

淀粉基番茄红素复合物的储藏稳定性及降解动力学变化

孙世东¹, 孟凯丽², 赵文红^{3*}

(1. 郑州科技学院食品科学与工程学院, 河南郑州 450064)

(2. 郑州医药健康职业学院检验学院, 河南郑州 450199) (3. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450000)

摘要: 为了研究淀粉基番茄红素复合物的储藏稳定性及降解动力学, 对 ALCs (Amylose-Lycopene Complexes, ALCs) 的色泽、抗氧化活性和番茄红素保留率变化等指标进行测定。研究发现: ALCs 具有良好的色泽, 在储藏前 7 d 颜色无显著变化; 常温无氧避光储藏 28 d 后, 其颜色衰减率仅为 26.51%。此外, ALCs 中番茄红素的保留率和对 DPPH 自由基的清除率分别高达 65.84% 和 23.54%, 均显著高于对照组直链淀粉-番茄红素物理混合物 11.37% 的保留率和 4.97% 的清除率 ($P < 0.01$); 同时, 储藏过程中, ALCs 中番茄红素的降解符合二级动力学模型, 其半衰期 $T_{1/2}$ 和十分之一衰期 $T_{9/10}$ 分别为 57.99 d 和 8.78 d, 显著优于对照组的 8.70 d 和 1.32 d。结果显示, ALCs 表现出优异的储藏稳定性, 有效维持番茄红素的色泽、含量及抗氧化活性, 为稳定植物来源的番茄红素功能成分提供理论依据。

关键词: 直链淀粉-番茄红素复合物; 储藏; 抗氧化; 降解

文章编号: 1673-9078(2024)08-32-38

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.1153

Changes in Storage Stability and Degradation Kinetics of Starch-based Lycopene Complexes

SUN Shidong¹, MENG Kaili², ZHAO Wenhong^{3*}

(1. School of Food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)(2. School of Laboratory Medicine, Zhengzhou Medical and Health Vocational College, Zhengzhou 450199, China)(3. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The storage stability and degradation kinetics of amylose-lycopene complexes (ALC) were studied by evaluating various indicators, such as color attributes, antioxidant efficacy, and lycopene retention rate. ALCs demonstrated excellent color stability, exhibiting no significant color changes in the initial seven-day pre-storage period. After 28 days of storage under anoxic conditions at ambient temperature and being shielded from light, the complexes exhibited a 26.51% color degradation rate. Moreover, ALCs had a high lycopene retention rate of 65.84% and an effective scavenging capacity for DPPH radicals of 23.54%, both significantly surpassing the amylose-lycopene physical blend of the control group, which showed a retention rate of 11.37% and a scavenging rate of 4.97% ($P < 0.01$). ALC lycopene degradation over the storage duration adhered to a second-order kinetic model, with a half-life ($T_{1/2}$) of 57.99 days and a one-tenth life ($T_{9/10}$) of 8.78 days,

引文格式:

孙世东,孟凯丽,赵文红.淀粉基番茄红素复合物的储藏稳定性及降解动力学变化[J].现代食品科技,2024,40(8):32-38.

SUN Shidong, MENG Kaili, ZHAO Wenhong. Changes in storage stability and degradation kinetics of starch-based lycopene complexes [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 32-38.

收稿日期: 2024-04-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0400200); 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室开放基金 (KL-2018-18)

作者简介: 孙世东 (1995-), 男, 硕士, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: 3149027330@qq.com

通讯作者: 赵文红 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: zhwh2010@126.com

substantially outperforming that of the control group at 8.70 and 1.32 days, respectively. The results underscore the superior storage stability of ALCs, which effectively preserve the color, content, and antioxidative properties of lycopene, thus providing a theoretical groundwork for stabilizing functional components of plant-derived lycopene.

Key words: amylose-lycopene complexes; storage; antioxidant; degradation

番茄红素 (Lycopene) 是一种植物源类胡萝卜素, 也是一种含有多不饱和键的异戊二烯类化合物^[1], 番茄红素全反式结构见图 1。基于其特殊的多不饱和键结构, 使得番茄红素具有非常强的抗氧化活性^[2]。番茄红素具备抵抗癌症^[3,4]、预防动脉粥样硬化等心血管疾病^[5]、增强机体免疫力^[6]和增强男性生殖系统健康^[7]等多种重要生物活性。番茄红素属于天然的脂溶性红色素, 在生产中被广泛使用的食品添加剂, 具有很高的经济效益。同时联合国粮农组织和世界卫生组织已认定番茄红素为 A 类营养素^[8], 在食品、保健品和化妆品等领域也逐渐得到了广泛应用^[9]。

