

硬脂酰氯改性莲原花青素低聚体的稳定性 与抗氧化作用研究

石嘉悻^{1,3}, 邓乾春², 张亚楠³, 全双², 陈亚淑^{2,3}

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 南京 210023; 2. 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062;

3. 华中农业大学食品科学与技术学院, 武汉 430070)

摘要:研究了硬脂酰氯改性莲原花青素低聚体在酸、碱、氧化剂、还原剂和食品中常见的阴、阳离子等不同环境体系中的稳定性,以及莲原花青素低聚体改性物在油脂储藏与肉类保鲜中的潜在作用。结果表明:莲原花青素低聚体改性物在弱酸及在少量还原剂存在条件下可基本保持稳定,而在强酸、碱性、氧化剂环境中结构容易被破坏;同时莲原花青素低聚体改性物能在多数阴、阳离子中保持结构稳定,但在 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等水解性阳离子和 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等酸根离子中极易发生变化。另外,莲原花青素低聚体改性物在菜籽油及冷却猪肉的保鲜中展示出比莲原花青素低聚体更优良的效果,表明经过硬脂酰氯改性,莲原花青素低聚体的抗油脂体系氧化能力得到有效提高。

关键词:莲原花青素低聚体;莲原花青素低聚体改性物;稳定性;抗氧化;菜籽油;肉类保鲜

中图分类号:TS201.2;TS201.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)12-0060-06

Stability and antioxidant effect of stearyl chloride modified procyanidins oligomers from lotus seedpod

SHI Jiayi¹, DENG Qianchun², ZHANG Yanan³, QUAN Shuang², CHEN Yashu^{2,3}

(1. School of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023,

China; 2. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China;

3. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The stability of stearyl chloride modified procyanidins oligomers from lotus seedpod (modified-LSOPC) in different environmental systems, such as acid, alkali, oxidant, reducing agent, anion and cation commonly found in food, and its potential effect on oil storage and meat preservation were studied. The results showed that modified-LSOPC could be stable in the presence of weak acid and low amount of reducing agent, but its structure was easily destroyed in the environment of strong acid, alkali and oxidant. At the same time, modified-LSOPC could maintain stable structure in most of the anion and cation, but changed easily in hydrolytic cations such as Fe^{2+} , Fe^{3+} and Al^{3+} and acid radical ions such as CO_3^{2-} and HCO_3^- . The modified-LSOPC showed better preservation effect in rapeseed oil and cooling pork than LSOPC during long-term storage. All results illustrated that the antioxidative abilities of modified-LSOPC in lipid-related systems were improved effectively.

Key words: procyanidins oligomers from lotus seedpod; modified procyanidins oligomers from lotus seedpod; stability; antioxidation; rapeseed oil; meat preservation

收稿日期:2020-06-30;修回日期:2020-09-28

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2019YFC1605306-02)

作者简介:石嘉悻(1979),女,副教授,博士,研究方向为粮油质量安全(E-mail)jyshi@126.com。

通信作者:陈亚淑,助理研究员(E-mail)chenyashu@caas.cn。

添加抗氧化剂是一种最为常用的有效抑制食品油脂等体系氧化劣变,提高其加工储存稳定性的方法。现今油脂工业常用脂溶性合成抗氧化剂如叔丁基羟基茴香醚(BHA)、2,6-二叔丁基-4-甲基苯

酚(BHT)、特丁基对苯二酚(TBHQ)与没食子酸丙酯(PG)等均具有潜在的毒副作用和致癌、致畸风险,导致其在欧美、日本等一些国家和地区的使用受到严格限制^[1-3]。莲房富含B型莲原花青素,其低聚体(LSOPC)平均聚合度为3.2,主要成分为儿茶素、没食子酸儿茶素和由以上结构为单体构成的二聚体、三聚体和少量四聚体^[4]。现今,LSOPC在人体健康及生物利用领域的研究显示其在降低血脂、免疫调节、抗肿瘤、抗炎性、抗糖化、抗糖尿病等方面均具有较高的生物活性,也使得其成为继葡萄籽原花青素之后另一个广泛生产利用的天然抗氧化剂。

