避光条件下贮藏。CPI-STE-LUT 三元复合体系在胃肠液中的稳定性高于 CPI-LUT 二元复合体系, 其能更加有效的负载叶黄素, 不被胃肠液中的消化酶降解。CPI-STE-LUT 三元复合体系在不同功能食品与饮料中的应用有待进一步展开。

参考文献:

- [1] Rani C S, Kumar C R A, Subashini G, et al. Assessment of antioxidant potential of lutein, a retinol equivalent carotenoid in medicinal landrace of rice 'Kavuni' [J]. Journal of Pharmaceutical Research International, 2021, 32(38): 39-46.
- [2] Qiao Y Q, Jiang P F, Gao Y Z. Lutein prevents osteoarthritis through Nrf2 activation and downregulation of inflammation [J]. Archives of Medicalence, 2018, 14(3): 617-624.
- [3] Li L H, Lee C Y, Leung H H, et al. Lutein supplementation for eye diseases [J]. Nutrients, 2020, 12(6): 1721.
- [4] Fuad N I N, Sekar M, Gan S H, et al. Lutein: a comprehensive review on its chemical, biological activities and therapeutic potentials [J]. Pharmacognosy Journal, 2020, 12(6S): 1769-1778.
- [5] 王若仲, 沈新南, 施冬云, 等. 叶黄素对大鼠肝癌细胞 HepG2 的抑制作用及其机制研究 [J]. 营养学报, 2012, 34(4): 332-335.
- [6] 张泽生, 钱俊, 郭艳玲, 等. 水溶性叶黄素两亲性共聚物纳米胶束的稳定性 [J]. 天津科技大学学报, 2010, 25(4): 33-36.
- [7] Zhang F, Koh G Y, Jeansonne D P, et al. A novel solubility-enhanced curcumin formulation showing stability and maintenance of anticancer activity [J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2011,

100(7): 2778-2789.

- [8] 宋江峰, 杨秋明, 李大婧, 等. 一种水溶性叶黄素的绿色制备方法: CN107897647A [P]. 2018-10-20.
- [9] 孙向东, 李硕. 蛋白质乳化作用与置换吸附探讨 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 405-408.
- [10] Wan Z L, Wang J M, Wang L Y, et al. Enhanced physical and oxidative stabilities of soy protein-based emulsions by incorporation of a water-soluble stevioside-resveratrol amplex [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(18): 4433-4440.
- [11] 李燕, 刘成梅, 刘伟, 等. 乳清蛋白-麦芽糖糊精的 Maillard 反应复合物制备 β -胡萝卜素纳米乳液 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 279-282.
- [12] 李青, 曹婷, 杨韵仪, 等. 用大豆蛋白-甜菊糖苷复合稳定剂制备植物甾醇纳米乳液及其稳定性研究 [J]. 现代食品科技, 2019, 35(3): 139-145.
- [13] 崔健, 酆金龙, 王盼, 等. 温度、pH 和盐对乳清蛋白乳液稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(11): 84-87.
- [14] Boon C S, McClements D J, Weiss J, et al. Factors influencing the chemical stability of carotenoids in foods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 50(6): 515-532.
- [15] 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 & Food Chemistry, 2000, 48(2): 279-286.
- [16] 朱振宝, 王艳斐, 易建华. 影响乳清分离蛋白和酪蛋白乳液物理稳定性因素研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2016, 34(4): 125-130, 144.
- [17] Zhang J P, Zhang X X, Wang X Y, et al. The Influence of maltodextrin on the physicochemical properties and stabilization of beta-carotene emulsions [J]. AAPS Pharm Sci Tech, 2016, 18(3): 1-8.
- [18] 夏秀芳, 孔保华, 郭园园. 反复冷冻-解冻对猪肉品质特性和微观结构的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 982-988.
- [19] 丁俭, 李杨, 史博瑞, 等. 超声改性大豆分离蛋白与大豆可溶性多糖复合乳化体系的冻融稳定性研究 [J]. 食品科学, 2018, 39(9): 88-94.
- [20] 伍敏晖, 韩丽丽, 陈朝青, 等. 不同食品级乳化剂对姜黄素乳液贮存稳定性的影响 [J]. 食品科技, 2017, 42(10): 270-274.
- [21] Qian C, Decker E A, Xiao H, et al. Physical and chemical stability of β -carotene-enriched nanoemulsions: Influence of pH, ionic strength, temperature and emulsifier type [J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1221-1229.
- [22] Luo X, Zhou Y, Bai L. Fabrication of β -carotene nanoemulsion-based delivery systems using dual-channel microfluidization: physical and chemical stability [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 490: 328-335.
- [23] Pereira R N, Teixeira J A, Vicente A A. Exploring the denaturation of whey proteins upon application of moderate electric fields: a kinetic and thermodynamic study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(21): 11589-11597.