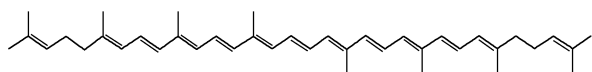


图 1 全反式番茄红素结构式

Fig.1 Structuration of trans-lycopene

然而, 番茄红素的多不饱和键结构使其易受光照、pH 值、氧气和高温等环境的影响, 导致降解^[10,11], 这无疑对工业化大规模生产构成挑战。采用制剂技术能提升番茄红素的稳定性^[12], 常见的制剂形式包括包合型复合物^[13]、微胶囊化技术^[14]、脂质体技术^[15]和乳化技术^[16]。其中, 包合技术能够将一种分子包嵌于另一种分子的空穴结构内形成包合物, 该技术能有效提升像番茄红素、姜黄素和花青素这类功能性物质的稳定性。李万茸等^[17]制备了 β -酸-番茄红素/羟丙基- β -环糊精, 检测发现在避光条件下保持 16 d 后, 番茄红素保留率达 60% 以上。直链淀粉, 作为一种常见的食品基质, 在应用于食品生产加工方面具有天然优势。经过热处理后直链淀粉能打开其螺旋结构, 从而达到对功能性小分子进行封装的效果^[18,19]。前期工作已利用直链淀粉的沉淀特性制备了直链淀粉-番茄红素复合物 (Amylose-Lycopene Complexes, ALCs), 并对其多尺度结构以及对热、氧、光和酸碱的稳定性进行了分析^[20,21], 但其储藏稳定性尚未明确。本研究以物理混合的直链淀粉-番茄红素物理混合物 (Amylose-Lycopene Mixtures, ALMs) 为对照, 观察 ALCs 在常规无氧避光环境下, 颜色变化、抗氧化性能和番茄红素保留率随时间的演变, 以及降解动力学, 以

此评估其储藏稳定性, 旨在揭示淀粉基复合制剂如何保护番茄红素, 为番茄红素稳定制剂的研发和食品行业的应用提供实用参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

直链淀粉, 购于荃银祥玉 (北京) 生物科技有限公司; 番茄红素, 购于北京万佳首化生物科技有限公司; 2,2-联苯基-1-苦基肼基, 购于上海吉至生化科技有限公司; 氢氧化钠、二甲基亚砷、丙酮、无水乙醇, 均购于安徽金粤冠新材料科技有限公司; 氮气, 购于南通通扬吸附工程设备有限公司; 蒸馏水, 实验室自制。

1.2 主要仪器与设备

L3S 型紫外-可见分光光度计, 梅特勒托利多国际有限公司; UGC-24WT 型触控屏水浴氮吹仪, 北京优晟联合科技有限公司; SN-QX-08E 型超声波仪, 张家港市吉创超声科技有限公司; YZG/FZG 型真空干燥箱, 上海思派瑞环境试验设备有限公司; C-MAG HS4 型磁力搅拌器, 艾卡 (广州) 仪器设备有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 ALCs的制备

参照孙世东等^[22]的方法, 并稍作修改。清洗程序: 先用无水乙醇涡旋震荡, 再离心作用 30 min, 弃去上清液, 重复 2 遍, 最后使用氮气吹扫仪将剩余无水乙醇吹干, 冷干沉淀后即得 ALCs。所有操作均在避光、充氮气环境下完成。将直链淀粉和番茄红素粉末进行简单物理混合即得对照样品 ALMs。

1.3.2 ALCs色泽测定

试验以 ALMs 为对照组, 参照李亚楠等^[23]的方法, 研究 ALCs 的色泽稳定性。将 ALCs 置于常温无氧避光条件下, 拍照记录其在第 0、7、14、21 和 28 天时的色泽变化照片, 每张照片拍摄 5 张 400 \times 的照片, 然后用 IPP 6.0 (Image-Pro Plus 6.0) 图像分析系统测定 ALCs 和 ALMs 的平均光密度值 (Average Optical Density, AOD), 并依照计算公式 (1) 计算其衰减率。

$$Ar = \frac{B_0 - B_t}{B_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

Ar —颜色衰减率, %;

B_0 —ALCs的初始平均光密度值(AOD₀);

B_t —储藏第 t 天时 ALCs 的平均光密度值(AOD _{t})。

1.3.3 ALCs中番茄红素保留率测定

参考杜欣雨等^[24]的方法,并稍作修改。利用紫外可见分光光度计测定梯度浓度的番茄红素丙酮溶液在特征吸收峰 447 nm 处的吸光度,得标准曲线方程。将样品溶于丙酮后,经超声萃取并离心处理,测定吸光度后代入方程,即得 ALCs 中番茄红素的含量,并依照下式计算保留率。

$$Rr = \frac{C_t \times V_t}{C_0 \times V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

Rr —番茄红素保留率, %;

C_0 —ALCs 中番茄红素的初含量, $\mu\text{g}/\text{mL}$;