LSOPC在油脂体系中也表现出优良的抗氧化活性,在单独添加时其效果优于BHT,且当与卵磷脂、 V_E 复配使用时其抗油脂氧化能力更高,可有效延长油脂的氧化诱导期^[5]。除了具有优良的自由基清除能力,LSOPC还可以有效抑制脂肪氧合酶活性^[6]。虽然LSOPC具有良好的抗氧化活性,但因其酚羟基较多脂溶性较差,限制了其在油脂体系中的广泛应用。因此,为扩大LSOPC作为天然抗氧化剂在食品领域中的应用,须首先解决其在油脂体系中的溶解性问题。

目前,肉品市场中冷却肉占大多数的市场份额,其口感鲜嫩、风味良好、富含营养成分,但极易在加工、储藏、运输、销售的过程中腐败变质,造成品质下降,且对消费者的健康造成极大威胁。冷却肉的保鲜技术是现今肉制品行业研究的重要方向,其中主要包括保鲜剂制备、新型储藏技术、包装材料改良、辐照等技术^[7-8]。因此,本文首先对LSOPC进行硬脂酰氯改性修饰,并对其在油脂储藏及冷却肉保鲜方面的应用进行了研究,旨在为基于莲原花青素开发新型脂溶性抗氧化剂并拓展其利用提供理论依据,并为相关脂溶性抗氧化剂化学改性研究提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

莲原花青素粗提取物,由华中农业大学提供;菜籽油(不含添加剂),由中国农业科学院油料作物研究所提供;新鲜猪里脊肉,购于当地超市;硬脂酰氯,购于上海艾科达化学试剂有限公司;茶多酚棕榈酸酯,购于杭州普丽美地生物科技有限公司;TBHQ,购于国药集团化学试剂有限公司;碳酸氢钠、乙酸乙酯、无水乙醇、冰醋酸、氯仿等,均为分析纯。

RE-3000旋转蒸发仪,UV-2100紫外可见分

光光度计,DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器,SHZ-82A恒温振荡器。

1.2 试验方法

1.2.1 LSOPC的制备

取适量莲原花青素粗提取物,按照固液质量比1:30用蒸馏水溶解,置于超声波清洗仪以250 W、40 kHz处理20 min使之完全溶解,10 000 r/min条件下离心15 min,取红棕色上清液,抽滤。为了去除高聚物,在滤液中加入3倍体积的乙酸乙酯萃取,充分摇匀,静置至完全分层后,收集上层液,回收的下层液中再加入3倍体积乙酸乙酯,重复萃取。将上层液在40℃下旋干,加少量蒸馏水复溶,溶解的红棕色液体用塑料杯装适量,冷冻干燥得到的浅红棕色粉末即为LSOPC。根据此方法制备的LSOPC平均聚合度为3.2,主要含有儿茶素或表儿茶素(m/z 289)、没食子酸儿茶素或表没食子酸儿茶素(m/z 305.2)、原花青素二聚体(m/z 577.1)、原花青素三聚体(m/z 865.1)和少量原花青素四聚体(m/z 1 153.1)^[9]。

1.2.2 LSOPC改性物的制备

参照Zhong^[10]、邵卫梁^[11]、张亚楠^[12]等方法利用硬脂酰氯制备LSOPC改性物。取0.5 g LSOPC溶于40 mL乙酸乙酯中,依次加入0.75 g碱性催化剂碳酸氢钠、1 g硬脂酰氯(逐滴振荡加入),充氮气保护,在40℃水浴中振荡反应7 h,过滤得到深红棕色液体,用3倍体积的蒸馏水洗涤至溶液呈中性并将乙酸乙酯真空旋出,将得到的改性物干燥,研磨成粉末,置于自封袋中低温避光保存备用。

1.2.3 LSOPC改性物抗油脂氧化能力的测定

将分别添加0.02% LSOPC改性物、LSOPC、茶多酚棕榈酸酯、TBHQ的菜籽油及空白菜籽油样置于60℃烘箱内,按GB/T 5538—2005每4 d测定1次过氧化值。

1.2.4 不同体系对LSOPC改性物稳定性的影响

1.2.4.1 酸、碱对LSOPC改性物稳定性的影响

分别取配制的质量浓度1.0 mg/mL的LSOPC改性物95%乙醇溶液10 mL于比色管中,依次加入0、1、3、5、7、9 mL 0.01 mol/L的盐酸或氢氧化钠溶液,然后用蒸馏水定容至20 mL,混匀后室温下放置1 h,取样品溶液1 mL用去离子水稀释至5 mL,进行紫外可见光谱扫描。

1.2.4.2 氧化剂、还原剂对LSOPC改性物稳定性的影响

分别取配制的质量浓度1.0 mg/mL的LSOPC改性物95%乙醇溶液10 mL于比色管中,依次加入

0、1、3、5、7、9 mL 3% 的双氧水或 0.1 mg/mL 的亚硫酸钠溶液,然后用蒸馏水定容至 20 mL,混匀后室温下放置 1 h,取样品溶液 1 mL 使用去离子水稀释至 5 mL,进行紫外可见光光谱扫描。

1.2.4.3 常见阴离子与阳离子对 LSOPC 改性物稳定性的影响

分别取配制的浓度为 0.1 mol/L 的阴离子溶液(氯化钠、硫酸钠、硝酸钠、碳酸钠、碳酸氢钠溶液)与阳离子溶液(氯化钠、氯化钾、氯化镁、氯化钙、硫酸亚铁、氯化铁和氯化铝溶液)5 mL 于 10 mL 容量瓶中,再分别用质量浓度为 1.0 mg/mL 的 LSOPC 改性物 95% 乙醇溶液定容,室温下放置 1 h,取样品溶液 1 mL 用去离子水稀释至 5 mL,进行紫外可见光光谱扫描。

1.2.5 肉样保鲜液配制与肉样处理

分别将 LSOPC 改性物、LSOPC、茶多酚棕榈酸酯、TBHQ 用无水乙醇配制成质量分数为 0.1% 的保鲜液。将检验检疫合格的新鲜猪里脊肉,剔除筋膜,无菌切成 50 g 左右的肉块,混匀,随机分成 5 组,每组 12 块。空白对照组在无菌水中浸渍,另外 4 组分别在对应的保鲜液中浸泡 1 min,自然沥干 3 min,然后装入编号、消毒的自封袋中,置于 0~4℃ 冰箱内冷藏保存,每隔 3 d 检测指标^[13]。

1.2.6 肉样保鲜指标的测定

1.2.6.1 汁液渗出率的测定

参照刘彩云等^[14]的方法,将冷藏的冷却猪肉取出,称取容器和肉的总质量(m_1),缓慢地取出肉样,储存期间渗出的肉汁仍留在容器中,这时称量盛有肉汁的容器质量(m_2),再倒出肉汁,并沥干 30 s,然后称容器的质量(m_3)。汁液渗出率(W)按下式计算。

$$W = (m_2 - m_3) / (m_1 - m_3) \times 100\% \quad (1)$$

1.2.6.2 pH 的测定

参照 GB/T 9695.5—2008《肉与肉制品 pH 测定》的方法用 pH 计测定

1.2.6.3 色差值的测定

采用 Minolta CR-400 色差计测定肉样表面 L^* (亮度)、 a^* (红度)和 b^* (黄度)。

1.2.6.4 TBA 值的测定

取出 10 g 肉样剁成糜状,加 50 mL 17.5% 三氯乙酸(含 0.1% EDTA),振荡 30 min,使其充分溶解;用滤纸过滤 2 次,准确移取 5 mL 上清液加入 5 mL TBA 溶液混匀,置于 90℃ 水浴内保温 40 min;取出冷却后于 4 000 r/min 离心 10 min;取出上清液,加 5 mL 氯仿摇匀,静置;待分层后取上清液分别在