C_t — t d 时 ALCs 中番茄红素的含量, $\mu\text{g}/\text{mL}$;

V_0 —萃取 ALCs 初始样品中番茄红素所需丙酮的体积, mL;

V_t — t d 时萃取 ALCs 中番茄红素所需丙酮的体积, mL。

1.3.4 ALCs抗氧化活性测定

采用 DPPH 自由基清除法来反映 ALCs 的抗氧化活性变化。参考赵佳伟等^[25]的方法,并稍作修改。以丙酮为参比溶液,按下式计算样品对 DPPH 自由基的清除率:

$$Cr = \frac{A_2 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

Cr —DPPH 自由基清除率, %;

A_0 —DPPH 无水乙醇溶液与丙酮(3:1)的吸光度;

A_1 —无水乙醇与 ALCs 丙酮溶液(3:1)的吸光度;

A_2 —反应后 DPPH 溶液和 ALCs 溶液的混合物的吸光度。

1.3.5 ALCs中番茄红素降解动力学模型构建

参考赵伟等^[26]的研究方法,采用阿伦尼乌斯方程对番茄红素的降解动力学进行分析。并经以下零级、一级和二级降解动力学方程式进行拟合:

$$y_0 = C_0 - C_t = kt + b \quad (4)$$

$$y_1 = \ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = kt + b \quad (5)$$

$$y_2 = \frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = kt + b \quad (6)$$

同时利用降解动力学方程计算 ALCs 中番茄红素的降解速率常数 k [$\mu\text{g}/(\text{mL} \cdot \text{h})$]、半衰期 $T_{1/2}$ (d) 和十分之一衰期 $T_{9/10}$ (d) 等降解动力学参数。

1.3.6 数据处理

采用 SPSS 26 软件对试验数据进行统计分析,所有指标以平均值 \pm 标准差 ($\bar{X} \pm S$) 的形式呈现,利用 Origin 2023 和 Microsoft Excel 2023 生成图表,并进行邓肯假定等方差分析。

2 结果与分析

2.1 ALCs的色泽变化分析

不同储藏时间下 ALCs 和 ALMs 的色泽变化如图 2 所示。ALCs 和 ALMs 在常温无氧避光条件下储藏 28 d 的 AOD 值变化见表 1。

表 1 ALCs和ALMs在常温无氧避光条件下储藏28 d的 AOD值变化

Table 1 Changes in AOD values of ALCs and ALMs stored at room temperature, oxygen free, and dark conditions for 28 days

储藏时间/d	ALCs		ALMs	
	AOD	衰减率/%	AOD	衰减率/%
0	0.83 \pm 0.08 ^{Aa}	6.02	0.50 \pm 0.10 ^{Ba}	16.00
7	0.78 \pm 0.05 ^{Aa}	14.46	0.42 \pm 0.08 ^{Bb}	32.00
14	0.71 \pm 0.04 ^{Aa}	15.66	0.33 \pm 0.07 ^{Bbc}	34.00
21	0.70 \pm 0.03 ^{Aba}	26.51	0.27 \pm 0.03 ^{Bc}	46.00
28	0.61 \pm 0.17 ^{Ab}			

注:表中的大写字母不同表示组间显著差异,小写字母不同表示组内显著差异。

由图 2 和表 1 可知,制剂后的 ALCs 色泽更深,其 AOD 值达 0.83,显著高于 ALMs ($P < 0.01$);在常温无氧避光条件下,ALCs 和 ALMs 的色泽随储藏时间的延长均呈现逐渐减弱的趋势,但制剂后的 ALCs 更具色泽稳定性。ALCs 在储藏前期色泽无显著变化,而 ALMs 在常温无氧避光条件下第 7 天,色泽即明显变淡,由最初的 0.50 降低为 0.42,变化幅度达 16.00%;储藏 28 d 时,ALCs 的 AOD 值降至 0.61,而 ALMs 的 AOD 值降至 0.27;ALCs 的颜色衰减率为 26.51% (28 d),变化幅度明显小于 ALMs 的 46.00%。综上可知,ALCs 具有良好的色泽稳定性。韩鹏祥^[27]认为随着储藏时间的延长,番茄红素的色泽逐渐变浅。究其原因,这可能是由于番茄红素的色泽与其含量线性相关^[28]。Amiri-rigi 等^[29]考察发现经制剂化后,番茄红素微乳在 25 $^{\circ}\text{C}$ 储藏过程中颜色无明显变化,而对照品则因为番茄红素损失而几乎透明。