532、600 nm 处测定吸光度(同时做空白试验)。TBA 值(T)按下式^[15-16]计算。

$$T = (A_{532} - A_{600}) / 155 \times (1/10) \times 72.6 \times 100 \quad (2)$$

与 TBA 反应的物质的量(TBARs)以每 100 g 肉中丙二醛的毫克数来表示,当 TBA 值大于等于 0.5 mg/100 g 时为变质肉。

1.2.7 数据分析

用 SPSS17.0 统计软件进行统计分析, $P < 0.01$ 表示具有极显著性差异, $P < 0.05$ 表示具有显著性差异。数据均以“平均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)”表示,用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 LSOPC 改性物对油脂抗氧化能力的影响(见图 1)

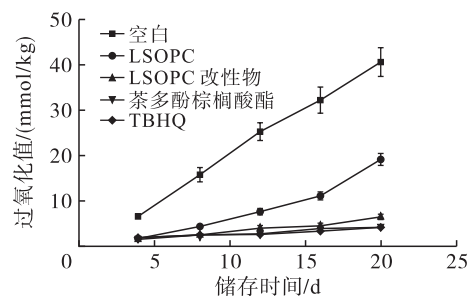


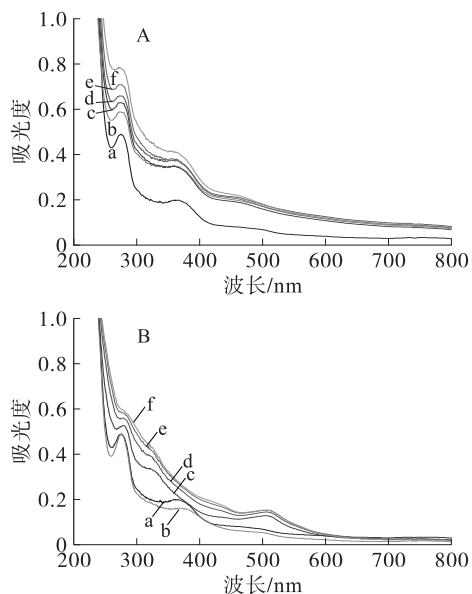
图 1 不同储存时间下抗氧化剂对菜籽油过氧化值的影响

从图 1 可以看出,所有菜籽油的过氧化值均随着储存时间的延长而增加,其中空白组氧化作用最明显,而 LSOPC 因其油溶性较差,在所有添加抗氧化剂的油样中其抗过氧化物生成的能力最弱,LSOPC 经过改性其抗油脂氧化活性显著提高,与抗氧化剂茶多酚棕榈酸酯、TBHQ 抗氧化效果相似,表明经过硬脂酰氯改性后的 LSOPC 在油脂体系中的抗氧化活性得到改善。

2.2 不同体系对 LSOPC 改性物稳定性的影响

2.2.1 酸、碱对 LSOPC 改性物稳定性的影响(见图 2)

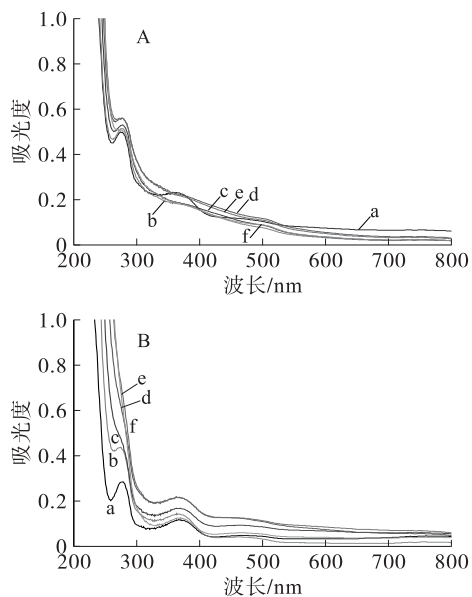
由图 2A 可知:随着加入的盐酸体积不断增大,LSOPC 改性物的溶液颜色和光谱图基本形状几乎没有发生明显变化(b~f),说明 LSOPC 改性物在酸性体系中是相对稳定的;但当盐酸浓度较高时,其特征吸收峰(276 nm)越来越弱,稳定性有所降低。从图 2B 可以看出,随着加入的氢氧化钠体积逐渐增大,LSOPC 改性物光谱图形发生明显变化,其两处特征吸收峰(276、370 nm)发生明显红移且越来越弱,加碱量较大时甚至在 510 nm 附近产生了新吸收宽峰且强度越来越大。这种不稳定可能是由于碱浓度过高引起 LSOPC 改性物的水解和氧化造成的。



注: a~f 对应加入 0.01 mol/L HCl 或 NaOH 的体积为 0、1、3、5、7、9 mL。

图2 LSOPC 改性物在酸性(A)、碱性(B)环境中的紫外光谱图

2.2.2 氧化剂、还原剂对 LSOPC 改性物稳定性的影响(见图3)



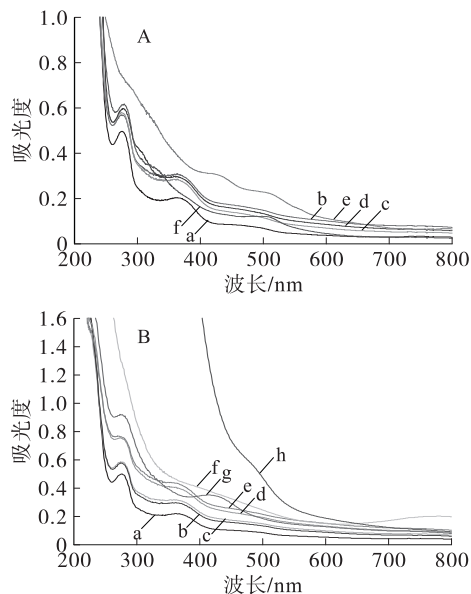
注: a~f 对应加入 H_2O_2 或 Na_2SO_3 的体积分别为 0、1、3、5、7、9 mL。

图3 LSOPC 改性物在氧化剂(A)、还原剂(B)环境中的紫外光谱图

由图3A可知,在LSOPC改性物溶液中,氧化剂双氧水的加入使得370 nm附近的特征吸收峰消失,而276 nm附近的特征吸收峰得到保留但吸收值降低(b~f),说明在氧化剂存在情况下LSOPC改性物极不稳定,与LSOPC的稳定性相一致,容易被氧化分解,其特征结构已经遭到破坏。由图3B可知,少量的还原剂对LSOPC改性物的稳定性没有明显的

影响,而当还原剂亚硫酸钠较多(c~f)时,其276 nm附近的特征吸收峰迅速遭到明显的破坏。

2.2.3 常见阴、阳离子对 LSOPC 改性物稳定性的影响(见图4)



注: a 为空白;图4A中 b~f 曲线对应加入的阴离子分别为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- ; 图4B中 b~h 曲线对应加入的阳离子分别为 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 。

图4 LSOPC 改性物在不同阴离子(A)、阳离子(B)环境中的紫外光谱图

从图4A可以看出,与空白比较,LSOPC改性物在 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 离子环境中比较稳定,溶液颜色和光谱图基本形状几乎没有发生明显变化。而在 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 离子环境中变化明显,其中 CO_3^{2-} 离子溶液中LSOPC改性物的两处特征吸收峰(276、370 nm)全部消失, HCO_3^- 离子溶液中370 nm附近的特征吸收峰消失而276 nm附近的特征吸收峰得到保留。产生这种变化主要与离子的水解性有关。与此同时,LSOPC改性物在 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 离子环境中颜色明显加深,尤其在 CO_3^{2-} 离子溶液中变化显著。从图4B可以看出,与空白比较,LSOPC改性物在 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子环境中比较稳定,溶液颜色和光谱图基本形状几乎没有发生明显变化,而在 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 离子环境中变化显著,特征吸收峰全部消失,在 Fe^{2+} 离子溶液中370 nm附近的特征吸收峰发生明显红移而276 nm附近的特征吸收峰得到保留。LSOPC改性物在 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 离子环境中稳定性极差主要是因为这些离子的水解导致的。