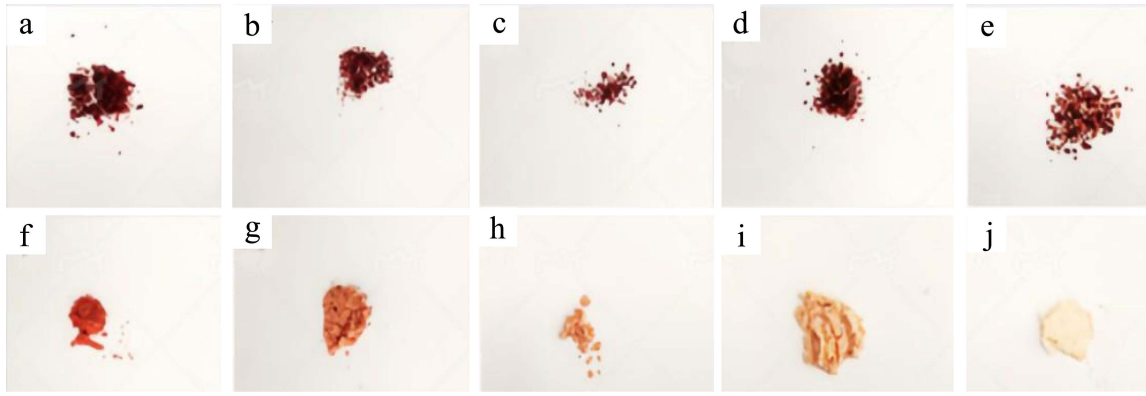


图2 不同储藏时间的ALCs和ALMs的颜色变化图

Fig.2 Color changes of ALCs and ALMs with different storage times

注: a-e和f-j分别为ALCs和ALMs储藏的第0、7、14、21和28天。

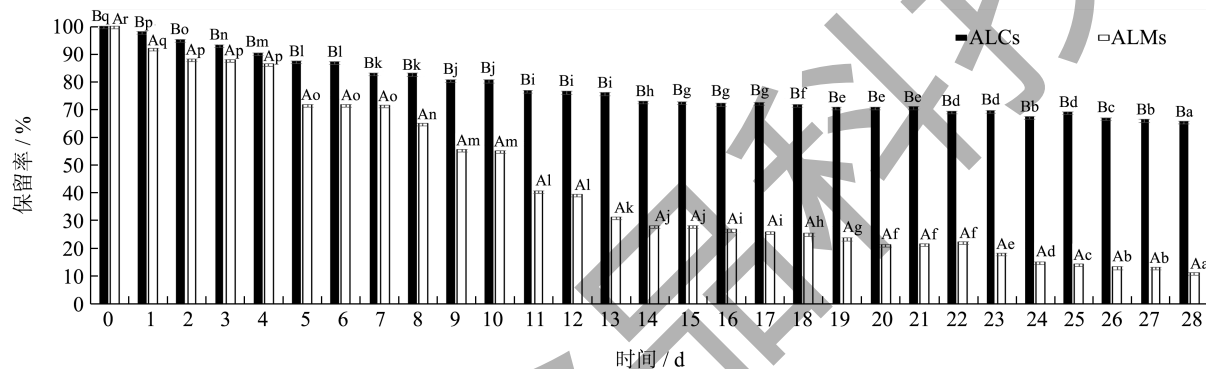


图3 储藏过程中ALCs和ALMs的番茄红素保留率变化

Fig.3 Changes in lycopene retention rates of ALCs and ALMs during storage

注: 图中的大写字母不同表示组间显著差异, 小写字母不同表示组内显著差异。

2.2 ALCs含量变化分析

为了研究ALCs中番茄红素的稳定性变化, 观察在常温无氧避光条件下ALCs储藏28d期间其番茄红素保留率变化, 结果见图3。

如图3所示, 随着储藏时间增加, ALCs和ALMs中番茄红素的保留率均呈递减趋势, 但ALCs的保留率显著优于ALMs ($P < 0.05$)。在储藏至5、14和28d后, ALCs中的番茄红素保留率为87.62%、73.12%和65.84%, 均显著高于ALMs的71.86%、28.29%和11.37% ($P < 0.01$)。综上所述可知, 在常温无氧避光条件下, 随储藏时间延长, 复合物中的番茄红素逐渐损失, 但ALCs中番茄红素的保留率均显著优于对照组。ALCs的独特包合复合物结构可能是关键因素, 相较于直链淀粉和番茄红素的单纯物理混合, ALCs能促使番茄红素深入直链淀粉的疏水螺旋空间, 并形成紧密的双螺旋结构, 从而增强其稳定性^[30-32], 从而增强了番茄红素

的稳定性。徐建中等^[33]发现番茄红素制剂在40℃、75%RH环境下4d后保留率仍为97.0%, 显著高于番茄红素晶体的1.1%。Dos等^[34]研发了负载番茄红素的纳米颗粒, 在室温下储存14d后番茄红素的保留率仍为50%。顾婷婷等^[35]观察脱支糯米淀粉-番茄红素包合物在光照下48h后番茄红素保留率高达82%, 高于物理混合物的65%。即包合物可降低番茄红素的劣化, 具有良好的稳定性。Pelissari等^[36]研究发现番茄红素脂质体在储藏90d后其保留率仍达40%。Dos等^[37]利用聚ε-己内酯包封番茄红素, 发现在5℃冷藏过程中, 样品的平均直径和ζ电位保持稳定84d, 番茄红素含量约为40%, 远大于未经处理对照组, 即纳米封装可显著提高番茄红素的稳定性。