2.3 LSOPC 改性物对肉样保鲜的影响

2.3.1 冷却猪肉汁液的渗出率变化(见图5)

冷藏过程中猪肉中的汁液不断渗出的现象主要是由于猪肉中的蛋白质受日益增殖微生物破坏的影

响,导致原本可以有效持水的肉组织中凝胶结构失去有效锁水能力^[14]。细菌的生长繁殖随着时间延长呈对数增长趋势,故其产生的组织破坏也愈加严重、持水能力显著下降,使得冷却肉的汁液渗出率随着时间的延长而逐渐升高^[17]。

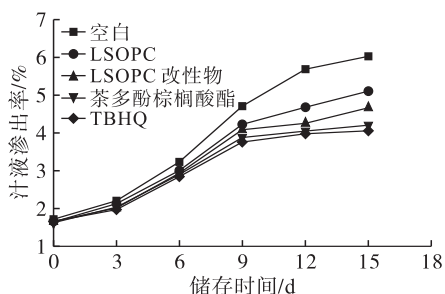


图5 不同处理储存期间冷却猪肉汁液渗出率的变化

由图5可以看出,在前9 d,冷却猪肉汁液渗出率的上升速率较快,9 d后其上升速率减缓,这与细菌生长曲线的对数期及稳定期的趋势相符。经抗氧化剂处理的冷却猪肉汁液渗出率低于空白对照组且差异显著($P < 0.05$),经LSOPC改性物处理后猪肉的汁液渗出率较LSOPC处理明显下降,说明LSOPC改性后能更好地抑制细菌腐败对猪肉组织的破坏,但其保鲜效果仍不及茶多酚棕榈酸酯和TBHQ。

2.3.2 冷却猪肉的pH变化(见图6)

pH可以直观反映冷却猪肉在储藏过程中的新

鲜度,其对猪肉的风味也有很大的影响。肉组织中本身的蛋白酶及微生物所分泌的大量蛋白分解酶会将猪肉中的蛋白质分解为多肽和氨基酸等小分子的结构,在分解过程中产生的大量碱性基团导致冷却猪肉的pH上升^[18]。

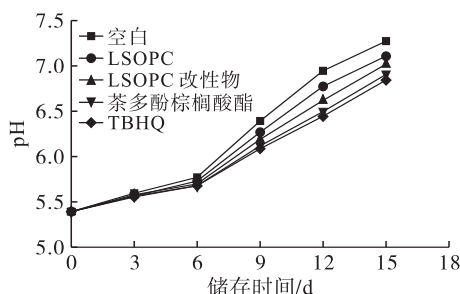


图6 不同处理储存期间冷却猪肉pH的变化

从图6可以看出,冷却猪肉pH随着储存时间的延长而不断升高,6 d后pH上升速率较快。经抗氧化剂处理的冷却猪肉pH低于空白对照组且差异显著($P < 0.05$),这是因为这些抗氧化剂还可以有效抑菌及抑制酶活。经LSOPC改性物处理之后猪肉的pH较LSOPC处理明显下降,说明LSOPC改性后其脂溶性提高有助于其在脂质体系中更好地发挥抗脂质氧化性能,但其保鲜效果仍不及茶多酚棕榈酸酯和TBHQ。

2.3.3 冷却猪肉的色差值变化(见图7)

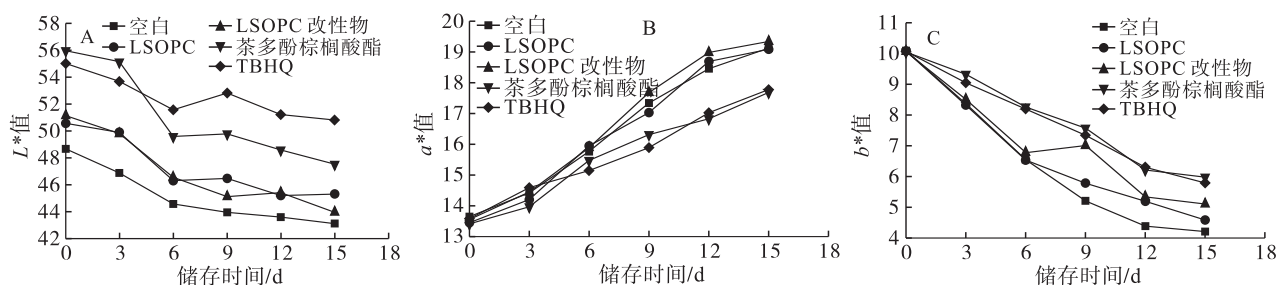


图7 不同处理储存期间冷却猪肉L*值(A)、a*值(B)、b*值(C)的变化

L^* 值又称亮度值,能反映肉样的光泽度。由图7A可以看出,各处理肉样在15 d储存期间 L^* 值均会出现不同程度的下降,经不同抗氧化剂处理的肉样的 L^* 值的降幅都显著高于空白对照组($P < 0.05$),在整个储存期间,空白对照组肉样的 L^* 值一直处于同一时期所有处理肉样的最低值。 L^* 值越低,肉的颜色越好,各种抗氧化剂对猪肉均具有失色作用,且能造成肉样一定程度的脱水,影响肉样的光泽度。相对茶多酚棕榈酸酯和TBHQ,LSOPC和LSOPC改性物对冷却猪肉具有一定的护色作用。

从图7B可以看出,在15 d的储存期间, a^* 值出现不同程度的上升,表明随着储存时间的延长,肉

的红度值逐渐变好,可能原因是在储存过程中,肉中的氧合肌红蛋白与肌红蛋白被强烈氧化,形成氧化肌红蛋白,加深了肉的颜色, a^* 值升高。15 d后,观察到冷却猪肉颜色变暗,开始变为黄绿色,这是因为肌红蛋白被氧化成褐色的高铁肌红蛋白,氧气逐渐被消耗,水分流失增多,肉表面的肌红蛋白与氧气结合位置被 H_2O 所取代,使肌肉呈现暗红色。而LSOPC及其改性物对冷却猪肉鲜红颜色的保持与茶多酚棕榈酸酯及TBHQ具有一定的差距。由图7C可知,15 d内各处理肉样 b^* 值随着储存时间的延长而下降。

2.3.4 冷却猪肉的TBA值变化(见图8)

TBA值即为脂质过氧化产物丙二醛(MDA)的

含量,反映了脂质过氧化程度。从图8可以看出,经各组保鲜剂处理的肉样的TBA值较空白对照组明显降低,经0.1%LSOPC改性物处理的肉样0~6d内TBA值上升较快,6d后上升速率减缓,与LSOPC相比,有效抑制了冷却猪肉TBA值的上升,说明经硬脂酰氯改性,LSOPC的抗脂质氧化能力显著增强。而茶多酚棕榈酸酯及TBHQ仍发挥了良好的保鲜能力,从储存第3天开始,其TBA值上升速度就远低于LSOPC和LSOPC改性物处理组。