2.3 ALCs的抗氧化活性变化分析

测定ALCs在常温无氧避光条件下储藏28d期间的抗氧化活性变化, 测定结果见下图4。

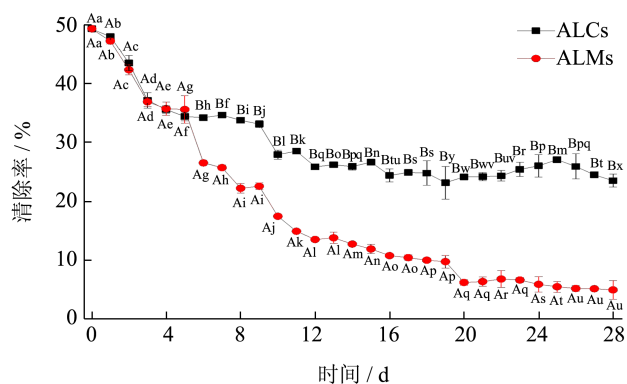


图4 储藏过程中 ALCs 和 ALMs 的抗氧化活性变化

Fig.4 Changes in antioxidant activity of ALCs and ALMs during storage process

注：图中的大写字母不同表示组间显著差异，小写字母不同表示组内显著差异。

由图4可知，ALCs和ALMs的DPPH清除率随储藏时间的延长均呈降低趋势。储藏过程中，ALCs对DPPH的清除率均高于ALMs。储藏第6和28天时，ALCs对DPPH清除率分别为34.27%和23.54%，显著高于ALMs的26.57%和4.97% ($P < 0.01$)。储藏前后，ALCs对DPPH清除能力下降了48%，而ALMs则减少了89%。上述结果表明，ALCs能够有效保持番茄红素的抗氧化活性，其原因是ALCs

中的番茄红素在储藏期间保留率更高。前人研究表明，将不同剂量的番茄红素加入到猫粮中，研究发现在一定剂量下番茄红素添加量越大，对猫机体抗氧化作用效果越强^[38]。孟好等^[39]发现高浓度的番茄红素能显著提高鲫鱼对羟自由基的清除率。Cheng等^[40]认为红色成熟阶段的番茄中番茄红素含量较高，表现出更高的抗氧化活性。Gomes等^[41]以硬脂酸和葵花籽油为载体制备了负载 β -胡萝卜素的脂质微粒，在7~10℃下避光冷藏7个月后 β -胡萝卜素保留率高达90%。即ALCs能够有效保留番茄红素，从而表现出较强的抗氧化能力。

2.4 ALCs中番茄红素的降解动力学分析

根据标准曲线计算ALCs中番茄红素的含量，见表2。

对测定的ALCs中番茄红素的含量进行拟合，结果见图5。在常温无氧避光条件下ALCs中番茄红素的降解动力学拟合方程 R^2_{y2} 值最大，即符合二级反应动力学模型，降解速率与番茄红素起始浓度的平方成正比；而ALMs的 R^2_{y1} 最大，即符合一级反应动力学模型，降解速率与番茄红素起始浓度的一次方成正比。

表2 储藏过程中ALCs和ALMs中番茄红素的含量变化

Table 2 Variation of lycopene content in ALCs and ALMs during storage

时间/d	ALCs	ALMs	时间/d	ALCs	ALMs	时间/d	ALCs	ALMs
0	14.38 ± 0.00 ^{Bq}	14.38 ± 0.00 ^{As}	10	11.60 ± 0.01 ^{Bj}	7.95 ± 0.00 ^{Al}	20	10.19 ± 0.02 ^{Bc}	3.09 ± 0.01 ^{Af}
1	14.10 ± 0.00 ^{Bp}	13.25 ± 0.00 ^{Ar}	11	11.06 ± 0.01 ^{Bi}	5.86 ± 0.00 ^{Ak}	21	10.21 ± 0.02 ^{Bc}	3.13 ± 0.00 ^{Af}
2	13.71 ± 0.00 ^{Bo}	12.70 ± 0.02 ^{Aq}	12	11.01 ± 0.01 ^{Bi}	5.69 ± 0.00 ^{Ak}	22	10.00 ± 0.02 ^{Bd}	3.24 ± 0.00 ^{Af}
3	13.42 ± 0.00 ^{Bn}	12.67 ± 0.00 ^{Ap}	13	10.94 ± 0.01 ^{Bi}	4.50 ± 0.00 ^{Aj}	23	10.01 ± 0.01 ^{Bd}	2.63 ± 0.00 ^{Ac}
4	12.99 ± 0.00 ^{Bm}	12.45 ± 0.02 ^{Ao}	14	10.51 ± 0.01 ^{Bh}	4.07 ± 0.00 ^{Aj}	24	9.71 ± 0.02 ^{Bb}	2.19 ± 0.00 ^{Ad}
5	12.60 ± 0.00 ^{Bl}	10.33 ± 0.00 ^{An}	15	10.46 ± 0.01 ^{Bg}	4.06 ± 0.00 ^{Ai}	25	9.96 ± 0.01 ^{Bd}	2.08 ± 0.00 ^{Ac}
6	12.54 ± 0.00 ^{Bl}	10.32 ± 0.01 ^{An}	16	10.38 ± 0.03 ^{Bg}	3.87 ± 0.02 ^{Ai}	26	9.64 ± 0.02 ^{Bc}	1.93 ± 0.00 ^{Ab}
7	11.97 ± 0.01 ^{Bk}	10.31 ± 0.00 ^{An}	17	10.43 ± 0.03 ^{Bg}	3.76 ± 0.00 ^{Ah}	27	9.55 ± 0.02 ^{Bb}	1.91 ± 0.00 ^{Ab}
8	11.94 ± 0.02 ^{Bk}	9.36 ± 0.00 ^{Am}	18	10.33 ± 0.03 ^{Bf}	3.67 ± 0.02 ^{Ag}	28	9.47 ± 0.01 ^{Ba}	1.63 ± 0.00 ^{Aa}
9	11.61 ± 0.01 ^{Bj}	8.01 ± 0.00 ^{Al}	19	10.20 ± 0.03 ^{Bc}	3.42 ± 0.00 ^{Ag}			

注：表中的大写字母不同表示组间显著差异，小写字母不同表示组内显著差异。

表3 储藏过程中ALCs和ALMs的降解动力学参数

Table 3 Degradation kinetic parameters of ALCs and ALMs during storage

样品名称	方程式	速率常数 k	半衰期/($T_{1/2}$,d)	十分之一衰期/($T_{9/10}$,d)	反应级数
ALCs	$1/C_t - 1/C_0 = 0.0012x + 0.0036$	0.0012	57.99	8.78	二级
ALMs	$\ln(C_t/C_0) = 0.0797x - 0.0698$	0.0797	8.70	1.32	一级

依据降解动力学方程分别计算 ALCs 动力学相关参数, 结果见表 3。ALCs 的半衰期 $T_{1/2}$ 和十分之一衰期 $T_{9/10}$ 分别为 57.99 d 和 8.78 d 均显著优于 ALMs 的 8.70 d 和 1.32 d。对照组表现出更短的半衰期, 是由于样品在储藏过程中更易降解损失^[42]; 因此认为制剂化 ALCs 可有效延缓番茄红素的降解, 增加储藏稳定性。这是因为直链淀粉构建的复合体系为番茄红素提供保护, 显著增强了番茄红素的储存稳定性。