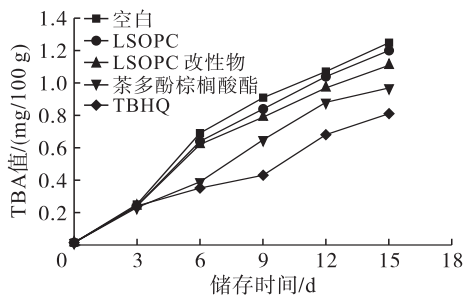


图8 不同处理储存期间冷却猪肉TBA值的变化

3 结论

通过紫外可见光谱法定性探究了LSOPC改性物在不同环境下的稳定性,结果表明:LSOPC改性物在弱酸及在少量还原剂存在条件下可基本保持稳定,而在强酸、碱性、氧化剂环境中结构容易被破坏;同时LSOPC改性物能在多数阴、阳离子中保持结构稳定,但在 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等水解性阳离子和 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等酸根离子中极易发生变化。另外,通过对15d内冷却猪肉经不同抗氧化剂处理后的各项指标进行测定和分析,发现LSOPC改性物在冷却猪肉中发挥出比LSOPC更为优良的保鲜效果,但在一定程度上会造成冷却猪肉失色。研究结果与将LSOPC改性物添加到菜籽油中抗油脂氧化的结果相一致,说明经过硬脂酰氯改性,LSOPC的脂溶性得到了提高,其更容易分散于油脂体系中的特性有效提高了其抗油脂氧化能力。LSOPC改性物在油脂体系及食品工业中的广泛使用还有待更深入的研究。

参考文献:

[1] OKUBO T, YOKOYAMA Y, KANO K, et al. Cell death induced by the phenolic antioxidant *tert*-butylhydroquinone and its metabolite *tert*-butylquinone in human monocytic leukemia U937 cells[J]. Food Chem Toxicol, 2003, 41: 679-688.

[2] GUAN Y, CHU Q, FU L, et al. Determination of antioxidants in cosmetics by micellar electrokinetic capillary

chromatography with electrochemical detection [J]. J Chromatogr A, 2005, 1074: 201-204.

[3] GUO L, XIE M Y, YAN A P, et al. Simultaneous determination of five synthetic antioxidants in edible vegetable oil by GC-MS[J]. Anal Bioanal Chem, 2006, 386: 1881-1887.

[4] 肖俊松, 谢笔钧, 曹雁平, 等. 莲房原花色素的纯化分级和结构鉴定[J]. 食品科学, 2012, 93(19): 172-177.

[5] 凌智群. 莲房原花青素及其生物、药理活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2001.

[6] 禹华娟, 孙智达, 谢笔钧. 莲原花青素在油脂体系中的抗氧化作用[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2132-2140.

[7] 姜艳. 冷却肉栅栏保鲜技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016.

[8] 马美湖, 娄爱华, 葛长荣, 等. 冷却肉生产中保鲜技术的研究——溶菌酶、Nisin、山梨酸钾保鲜正交试验[J]. 食品科学, 2005, 26(3): 235-242.

[9] XIAO J S, XIE B J, CAO Y P, et al. Characterization of oligomeric procyanidins and identification of quercetin glucuronide from lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seedpod[J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(11): 2825-2829.

[10] ZHONG Y, SHAHIDI F, GALLATE L E. EGCG derivatives as novel antioxidants[J]. J Agric Food Chem, 2011, 59: 6526-6533.

[11] 邵卫梁, 胡天喜, 杭晓敏, 等. 不同酯化程度的脂溶性茶多酚抗氧化和抗脂质过氧化研究[J]. 安徽医药, 2006, 10(12): 904-907.

[12] 张亚楠, 谢笔钧, 孙智达. 硬脂酰氯改性对莲原花青素低聚体在油脂体系中抗氧化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 97-101, 107.

[13] 卢付青, 唐善虎, 白菊红, 等. 藿香提取物对冷却肉保鲜作用的研究[J]. 食品科技, 2015, 40(10): 118-123.

[14] 刘彩云, 彭章普, 邵建宁, 等. 中草药防腐剂对冷却猪肉保鲜效果的研究[J]. 肉类工业, 2015(9): 43-45.

[15] WITTE V C, KROUSE G F, BAILEY M E. A new extraction method for determining 2-thiobarbituric acid values of pork and beef during storage[J]. J Food Sci, 1970, 35: 582-585.

[16] 康怀彬, 赵丽娜, 肖枫, 等. 二次杀菌对真空包装酱牛肉货架期影响的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 617-620.

[17] 徐晓霞. 中草药防腐剂的筛选及其在冷却牛肉中的保鲜应用研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.

[18] 夏凡. 苹果多酚对不同包装冷却猪肉货架寿命影响的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.