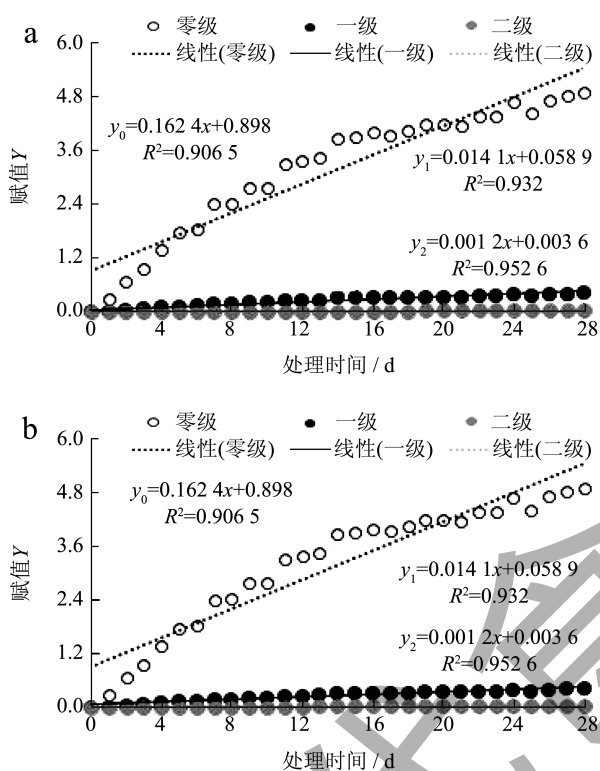


图5 储藏过程中 ALCs 和 ALMs 的降解动力学拟合图

Fig.5 Fitting diagram of degradation kinetics of ALCs and ALMs during storage

注: (a) ALCs; (b) ALMs。

3 结论

本研究通过观察在常温无氧避光条件下 ALCs 的色泽、抗氧化活性、番茄红素保留率及其降解动力学等指标变化, 发现 ALCs 有良好的储藏稳定性。制剂 ALCs 色泽较稳定。在储藏过程中: 制剂后的 ALCs 比 ALMs 呈现更深的色泽, 其 AOD 值达 0.83, 显著优于 ALMs ($P < 0.01$); 经过 28 d 储藏后, ALCs 的 AOD 值仅下降到 0.61, 而 ALMs 的 AOD 值则降到 0.27。这显示出制剂复合物对于色彩保持的显著优势, 其衰减率仅为 26.51%, 远低于 ALMs 的 46.00%。ALCs 能有效维护番茄红

素的含量。14 d 和 28 d 番茄红素保留率分别为 73.12% 和 65.84%, 显著优于 ALMs 的 28.29% 和 11.37% ($P < 0.01$) (见图 3)。ALCs 的抗氧化性能也得到保持。对 DPPH 自由基的清除率在 6 d 和 28 d 分别为 25.94% 和 23.54%, 均显著高于 ALMs 的 12.76% 和 4.97% ($P < 0.01$)。深入探究了 ALCs 中番茄红素的降解行为。在常温无氧避光条件下, 其降解过程遵循二次反应动力学模型; ALCs 中番茄红素的 $T_{1/2}$ 和 $T_{9/10}$ 分别为 57.99 d 和 8.78 d。研究为 ALCs 稳定环境的研究提供理论基础, 促进植物性营养因子番茄红素的广泛应用。

参考文献

- [1] 张红艳, 石凯欣, 潘思铁. 番茄红素异构化研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 330-339.
- [2] CHO K S, SHIN M, KIM S, et al. Recent advances in studies on the therapeutic potential of dietary carotenoids in neurodegenerative diseases [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018, 2018: 4120458.
- [3] 井子良, 吴纯宇, 张慧敏, 等. 灵芝孢子油番茄红素复合物的抗肿瘤作用[J]. 现代食品科技, 2022, 38(9): 46-51.
- [4] 刘伟, 杨树芹, 赵序雯. 番茄红素通过 SIRT1/NF- κ B 轴抑制肾癌 786-O 细胞增殖且促进其凋亡[J]. 中国肿瘤生物治疗杂志, 2023, 30(9): 789-796.
- [5] PETYAEV I M, DOVGALEVSKY P Y, KLOCHKOV V A, et al. Effect of lycopene supplementation on cardiovascular parameters and markers of inflammation and oxidation in patients with coronary vascular disease [J]. *Food Science & Nutrition*, 2018, 7: 1551-1555.
- [6] 刘会晓, 孙清瑞, 熊文慧, 等. 番茄红素纳米结构脂质体的制备[J]. 中国油脂, 2018, 43(3): 65-69.
- [7] 薛蓉, 游名洋, 彭海燕, 等. 蓝莓花色苷和番茄红素对丙烯酰胺致雌性大鼠生殖毒性的影响[J]. 饮食保健, 2020, 51: 289-290.
- [8] 巴宁宁, 王英明, 刘蕊, 等. 番茄红素制剂化技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(3): 45-49.
- [9] HAN G M, LIU P. Higher serum lycopene is associated with reduced prevalence of hypertension in overweight or obese adults [J]. *European Journal of Integrative Medicine*, 2017, 13: 34-40.
- [10] 赵文红, 严婷婷, 尹文婷, 等. 增强番茄红素稳定性制剂的研究进展[J]. 现代食品科技, 2019, 35(12): 329-336.
- [11] 姜欣, 杨成, 马璐璐, 等. 热处理对不同颜色番茄中类胡萝卜素异构化和降解的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(3): 65-73.
- [12] LI H, ZHANG J, WANG Y, et al. The effects of storage conditions on lycopene content and color of tomato hot pot sauce [J]. *International Journal of Analytical Chemistry*,

- 2018, (2018):1273907.
- [13] 汪少峰,王海翔,王岁楼.番茄红素- β -环糊精包合物制备工艺的优化[J].食品工业,2015,36(9):61-65.
- [14] 林蔚婷,贾承胜,夏书芹,等.抗氧化型壁材包埋番茄红素微胶囊的研究[J].食品与生物技术学报,2018,37(1):50-57.
- [15] 刘彦君,潘丽,常振刚,等.植物甾醇 α -亚麻酸酯的制备及在负载虾青素脂质体中的应用[J].食品与机械,2022,38(12):133-138,144.
- [16] AMIRI-RIGI A, ABBASI S. Stability assessment of lycopene microemulsion prepared using tomato industrial waste against various processing conditions [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97: 4922-4928.
- [17] 李万茸,田秉仁,许丹,等. β -酸-番茄红素/HP- β -CD复合包合物的制备及稳定性[J].食品科学,2022,43(6):17-26.
- [18] JEONG H M, LEE Y, SHIN Y J, et al. Development of an enzymatic encapsulation process for a cycloamylose inclusion complex with resveratrol [J]. *Food Chemistry*, 2021, 345(4): 128777.
- [19] ISASCHAROVDAT S, SHANILEVI C, LESMES U. Capsaicin stability and bio-accessibility affected by complexation with high-amylose corn starch (HACS) [J]. *Food & Function*, 2021, 12: 6992-7000.
- [20] 孙世东,赵文红.直链淀粉-番茄红素复合物的热稳定性及降解动力学变化[J].现代食品科技,2022,38(12):8-15.
- [21] 赵文红,何颖,宫兆海,等.基于多尺度结构表征研究直链淀粉-番茄红素复合物的组装方式[J].食品科学,2024,45(4):18-25.
- [22] 孙世东,赵文红,任顺成.直链淀粉-番茄红素复合物的光稳定性及降解动力学研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2023,44(4):26-34.
- [23] 李亚楠,马骏,余沛豪,等.鱼藤酮帕金森病模型的建立与评价[J].中华中医药学刊,2020,38(3):175-179.
- [24] 杜欣雨,王金庆,王园园,等.干燥方式对黑塌菜粉品质的影响[J].食品与机械,2023,39(6):149-154,160.
- [25] 赵佳伟,郑佳,李茂,等.苦荞酒酒糟中酚类化合物成分分析及其体外抗氧化活性[J].食品与机械,2024,40(2):146-151.
- [26] 赵伟,黄佳琪.干燥方式对蓝莓花青素降解特性及抗氧化能力的影响[J].食品与机械,2023,39(2):147-152.
- [27] 韩鹏祥.脉冲强光结合不同温度处理对采后樱桃番茄生理和品质的影响[D].锦州:渤海大学,2015.
- [28] 潘思轶.红葡萄柚番茄红素和色泽热降解动力学及降解机制[J].食品科学,2017,38(11):81-88.
- [29] AMIRI-RIGI A, ABBASI S. Lycopene microemulsion storability: monitoring colour and rheological properties [J]. *International Nano Letters*, 2020, 10(2): 119-129.
- [30] 周斌.V型淀粉的结构变化及其对消化性能的影响[J].食品工业,2018,39(10):208-212.
- [31] CERVANTES-RAMIREZ J E, CABRERA-RAMIREZ A H, MORALES-SÁNCHEZ E, et al. Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 246:116555.
- [32] KUMAR K, LOOS K. Morphological characteristics of amylose-poly (tetrahydrofuran) inclusion complexes depending on temperature and concentration [J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2020, 221: 2000122.
- [33] 徐建中,贾新超,杨文江,等.番茄红素微胶囊制备研究[J].食品工业,2017,38(3):108-112.
- [34] DOS SANTOS P P, PAESE K, GUTERRES S S, et al. Development of lycopene-loaded lipid-core nanocapsules: physicochemical characterization and stability study [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, 17(2): 1-11.
- [35] 顾婷婷.脱支糯米淀粉的制备及其包含番茄红素的应用研究[D].合肥:安徽农业大学,2023.
- [36] PELISSARI J R, SOUZA V B, PAGOSA A A, et al. Production of solid lipid microparticles loaded with lycopene by spray chilling: structural characteristics of particles and lycopene stability [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 98: 86-94.
- [37] DOS SANTOS P P, PAESE K, GUTERRES S S, et al. Stability study of lycopene-loaded lipid-core nanocapsules under temperature and photosensitization [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 71: 190-195.
- [38] 张丽霞,刘瑞雪,何密雪.饲料添加番茄红素对猫机体抗氧化作用的影响研究[J].中国饲料,2023,23:121-125.
- [39] 孟好,杨鸾劫,王建美,等.饲料中补充番茄红素对鲫鱼抗氧化能力的影响[J].安徽农业大学学报,2011,38(1):59-64.
- [40] CHENG W, LI S, BAO F. The changes of antioxidant contents and antioxidant activities of the tomato cultivar fentailang during the maturity stages [J]. *Journal of Oleo Science*, 2023, 72(6): 577-583.
- [41] GOMES G, BORRIN T R, CARDOSO L P, et al. Characterization and shelf life of β -carotene loaded solid lipid microparticles produced with stearic acid and sunflower oil [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2013, 56(4): 663-671.
- [42] KARASU S, SAGDIC O, ARICI M, et al. Optimization of microencapsulation conditions of tulip petal anthocyanin: storage stability test [J]. *Latin American Applied Research*, 2020, 50(3): 221-226.